

move2zero

Vollständige Dekarbonisierung eines städtischen öffentlichen Bussystems und Integration von innovativen On-Demand Services



move²zero

Projekttitlel: move2zero

Langtitlel: Vollständige Dekarbonisierung eines städtischen öffentlichen Bussystems und Integration von innovativen On-Demand Services

Bericht: Publizierbarer Endbericht

Berichtszeitraum: 1.5.2022 – 30.4.2024

Titelbild: Miemo Penttinen / Getty Images

Erscheinungsjahr: 2024

Impressum

Herausgeber: move2zero Projektkonsortium, Redaktion: move2zero Projektkonsortium, Texte: Mitglieder des move2zero Projektkonsortiums (Andreas Solymos, Nina Lassnig, Christopher Sekoll, Lisa Göttfried, Manuela Beran, Lena Franke, Martin Leitner, David Fritz, Mario Hirz, Daniel Fragner, Michael Cik, Ulrich Pferschy, Nathalie Frieß, Michael Richter, Stephan Schwalenberg, Gerhard Weinzinger, Christina Hubin), Illustrationen und Bilder: Mitarbeiter des Projektkonsortiums, April 2024.

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

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	Move2zero
Langtitel:	Vollständige Dekarbonisierung eines städtischen öffentlichen Bussystems und Integration von innovativen On-Demand Services
Programm inkl. Jahr:	Zero Emission Mobility, 1. Ausschreibung, 2019
Dauer:	01.05.2019 bis 30.04.2024
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	Grazer Energieagentur Ges.m.b.H.
Kontaktperson Name:	Lisa Göttfried
Kontaktperson Adresse:	Kaiserfeldgasse 13, 8010 Graz
Kontaktperson Telefon:	+316 811 848 28
Kontaktperson E-Mail:	goettfried@grazer-ea.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	<p>Konsortialführung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Holding Graz Kommunale Dienstleistungen GmbH (Steiermark) <p>Projektinitiierung und –koordination:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grazer Energieagentur GmbH (Steiermark) <p>Projektpartner:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ARTI – Autonomous Robot Technology GmbH (Steiermark) • Energie Graz GmbH & Co KG (Steiermark) • Energie Steiermark Technik GmbH (Steiermark) • Hoerbiger Wien GmbH (Wien) • HyCentA Research GmbH (Steiermark) • Invenium Data Insights GmbH (Steiermark) • PLANUNGXGRUPPE Architekten Generalplaner PartmbB (Deutschland) • Technische Universität Graz (Steiermark) • TECHNOMA Technology Consulting & Marketing GmbH (Wien) • Umweltbundesamt GmbH (Wien)

Allgemeines zum Projekt	
	<ul style="list-style-type: none"> • Universität Graz – Institut für Statistik und Operations Research (Steiermark) • Upstream – next level mobility GmbH (Wien)
Schlagwörter:	#Klimaziele #Leitprojekt #Emissionsfreie Mobilität #Öffentlicher Verkehr der Zukunft #Dekarbonisierung #Modellierung und Simulation #Nutzer:innenakzeptanz #Bedarfsabhängige Mobilität #Automatisiertes Laden
Projektgesamtkosten:	~ 4 Mio. Euro
Fördersumme:	~ 2,2 Mio. Euro
Erstellt im:	Juli 2024

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

Österreich hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2040 Klimaneutralität zu erreichen. Die Dekarbonisierung des Mobilitätssektors stellt dabei eine der größten Herausforderung dar. Mit der Umsetzung des Leitprojektes „move2zero“ wurde ein weiterer wichtiger Meilenstein in Richtung Attraktivierung und Dekarbonisierung des öffentlichen Verkehrs gelegt.

Das Leitprojekt „move2zero“ zielt darauf ab, den gesamten öffentlichen Verkehr auf emissionsfreie Antriebe umzustellen, und innovative bedarfsabhängige Services zur Attraktivierung des öffentlichen Verkehrs einzuführen. Neben der lokalen Emissionsfreiheit werden entlang des gesamten Systems Komponenten mit niedrigen Emissionsfaktoren und hoher Wiederverwendungs- und Recyclingfähigkeit bevorzugt eingesetzt. Dafür wurden einerseits Eco-Design Kriterien definiert, welche in den Ausschreibungsprozessen von Bus- und Infrastruktur berücksichtigt werden. Andererseits wurden die gesamten Lebenszyklusemissionen aller unterschiedlichen Technologien erhoben und gegenübergestellt.

In einem Demonstrationsbetrieb mit einem batterieelektrischen und einem Brennstoffzellenbus wurden zwei unterschiedliche Technologien im Echtbetrieb getestet und Daten und Erfahrungen aus dem Realbetrieb unter unterschiedlichsten Rahmenbedingungen wie z.B. Außentemperatur, Wetter und Linientopographie erhoben. Durch umfassendes Monitoring und Evaluierung der Realdaten wurde eine gute Entscheidungsgrundlage für die Bestimmung der optimalen Technologie bzw. des optimalen Technologiemix für die vollständige Dekarbonisierung der Busflotte geschaffen. Dafür wurde ein mathematisches Optimierungsmodell entwickelt, welches eine Vielzahl von relevanten Parametern hinsichtlich der Kosten optimiert und die optimale Technologie inkl. Infrastruktur für jede Linie definiert. Im Endergebnis zeigt sich, dass auf Basis der aktuellen Daten für Graz der vollständige Einsatz von ONC („Overnight Charging“ / Über-Nacht-Ladung) Bussen als die kostenoptimale Technologie hervorgeht. Für die Ausführung werden dabei 71 Solobusse und 105 Gelenkbusse – ergibt in Summe 176 Busse – benötigt (Werte ohne Bus-Reserven).

Ein weiteres Ziel des Projekts war die Erforschung von effizienten Wegen der Wasserstoffkompression, die starken Einfluss auf die Kosten und Reinheit des Wasserstoffs hat. Um die am besten geeignete Kompressionstechnologie in Abhängigkeit von Anwendungsfällen und Restriktionen spezifischer Anwendungen zu ermitteln, wurden Simulationsmodelle für verschiedene Kompressionspfade und dazugehörige Verkettungsstrategien entwickelt. Die thermodynamische Evaluierung und der Vergleich mit Realdaten zeigte die hohe Eignung des elektrochemischen Verdichters für eine einstufige Verdichtung von niedrigen Drücken (1-10 bar) auf 100-200 bar, während ein mechanischer Kolbenverdichter sein hohes Potential für große Durchflussmengen vor allem bei hohen Vordrücken von > 50 bar ausspielen kann. Für hohe Durchflüsse (>20 kg/h) sind die Kosten für einen elektrochemischen Verdichter aktuell ca. 3-4 mal so hoch wie für einen mechanischen, das Potential zur Reduktion der Kosten um mehr als 50 % ist jedoch mittelfristig gegeben.

In einem zweiten Testbetrieb wurde am Flughafen Graz ein innovatives, batterieelektrisches On-Demand-Shuttleservice getestet. Ziel war einerseits die Erhöhung der Attraktivität der öffentlichen Anreise zum Flughafen Graz, sowie andererseits die Analyse der Akzeptanz für die Nutzung von bedarfsabhängigen Angeboten und die Erhebung des Potentials für den autonomen Betrieb des Shuttles. Zudem wurde das automatisierte Matrix Charging Ladesystem das erste Mal erfolgreich im öffentlichen Raum erprobt.

Begleitend zu den Demonstrationsphasen wurden Maßnahmen zur Bürger:innenbeteiligung und –information erfolgreich durchgeführt. Durch Befragungen, Vorträge, Workshops, Ideenwettbewerbe und Expert:innengespräche wurde Ängsten und Unsicherheiten hinsichtlich der neuen Technologien entgegengewirkt, sowie allgemein mehr Bewusstsein für das Thema Klima- und Umweltschutz geschaffen. Zur optimalen Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse wurde ein „Leitfaden zur Dekarbonisierung städtischer Busflotten“ erstellt. Der Leitfaden stellt ein ganzheitliches und detailliertes Instrument dar, das Städten und Verkehrsdienstleistern ermöglicht, die Dekarbonisierung ihrer Busflotten zielgerichtet und effektiv voranzutreiben. Der Leitfaden ist das Ergebnis des Leitprojektes move2zero und bietet die optimale wissenschaftliche und operative Basis für die Umsetzung der gesamten Dekarbonisierung der Busflotte. Der Hauptteil des Leitfadens umfasst dabei die Themen Technologieauswahl, Infrastrukturaufbau, betriebliche Anpassungen, Prozessplanung und Wirtschaftlichkeit sowie Klimawirkung.

Move2zero ist dabei ein integraler Bestandteil von dem Ziel, innovative Lösungen für die Herausforderungen der öffentlichen Mobilität zu entwickeln und damit eine Vorreiterrolle in der umweltfreundlichen städtischen Mobilität einzunehmen.

2 Executive Summary

Austria has set a goal to achieve carbon neutrality by the year 2040. The decarbonization of the mobility sector represents one of the greatest challenges in this effort. The implementation of the flagship project "move2zero" has marked another important milestone towards making public transport more attractive and decarbonized.

The "move2zero" project aims to convert all public transport to emission-free drives and introduce innovative demand-driven services to enhance the appeal of public transport. In addition to local emission-free operation, components with low emission factors and high reusability and recycling capabilities are preferred throughout the system. For this purpose, eco-design criteria have been defined, which are considered in the procurement processes of buses and infrastructure. Furthermore, the total lifecycle emissions of all different technologies have been collected and compared through direct discussions with manufacturers.

In a demonstration operation with a battery-electric and a fuel cell bus, two different technologies were tested under real conditions, and data and experiences were gathered under various circumstances such as outdoor temperature, weather, and route topography. Through comprehensive monitoring and evaluation of the real data, a solid basis for deciding the optimal technology or the optimal technology mix for the complete decarbonization of the bus fleet was established. A mathematical optimization model was developed, optimizing a multitude of relevant parameters in terms of costs and defining the optimal technology including infrastructure for each route. The final results show that, based on the current data for Graz, the complete deployment of ONC buses emerges as the cost-optimal technology. For the implementation, 71 solo buses and 105 articulated buses – in total 176 buses - are required (values without bus reserves).

Another goal of the project was to explore efficient ways of hydrogen compression, which significantly affects the costs and purity of the hydrogen. To determine the most suitable compression technology depending on use cases and specific application restrictions, simulation models for various compression paths and associated chaining strategies were developed. The thermodynamic evaluation and comparison with real data demonstrated the high suitability of the electrochemical compressor for single-stage compression from low pressures (1-10 bar) to 100-200 bar, while a mechanical piston compressor showed its high potential for large flow rates, especially at high inlet pressures of > 50 bar. For high flows (>20 kg/h), the costs for an electrochemical compressor are currently about 3-4 times as high as for a mechanical one, but there is potential to reduce costs by more than 50% in the medium term.

In a second test operation at Graz Airport, an innovative battery-electric on-demand shuttle service was tested. The objective was to increase the attractiveness of public access to Graz Airport and to analyze the acceptance of demand-driven services as well as to assess the potential for autonomous operation of the shuttle. Furthermore, the automated Matrix Charging charging system was successfully tested in public space for the first time.

Alongside the demonstration phases, measures for citizen participation and information were successfully conducted. Through surveys, lectures, workshops, idea competitions, and expert discussions, fears and uncertainties regarding the new technologies were addressed, and general awareness of climate and environmental protection was raised. To optimally utilize and disseminate the project results, a "Guide for the Decarbonization of urban Bus Fleets" was created. This guide is a comprehensive and detailed tool that enables cities and transport providers to drive the decarbonization of their bus fleets effectively and targetedly. The guide is the result of the move2zero flagship project and offers the optimal scientific and operational basis for implementing the complete decarbonization of the bus fleet. The main part of the guide covers topics such as technology selection, infrastructure development, operational adjustments, process planning, and economic efficiency as well as climate impact.

Move2zero is an integral part of the goal to develop innovative solutions for the challenges of public mobility, thus taking a leading role in environmentally friendly urban mobility.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Die zunehmende Urbanisierung und der Klimawandel stellen Politik und Gesellschaft vor immense Herausforderungen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, sind ambitionierte Klimaschutzmaßnahmen erforderlich. Die Maßnahmen der EU zur Reduktion der Emissionen des Verkehrssektors fokussieren sich im Wesentlichen auf den Straßenverkehr, der aktuell 71% aller verkehrsbezogenen Emissionen ausmacht. 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.

Zur Bekämpfung des Klimawandels und der damit einhergehenden negativen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt sind neben europäischen Zielen auch konkrete Ziele auf Bundes- und Landesebene festgelegt und Schwerpunkte gesetzt worden. Mit dem Klimaschutzplan der Stadt Graz wurde auch auf lokaler Ebene ein weiterer wichtiger Meilenstein gesetzt, der das Ziel der Klimaneutralität bis zum Jahr 2040 konsequent verfolgt. Das Haus Graz muss lt. „Klimaschutzplan Teil I“ im Bereich Klimaschutz eine besondere Vorreiterrolle einnehmen und strebt daher eine jährliche Reduktion der THG-Emissionen um 30 % an, um im eigenen Einflussbereich bis 2030 Klimaneutralität zu erreichen. Nach Evaluierung der Gesamtemissionen im Haus Graz wurde festgestellt, dass ein Großteil der mobilitätsbedingten Emissionen des Hauses Graz, nämlich ca. 8.500 t CO₂eq im Jahr 2018 bzw. ca. 20 % aller CO₂-Emissionen des Hauses Graz, den Bussen im öffentlichen Verkehr zuzurechnen ist. Der öffentliche Verkehr ist somit unerlässlicher Baustein im Zuge der Dekarbonisierung und wesentlich, um die CO₂-Emissionen zu verringern und damit die negativen Folgen des Klimawandels zu reduzieren. Im Rahmen der Maßnahmenerhebung- und Priorisierung für das Haus Graz ging hervor, dass die Dekarbonisierungsmaßnahmen im Kosten/Nutzen-Vergleich jedoch schlechter abschneiden als viele andere Maßnahmen (d.h. vergleichsweise hohe Kosten pro eingesparter Tonne CO₂).

Neben dem positiven Einfluss auf Klima und Umwelt, hat die Dekarbonisierung und Attraktivierung des öffentlichen Verkehrs weitere positive Effekte:

- **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.
- **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.
- **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.
- **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.

Für das Projekt move2zero wurden somit folgende Ziele formuliert:

Das übergeordnete Ziel des Projekts move2zero ist es, einen Handlungsleitfaden für die Dekarbonisierung und Attraktivierung von Busflotten zu entwickeln und dadurch die vollständige Dekarbonisierung des städtischen Busverkehrssystems zu demonstrieren. Das System umfasst dabei

- emissionsfreie Technologien zur Energieerzeugung
- 100% lokal emissionsfreie Technologien für den Betrieb der Fahrzeuge
- Komponenten, die geringe Emissionsfaktoren und eine hohe Wiederverwendbarkeit sowie Recyclbarkeit aufweisen
- perfekt auf die Bedürfnisse und Erwartungen der Nutzer:innen des öffentlichen Verkehrs abgestimmte (bedarfsorientierte) Services
- verschiedene Aspekte der automatisierten und vernetzten Mobilität
- ein Konzept, welches unmittelbar in den Systembetrieb des öffentlichen Verkehrssystems der Stadt Graz und anderer Städte implementiert werden kann.

4 Projektinhalte und Ergebnisse

Arbeitspaket 1 - Projektmanagement

Ein strukturiertes Projektmanagement stellte sicher, dass das Projekt effektiv und effizient durchgeführt wurde, und die gewünschten Ergebnisse erzielt werden konnten. Besonders in einem Konsortium dieser Größe ist ein umfangreiches Projektmanagement der Schlüsselfaktor für ein erfolgreiches Projekt. Regelmäßige Kommunikation innerhalb des Konsortiums und mit den Stakeholdern sorgte für Transparenz, was es ermöglichte, Herausforderungen proaktiv anzugehen und notwendige Anpassungen vorzunehmen. Die perfekte Zusammenarbeit innerhalb des Konsortiums und das Engagement für die Projektumsetzung waren entscheidend für das Erreichen der Projektziele.

Zweiwöchentliche Jour-Fix Termine des Kernteams, monatliche Arbeitspaket-Leiter:innen-Meetings, halbjährliche Konsortialmeetings sowie viele anlassbezogene Projektteammeetings stellten den optimalen Austausch innerhalb des Projektes sicher. Für den optimalen Austausch mit externen Stakeholdern sorgten unter anderem die halbjährlichen Projektbeirat-Meetings mit den Fördergebern, halbjährliche Programmbeirat-Meetings mit themenähnlichen Forschungsprojekten sowie jährliche Fachbeirat-Meetings mit ausgewählten Fachgruppen aus der Branche.

Neben kontinuierlichen Meetings wurde die Qualität des Projektes durch die Durchführung von Reviewprozessen innerhalb des Konsortiums im Rahmen der Erstellung von Deliverables sichergestellt.

Arbeitspaket 2 – Ökodesign und Lebenszyklusanalyse

Der Begriff Ökodesign beschreibt Aspekte der ökologischen Produktgestaltung, die den gesamten Produktlebenszyklus berücksichtigen, sowohl für den Hersteller selbst als auch innerhalb der Lieferkette. Um diese zentralen Nachhaltigkeitsaspekte zu adressieren, wurden im Rahmen von move2zero Ökodesign-Kriterien für Busse und Lade- sowie Tankinfrastruktur in Form von Lastenheften entwickelt. Diese Lastenhefte wurden an alle Bushersteller, welche durch einen „Letter of Intent“ Interesse am Projekt bekundet haben, versandt. Informationen zu den Anforderungspunkten des Lastenheftes wurden in unterschiedlichem Umfang und unterschiedlicher Detailtiefe von fünf Herstellern batterieelektrischer Busse, sowie je einem Hersteller von Brennstoffzellenbussen bzw. Ladesäulen zur Verfügung gestellt. Life cycle assessments (LCA bzw. Ökobilanzen) oder Environmental Product Declarations (EPD, Umweltproduktdeklarationen) stehen für alle Busse zur Verfügung. Da in den jeweiligen LCAs bzw. EPDs methodische Unterschiede, abweichende Annahmen und Systemgrenzen vorliegen (Lebensdauer, Fahrleistungen, Emissionsfaktoren, etc.), ist ein direkter Vergleich der zur Verfügung gestellten Informationen jedoch nicht möglich. Alle Hersteller (Original Equipment Manufacturers; OEM) konnten Nachweise über ein zertifiziertes Umweltmanagementsystem liefern, während Informationen zum Anteil der Zulieferfirmen, die über Umweltmanagementsysteme verfügen, weitgehend nicht verfügbar sind. In Hinblick auf Maßnahmen am Lebensende der Busse bzw. Ladesäulen konnte ein Hersteller Auskunft zu Partnerunternehmen im Bereich Recycling geben. Kein Hersteller konnte sicherstellen, dass keine Materialien und Substanzen gemäß der REACH-Verordnung (Verordnung zur Registrierung, Zulassung, Beschränkung und Bewertung chemischer Stoffe) in den Bussen eingesetzt werden, wobei drei OEM die Konformitätserklärung gemäß REACH sowie zwei Hersteller eine Eigenerklärung zu Substanzen mit sehr hohen Risiken lieferten. Eine besonders hohe Varianz zeigte sich bei den Rückmeldungen zu Nachhaltigkeitsinitiativen rund um die Lieferkette. Auf Grundlage einer Desktop-Recherche in den Nachhaltigkeitsberichten der OEM konnten Informationen über Nachhaltigkeitsinitiativen gesammelt werden, wie z.B. die Teilnahme an der Responsible Minerals Initiative (RMI). Eine strukturiertere Darstellung dieser Initiativen durch OEMs ist in Zukunft wünschenswert und würde eine vergleichbarere Grundlage für diesen Nachhaltigkeitsaspekt bieten. Insgesamt ermöglichen die bereitgestellten

Informationen eine grobe Bewertung der Lieferanten. Um diese Informationen jedoch als valide Entscheidungsgrundlage zwischen Lieferanten nutzen zu können, sind umfassendere oder vergleichbare Informationen erforderlich.

Für zukünftige Beschaffungsprozesse gelten Vorschriften wie die EU-Batterieverordnung (Verordnung 2023/1542), die erweiterten Anforderungen an die Nachhaltigkeitsberichterstattung gemäß der Corporate Sustainability Reporting Directive-Richtlinie (Verordnung 2022/2464) und die kommende Öko-design-Verordnung für nachhaltige Produkte (ESPR). Dies wird die Verfügbarkeit relevanter und vergleichbarer Informationen in Zukunft wesentlich erleichtern.

Im Projekt move2zero wurde für die Busse ein ganzheitlicher Lebenszyklusansatz angesetzt, der den Material- und Energieeinsatz sowie die Treibhausgasemissionen aus allen wichtigen Lebenszyklusphasen und -prozessen abdeckt. Es wurden dabei alle direkten und indirekten Prozessemissionen im Zusammenhang mit den verschiedenen Lebenszyklusphasen berücksichtigt. Insgesamt wurden 14 verschiedene Busse mit unterschiedlichen Antriebssystemen analysiert.

Die THG-Emissionen und der kumulierte Energieaufwand (KEA) der Produktion der verschiedenen Busstypen sowie die Well-to-Wheel-THG-Emissionen und den KEA unter Berücksichtigung verschiedener Antriebsenergien (d.h. 100% erneuerbarer Strom, durchschnittlicher österreichischer Stromverbrauchsmix, fossiler Diesel und synthetischer Diesel) wurden berechnet. Abbildung 1 zeigt die Lebenszyklus-THG-Emissionen folgender verschiedener 12m-Busse unter Berücksichtigung eines 10-jährigen Betriebs mit einer jährlichen Fahrleistung von 60.000 km:

- ICE Diesel fossil
- ICE Fischer Tropsch Diesel
- ONC (overnight charging / Über-Nacht Ladung)
- FC-Rex (fuel-cell range extender / Batteriebus mit Brennstoffzellen Reichweitenverlängerung)
- FC (fuel-cell / Brennstoffzellenbus)
- OPC (opportunity charging / Gelegenheitsladung)
- OPC + Battery (opportunity charging + battery / Gelegenheitsladung mit zusätzlicher größerer Batterie)

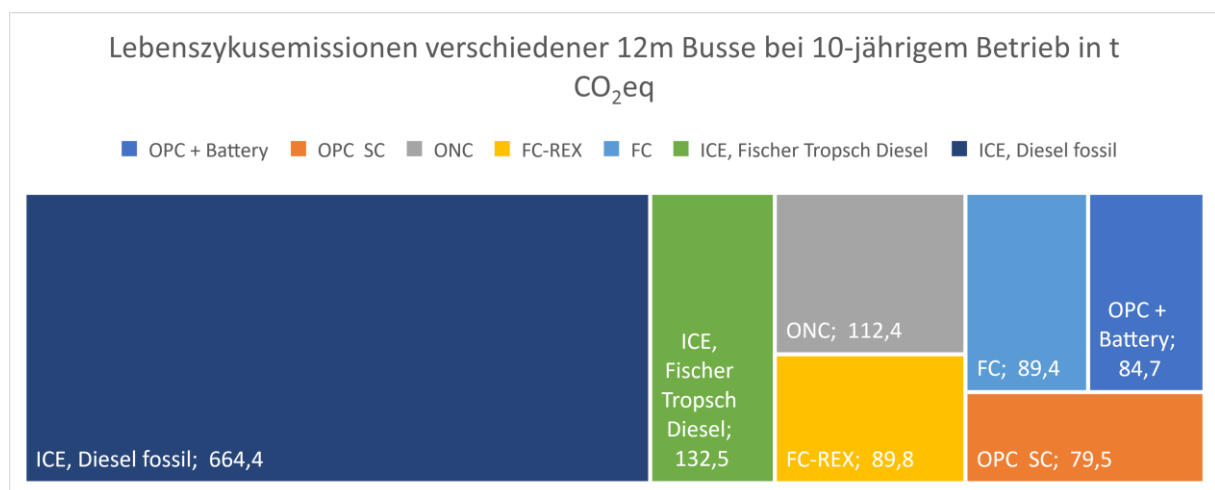


Abbildung 1 Lebenszyklus Treibhausgasemissionen in Tonnen CO₂eq der unterschiedlichen Busse

Es überrascht nicht, dass die meisten THG-Emissionen in Höhe von 664 Tonnen vom fossilen Diesibus verursacht werden. Während die Lebenszyklus-THG-Emissionen der alternativen Busse (OPC und FC) mit 80 bis 89 Tonnen recht ähnlich sind, sind die Emissionen des ONC-Busses 20-29 % höher als die der OPC- und FC-Busse. Die Ergebnisse dienen als Eingabedaten für das Optimierungsmodell welches in

Arbeitspaket 3 entwickelt wurde, und bildeten die Grundlage für die Analyse verschiedener Szenarien für die Zusammensetzung der Busflotte bis 2050, um die Option mit den niedrigsten THG-Emissionen und KEAs zu ermitteln, wobei auch die Kosten sowie die tatsächliche Umsetzbarkeit berücksichtigt wurden.

Für die Simulation bis 2050 wurden THG-Emissionsfaktoren der Produktion aller Buskomponenten auf Grundlage verschiedener Dekarbonisierungstrends in der Materialproduktion berechnet, wie in Abbildung 2 dargestellt.

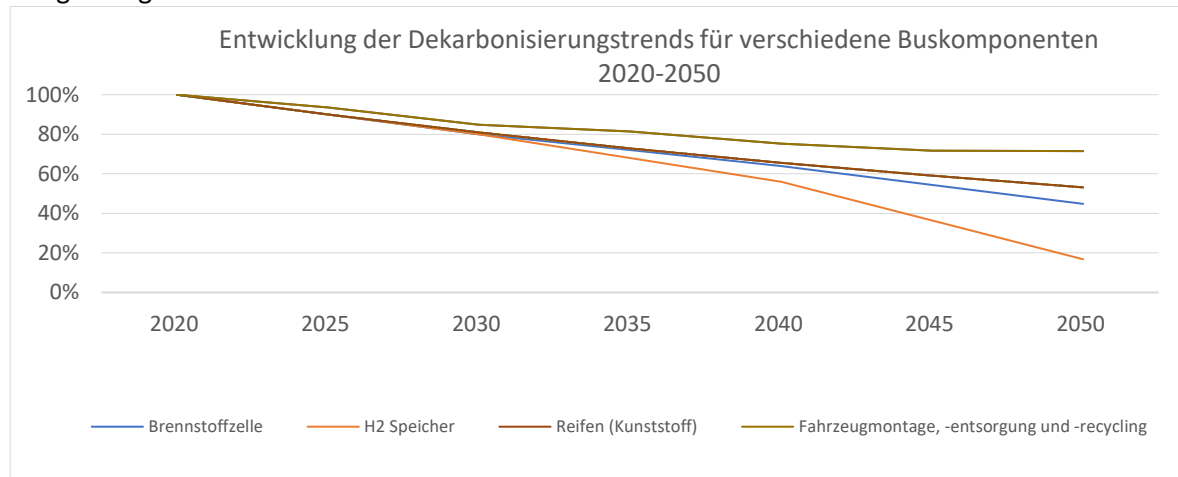


Abbildung 2 Reduktionstrend der THG-Emissionsfaktoren für verschiedene Buskomponenten im Vergleich zu 2020. 2020 = 100%

Arbeitspaket 3 – Rahmenbedingungen und Technologieauswahl

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden im ersten Projektjahr Machbarkeitsstudien für batterieelektrische und Brennstoffzellenbusse erstellt. Die Machbarkeitsstudien beinhalten neben rechtlichen und betrieblichen Rahmenbedingungen eine Technologie- und Marktanalyse, sowie eine Analyse der bewährten Technologien und Lade- sowie Tanksysteme. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie für batterieelektrische Busse wurde die Ladetechnologie des über-Nacht-Ladens (ONC – overnight charging) als Technologie für den Demonstrationsbetrieb ausgewählt. Neben den Machbarkeitsstudien für emissionsfreie Busse, wurde eine Machbarkeitsstudie für ein batterieelektrisches, bedarfsabhängiges Shuttle durchgeführt. Im Rahmen dieser Studie wurden unterschiedliche Arten bedarfsgesteuerter Angebote erhoben und verglichen. Darüber hinaus wurden spezifische Rahmenbedingungen für einen On-Demand-Shuttle am Flughafen Graz definiert, einschließlich Betriebsart, Route, Fahrzeuge, Ladesystem und Buchungssystem.

Im Rahmen von move2zero wurde ein Optimierungsmodell entwickelt, das mithilfe mathematischer Optimierungsmethoden den optimalen Technologie-Mix für das Busnetz in Graz 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. Anhand des Optimierungsmodells wurde gezeigt, dass batterieelektrische Fahrzeuge mit einer Mischung aus Depot- und Gelegenheitsladung die kostengünstigste Lösung für das Busnetzwerk in Graz darstellen. Aufgrund der limitierten Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge an systemkritischen Tagen erhöht sich die Menge an einzusetzenden Fahrzeugen an solchen Tagen (trotz bzw. wegen der Nachladung) um ca. 20 Stück. Durch den Vergleich mit optimalen Lösungen für jede Einzeltechnologie konnte gezeigt werden, dass eine Flotte, die nur aus Depotlade-

Fahrzeugen besteht, mit geringfügig höheren Lebenszykluskosten über einen Zeitraum von 20 Jahren einhergeht ($\leq 1\%$). Der Einsatz einer reinen Wasserstoff-Brennstoffzellen-Busflotte, oder einer Flotte mit Depotladung und Brennstoffzellen als Range-Extender, würde die Lebenszykluskosten des Bussystems unter optimistischen Bedingungen um ca. 5% erhöhen. Der Betrieb von Bussen mit der Ladetechnologien OPC + Supercaps ist für 11 Linien in Graz nicht umsetzbar. Anhand eines Simulationsmodells, das die Ergebnisse der Optimierung über einen Betriebstag hinweg nachbildet und realistische Verkehrsbedingungen im Liniennetzwerk simuliert, wurden die verschiedenen Lösungen auf ihre praktische Einsatztauglichkeit hin getestet. Die Berechnungen der Simulation haben gezeigt, dass das Konzept der Gelegenheitsladung mit Supercaps als Speichertechnologie sehr anfällig auf Störungen reagiert. Auf Basis dessen ergibt sich auf der aktuellen Datenlage und nach Durchführung der Simulation die optimale Technologie von reinen ONC-Bussen für Graz. Nachfolgend dargestellt der Prozess zwischen Datenerhebung, Optimierung und Simulation.

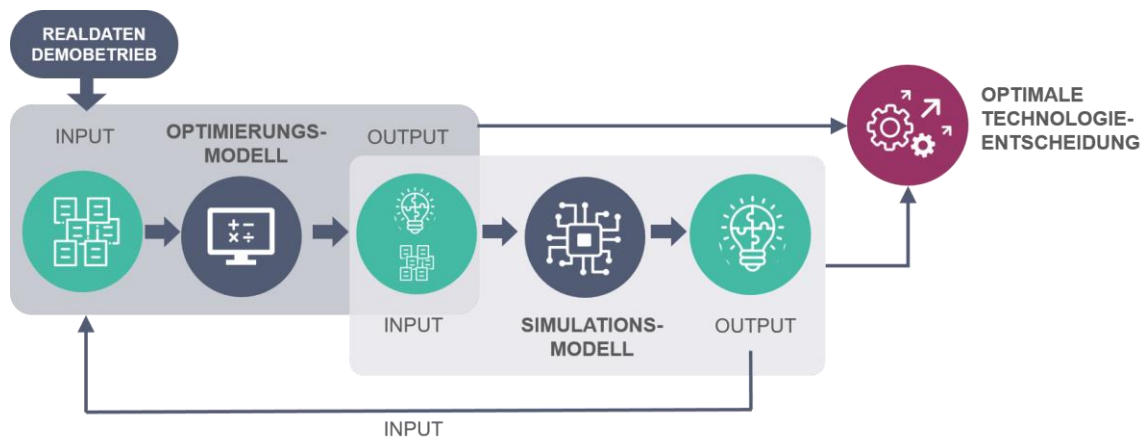


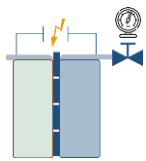
Abbildung 3 Technologieentscheidungs-Prozess

Arbeitspaket 4 – Wasserstoff Kompressionstechnologien

Um eines der Kernelemente einer jeden Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur, den Kompressor, zuverlässiger, effizienter und kostengünstiger zu gestalten, wurden zwei wesentliche Technologien intensiv untersucht. Zum einen die etablierte mechanische Hubkolben-Technologie, die seit Jahrzehnten im Gassektor eingesetzt wird, und die neuartige, aber vielversprechende nicht-mechanische Technologie der elektrochemischen Kompression (electrochemical hydrogen compression - EHC). Dazu wurden für beide Technologien Simulationsmodelle entwickelt auf 0D, 1D, bzw. 3D-CFD-Basis, um die thermodynamischen Zusammenhänge abzubilden und die grundsätzliche Eignung für spezifische Anwendungsfälle zu evaluieren. Im Zuge des Projekts konnte ein erster EHC-Prototyp mit Versuchen bis 75 bar und ein dazugehöriger Teststand (bis 0.28 NI H₂/min) erfolgreich umgesetzt werden. Der geplante mechanische Kolbenkompressor im industriellen Maßstab konnte aufgrund des Projektpartnersausstiegs von HOERBIGER nicht umgesetzt werden. Der theoretische und der Betriebsdatenvergleich von umgesetzten mechanischen (Kolben-)Kompressoren (MC) und des EHC-Prototypen ergaben, dass aus aktueller Sicht der EHC für niedrigere Druckstufen (1-100 bar), geringere Durchflüsse (<20 kg/h) und hohe Reinheiten geeignet ist, während der mechanische Kompressor vor allem für hohe Durchflüsse bei entspre-

chendem Vordruck (> 30 bar) vorteilhaft ist. Die Gründe dafür liegen in der Funktionsweise. Die Durchflussmenge beim EHC ist direkt proportional zur verfügbaren Membranfläche und unabhängig vom Eingangsdruck, während beim MC die Durchflussmenge wesentlich vom Eingangsdruck und der damit verbundenen Dichte abhängt. Deshalb benötigen MC im unteren Druckbereich sehr viele Stufen und sind daher ineffizient bzw. kostenintensiv. Die jeweiligen Vor- und Nachteile der Technologien sind in Tabelle 1 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der elektrochemischen und mechanischen Kompression



Elektrochemische Kompression (EHC)		Mechanische Kompression (MC)	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
Geräusch- und vibrationsfreier Betrieb durch fehlende bewegliche Komponenten, ermöglicht Wasserstofftankstellen in bevölkerungsreichen städtischen Gebieten	TRL für Systeme im industriellen Maßstab sehr niedrig (5-7), aktuell keine Systeme für hohe Durchflüsse am Markt, bzw. Kosten (noch) hoch	seit Jahren gängige Technologie für die Gasverdichtung (TRL 8-9) und eine große Anzahl etablierter Hersteller auf dem Markt	Maximale Druckverhältnisse von ca. 8:1 innerhalb einer Stufe. Daher mehrere Stufen bei niedrigen Eingangsdrücken für hohe Ausgangsdrücke
Reinigung von Gasgemischen möglich, und kein Risiko von Verunreinigungen im Produktgas	empfindlich für kritische Verunreinigungen (CO, CO ₂ , H ₂ S, HCl)	hohe Durchsätze (> 100-200 kg/h) bei entsprechenden Eingangsdrücken (> 50-100 bar), geeignet für Booster-Verdichtung	Starke Lärmemissionen, hohe Komplexität, hoher Wartungsaufwand und aufgrund des Verschleißes der beweglichen Teile
hohe Wirkungsgrade & weniger Stufen für niedrige Eingangsdrücke (< 3 kWh/kg von 1 bis 100 bar), bis zu 1000 bar in 1 Stufe möglich	Aktuell noch niedrige Wirkungsgrade (> 6 kWh/kg) in ungeeigneten Betriebsbereichen (niedrige Befeuchtung, hohe Stromdichte).	hohe Wirkungsgrade bei höheren Eingangsdrücken (ca. 2,7 kWh/kg von 50-1000 bar erreichbar)	Mögliche Verunreinigungen aufgrund von Schmiermitteln (Öl) für bewegliche Teile

Abbildung 4 Vergleich Elektrochemische und Mechanische Kompression

Arbeitspaket 5 – Energiebereitstellung

E-Ladeinfrastruktur

In einer im Rahmen von Arbeitspaket 3 durchgeführten Workshop-Serie mit sämtlichen Projektpartner:innen wurden geeignete Ladetechnologien für den Demobetrieb der ursprünglich geplanten sieben batterieelektrischen Busse definiert. Aufgrund von eingeschränkten Marktverfügbarkeiten, Errichtungsschwierigkeiten von Infrastruktur im öffentlichen Raum (u.a. aufgrund von Altstadtschutzzonen) sowie Erfahrungswerten anderer Städte und Flottenbetreiber, wurde die Ladetechnologie Over-Night-Charging (ONC) mit optionaler Nachladung untertags ausgewählt.

In einem ersten Schritt wurde von der Energie Graz analysiert, ob eine Nachladung der sieben batterieelektrischen Busse technisch möglich ist. Nachdem dies bestätigt werden konnte, wurden zwei weitere strategische Ladepunkte zur Nachladung von Bussen untertags festgelegt und ebenfalls eine Netzberechnung zur Eignung dieser Standorte durchgeführt. In Abstimmung mit dem Planer Planungsgruppe Gesting wurde ein Entwurf für den Demobetrieb sowie die Elektrifizierung der gesamten Busflotte erstellt, der auch die Energieversorgung (Transformatoren, Schaltanlagen etc.) berücksichtigt. Um die Energieversorgung möglichst effizient dimensionieren zu können, ist es notwendig, ein mit dem Betriebshofmanagement abgestimmtes Lademanagement zu etablieren.

Parallel zur Marktanalyse für batterieelektrische Busse wurde auch eine Markterkundung für Ladeinfrastruktur durchgeführt (Mai bis Juni 2021). Ziel war es, einen Überblick über die am Markt verfügbaren Technologien zu erhalten und die nötige Erfahrung für die Erstellung geeigneter Ausschreibungsunterlagen zu sammeln. Im Zuge dieser Arbeiten wurde festgestellt, dass eine Umrüstung des bestehenden Busdepots in der Kärntnerstraße für den Betrieb von Elektrobussen aus platztechnischen Gründen nicht umsetzbar ist und zudem der Busbetrieb in der Bauphase zu stark beeinträchtigt werden würde. Daher wurde die Anschaffung eines geeigneten neuen Grundstücks für den Betrieb der emissionsfreien Busse beschlossen und durchgeführt. Aufgrund des Risikos einer Verzögerung bei der Erschließung des neuen Grundstücks wurde in der Planung jedoch auch ein Ladestations-Provisorium für den Demobetrieb berücksichtigt und analysiert. So wurde sichergestellt, dass der Demonstrationsbetrieb auch im Falle einer Überschreitung des Zeitplans im Rahmen der Grundstückerschließung realisierbar ist.

Unter Berücksichtigung dieser neuen Rahmenparameter wurden von Holding Graz, Technoma und Energie Graz Ausschreibungsunterlagen für Ladeinfrastruktur inklusive eines Lademanagementsystems erstellt und im Herbst 2022 veröffentlicht. Aufgrund der damaligen Ausnahmesituation in der Stadt Graz konnten die notwendigen Investitionsmittel für die Anschaffung der Busse und Infrastruktur zum damaligen Zeitpunkt nicht genehmigt werden. Daher wurde beschlossen, den Demonstrationsbetrieb in stark verkleinerter Version mit jeweils einem batterieelektrischen und einem Brennstoffzellenbus durchzuführen. Die Ausschreibung wurde daher im Dezember 2022 gestoppt. Nach der Freigabe des Änderungsantrags zur Reduktion des Demobetriebs, wurde durch die Energie Graz eine einzelne 150 kW-Ladestation am bestehenden Areal des Busdepots in der Kärntnerstraße errichtet. Die Versorgung der Station konnte aus der bestehenden Umspannstation am Standort realisiert werden.

H₂-Betankungsinfrastruktur

Für die Planung einer Wasserstoffbetankungsinfrastruktur für die ursprünglich geplanten 7 Brennstoffzellenbusse für den Demonstrationsbetrieb sowie einer modularen Erweiterung bis zu einer vollumfänglichen Wasserstoffversorgung für bis zu 170 Bussen, wurden unterschiedliche Konzepte (inkl. Vor-Ort-Erzeugung, externe Anlieferungs- und diverse Speichervarianten) erarbeitet. Die Auswahl des Demoplan-Konzepts für die Versorgung von 7 Bussen fiel mittels einer Nutzwertanalyse auf eine externe Trailer-Anlieferung und 3-Tagesspeicher vor Ort, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Für die Versorgung der geplanten 7 Busse mit einem durchschnittlichen Tagesverbrauch von 140 kg/d, wurde die H₂-Produktionsanlage in Gabersdorf von Projektpartner Energie Steiermark als ideale Lösung identifiziert. Eine Anlieferung des Wasserstoffs mit den dort eingesetzten 20ft. 300 bar Trailern

mit einer Nutzkapazität von ca. 330 kg würde zu einer Anlieferfrequenz von 3 Trailern pro Woche führen. Bei größeren Flotten (> 600 kg/d) und resultierenden Anlieferungen von mindestens ein 40ft. Trailer pro Tag, empfiehlt sich jedenfalls eine Vor-Ort Erzeugungsanlage bzw. Direktverbindung zu einer nahegelegenen Elektrolyse mittels Pipeline. Diese Möglichkeiten wurden jeweils bei den Konzept-Ausarbeitungen und Sicherheitsbetrachtungen der Ausbaustufen für das Busdepot in der Kärntnerstraße und das neu geplante Busdepot in der Hedwig-Katschinka-Straße berücksichtigt. Die technischen Daten und Kostenpositionen für die Infrastrukturkomponenten fanden Eingang in das Optimierungsmodell (Arbeitspaket 3). Im Zuge eines zweiwöchigen Testbetriebs mit einem Brennstoffzellenolobus im Herbst 2021 konnten die Verbrauchsannahmen für die Konzeptionierung der Betankungsanlage bestätigt werden.

Zum Wissensaustausch mit Brennstoffzellenbus- und H₂-Tankstellenbetreibern wurden einige online-Termine und eine Besichtigungstour in Deutschland 2021 durchgeführt. Auf Basis der Konzeptionierung, des Wissensaustausches und einer vorangehenden Markterkundung von europäischen Tankstellenherstellern wurden die Randbedingungen für die Ausschreibung der Infrastruktur definiert. Die technischen und kaufmännischen Ausschreibungsunterlagen für das zweistufige Verhandlungsverfahren wurden ausgearbeitet und es konnten drei potenzielle Bieter im Zuge des Teilnahmeverfahrens im Herbst 2022 gefunden werden. Nach der oben bereits beschriebenen finanziell bedingten Reduktion des Demobetriebs von sieben auf einen Brennstoffzellenbus, und der Entscheidung, keine eigene Betankungsinfrastruktur umzusetzen, wurde die bestehende Tankstelle am Murpark in Graz für die Betankung des Hyundai Elec City Fuel Cell adaptiert.

Trotz fehlender Umsetzung der Betankungsinfrastruktur konnten alle wesentlichen technischen Unterlagen für Beschaffung und Genehmigungsprozess im Zuge des Projekts erarbeitet werden und stehen für zukünftige Realisierungen zur Verfügung. Nachfolgend eine Übersicht der unterschiedlichen Konzepte für Wasserstoffinfrastrukturen.

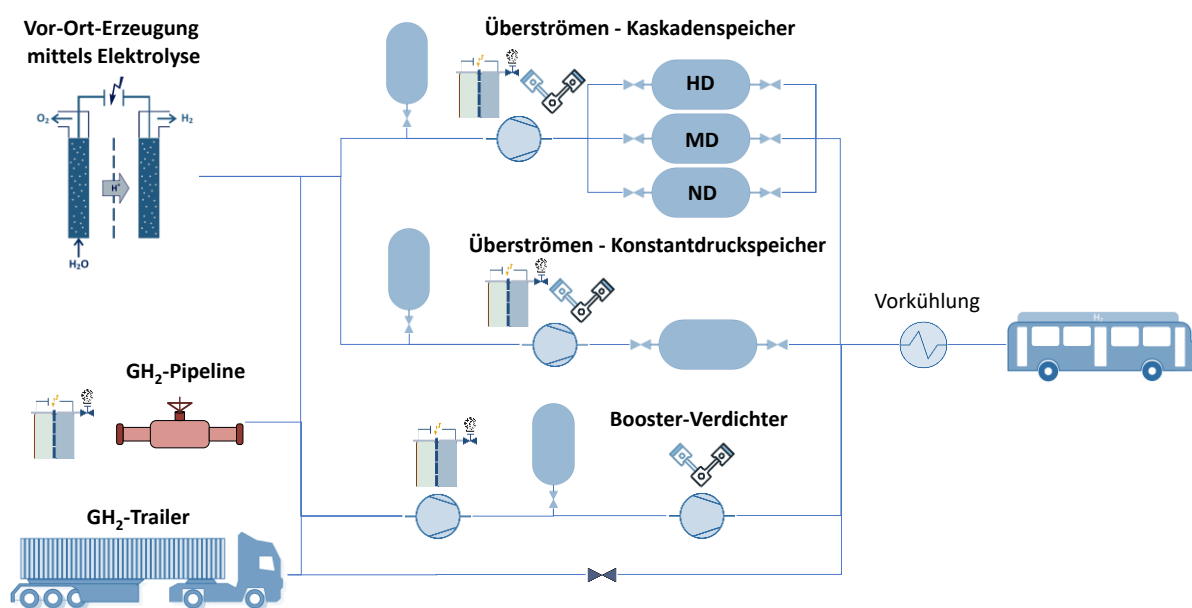


Abbildung 5: Konzepte für Wasserstoffinfrastrukturen

Arbeitspaket 6 - Demonstrationsbetriebe

Im Rahmen des Projekts wurden drei Demonstrationsbetriebe durchgeführt, wobei diese der Busse im Wesentlichen parallel und gemeinsam verlaufen sind:

1. Demonstrationsbetrieb Brennstoffzellenbus
2. Demonstrationsbetrieb batterieelektrischer Bus
3. Demonstrationsbetrieb bedarfsabhängiges e-Shuttle

Ziel der Demonstrationsbetriebe war es, Echt Daten unter den Rahmenbedingungen in Graz zu erheben, sowie Erfahrungen mit und Erkenntnisse über die neuen Technologien zu sammeln.

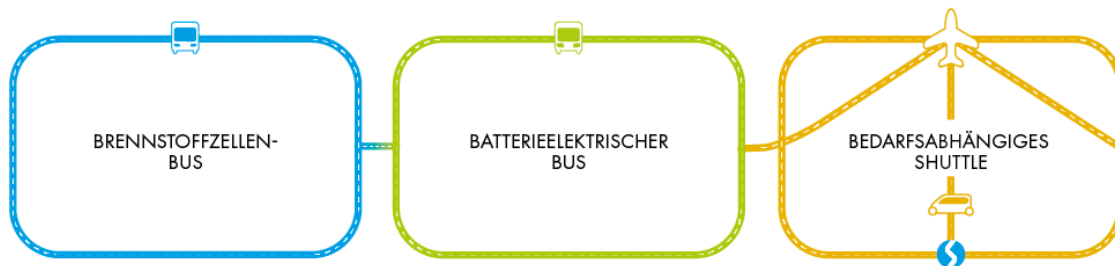


Abbildung 6 Übersicht Demonstrationsbetriebe

Demonstrationsbetrieb batterieelektrischer und Brennstoffzellenbus

Wie bereits in Arbeitspaket 5 beschrieben, konnte der Demonstrationsbetrieb aufgrund budgetärer Einschränkungen nicht, wie ursprünglich vorgesehen, mit sieben batterieelektrischen Gelenkbussen auf der Linie 40 und sieben Brennstoffzellensolobussen auf der Linie 66 durchgeführt werden. Alternativ wurde der Demonstrationsbetrieb mit einem angemieteten batterieelektrischen Solobus und einem 700 bar Brennstoffzellensolobus (FFG Projekt „HyBus Implementation“) durchgeführt. Der verkleinerte Demonstrationsbetrieb hatte zur Folge, dass der Daten- und Erfahrungsgewinn im Echtbetrieb nicht das ursprünglich geplante Ausmaß erreichte. Jedoch brachte der verkleinerte Demonstrationsbetrieb auch Vorteile:

- Direkter Vergleich zweier identer Bus-Arten (Solobusse) mit zwei unterschiedlichen Technologien
- Paralleler Einsatz beider Technologien auf derselben Linie
- Flexibler Einsatz beider Busse auf unterschiedlichen Linien, um dadurch Erfahrungswerte mit unterschiedlichen, z.B. topographischen Rahmenbedingungen, zu erhalten
- Längerer Testbetrieb des Brennstoffzellenbusses (mehr als ein Jahr, da Ausschreibungsprozess wegfällt)
- Nutzung der Synergien beider FFG Forschungsprojekte (move2zero und HyBus)

Trotz des, innerhalb der Projektlaufzeit redimensionierten Demonstrationsbetriebes, wurden wie geplant alle vorbereitenden Maßnahmen für die Dekarbonisierung von ausgewählten Linien sowie im nächsten Schritt der vollständigen Dekarbonisierung der gesamten Busflotte, durchgeführt.

Im Demonstrationsbetrieb zum Einsatz kam somit ein batterieelektrischer Bus der Marke MAN, Type Lion's City 12 E, mit einer Antriebsleistung von 160 kW Dauerleistung sowie einer elektrischen Speicherkapazität des Batteriesystems von 480 kWh. Die vom Hersteller angegebene Reichweite beträgt 300 km, die realistische Reichweite im Linienverkehr beträgt 250 km. Der gemietete batterieelektrische Bus war im Rahmen des Demonstrationsbetriebes mit einer Dieselheizung für den Betrieb in der kalten Jahreszeit ausgestattet. Alle neu angeschafften batterieelektrischen Busse sollten künftig jedoch mit einer vollelektrischen Heizung und somit emissionsfrei unterwegs sein. Darüber hinaus kam ein Wasserstoff-Brennstoffzellenbus der Marke Hyundai, Type Elec City Fuel Cell zum Einsatz. Dieser

ist mit einem H₂-Brennstoffzellensystem mit einer Dauerleistung von 180 kW sowie einem Batteriesystem mit einer Kapazität von 78,4 kWh ausgerüstet. Die maximale Antriebsleistung des Systems beträgt 180 kW. Das H₂-Speichersystem ist in Form von Hochdrucktanks mit einem Spitzendruck von 700 bar und einer Tankkapazität von 33,99 kg ausgeführt. Der Hersteller gibt eine Reichweite des Busses von 550 km an.

Die Einsatzplanung der beiden Busse erfolgte unter Berücksichtigung eines breiten Last- bzw. Betriebsspektrums innerhalb des öffentlichen Netzes der Stadt Graz. Bei der Auslegung der Einsatzszenarien wurden verschiedene, den Realbetrieb der Fahrzeuge beeinflussende Parameter, wie zu erwartende durchschnittliche Fahrgastzahlen, Spitzenauslastungen, Fahrstrecke, Verkehrssituationen und die Topografie berücksichtigt. Als ein Ergebnis der Einsatzplanung wurden die folgenden Linien als Grundlage für Demonstrationsbetrieb ermittelt:

- Hyundai Elec City Fuel Cell: Linien 33, 41, 48, 65, 67, 39
- MAN Lion's City 12 E: Linien 33, 39, 34, 42

Der Hyundai-Bus war von April 2023 bis April 2024 im Linienverkehr im Einsatz, der MAN-Bus war von September 2023 bis April 2024 im Linieneinsatz. Der Zeitraum der ausgewerteten Fahrten erstreckte sich für den Hyundai-Bus von 01.08.2023 bis 29.02.2024 und für den MAN-Bus von 25.09.2023 bis 29.02.2024. Es ist anzumerken, dass die Fahrzeuge auch nach dem 29.02.2024 in Betrieb waren, allerdings auf Grund des Projektzeitplans die entsprechenden Daten nicht mehr in dem vorliegenden Bericht dargestellt sind.

Da der MAN-Bus ein Vorserien-/Prototypenfahrzeug und nicht am aktuellen Stand der Technik war (Hardware und Software), hatte das Fahrzeugmanagement System „ChargePoint“ nicht die vollumfänglichen Funktionen. Ein Umbau auf Serienzustand war im Zuge des Demonstrationsbetriebes bedauerlicherweise nicht möglich. Beim Hyundai-Bus konnten aufgrund technischer Probleme (CAN-Bus-Leitungen bzw. keine FMS-Schnittstelle europäischer Standard) keine Daten via "ChargePoint" erfasst werden. Aus diesem Grund erfolgte die Erfassung der Daten zum Teil per handschriftlichen Aufzeichnungen der Busfahrer:innen. Dazu wurde eine Vorlage erstellt, welche alle relevanten Parameter enthielt. Diese Vorlage wurde im Rahmen jeder Fahrt entsprechend ausgefüllt. Die Datenlisten wurden anschließend digitalisiert und ausgewertet. Folgende Daten wurden herangezogen:

- ID der Fahrerin oder des Fahrers
- Datum der Fahrt
- Buslinie
- Uhrzeit Abfahrt und Ankunft des Betriebs
- Tankinhalt Wasserstoff am Beginn und am Ende der Fahrt
- Ladezustand der Batterie am Beginn und am Ende der Fahrt
- Tankinhalt des Dieseltanks für die Zusatzheizung am Beginn und am Ende der Fahrt
- Umgebungstemperatur am Beginn und am Ende der Fahrt
- Gefahrene Kilometer

Die erfassten Daten wurden von Projektpartner TU Graz/FTG auf Basis vordefinierter Parameter ausgewertet und in Diagrammen dargestellt:

- Gefahrene Distanzen an den jeweiligen Einsatztagen und gemessener Durchschnittsverbrauch in kg Wasserstoff, bzw. kWh elektrischer Energie, umgerechnet auf eine Fahrdistanz von 100 km.
- Gefahrene Distanzen und entsprechende Wasserstoff- bzw. Energieverbräuche auf den jeweiligen Linien pro Tag.

Neben der Erfassung von relevanten Daten und Informationen erfolgte auch eine Beurteilung der praktischen Einsetzbarkeit der verschiedenen Technologien, sowie die Gewinnung von Informationen für den potenziellen zukünftigen Einsatz als Teil der Busflotte.

Die Erkenntnisse aus dem Realbetrieb des batterieelektrischen Busses zeigten, dass diese Antriebstechnologie eine sehr effiziente Energienutzung ermöglicht. Bei der Versorgung des Busses mit nachhaltig erzeugter elektrischer Energie ist eine wesentliche Senkung der Treibhausgasemissionen im Linienbetrieb möglich (siehe Arbeitspaket 2). Die Fahreigenschaften sind auf Grund der reduzierten Lärm- und Vibrationsentwicklung für Fahrer:innen sowie Nutzer:innen vorteilhaft. Mit einer entsprechenden Auslegung der Speicherkapazität des Batteriesystems und der Ladeinfrastruktur lassen sich die erforderlichen (täglichen) Fahrdistanzen im städtischen Linienbusverkehr gut bewältigen.

Der im Rahmen des Projekts zur Anwendung gekommene batterieelektrische Bus, bei dem es sich um ein Prototypenfahrzeug bzw. Vorserienfahrzeug handelte, wies Eigenschaften auf, welche bei der zukünftigen Auslegung einer städtischen Busflotte berücksichtigt werden sollten. Darunter fallen die Systemarchitektur, die Batterietechnologie oder die Bedienerfreundlichkeit. Des Weiteren sollte auch das Heiz- und Klimatisierungssystem batterieelektrisch angetrieben sein und dieses intelligent gesteuert werden, sodass der Verbrauch optimiert wird. Eine mit Diesel betriebene Zusatzheizung sollte jedenfalls vermieden werden. Es wird empfohlen, ein elektrisches Heizsystem zu erproben, oder falls nötig, das Zusatzheizsystem mit CO₂-neutralem Kraftstoff zu betreiben.

Zukünftige angeschaffte Busse sollten zudem so konfiguriert und Schnittstellen so definiert sein, dass sich automatisierte Datenauslesesysteme einbauen und auswerten lassen. Darüber hinaus sollten es sich bei den Bussen um ausgereifte Modelle handeln, um u.a. den Reparatur- und Wartungsaufwand so gering wie möglich zu halten.

Die Erkenntnisse aus dem Realbetrieb mit dem Wasserstoff-Brennstoffzellenbus zeigten, dass die eingesetzte Technologie bereits eine sehr gute Serienreife hat. Der Bus lief problemlos über die Testperiode und lieferte wichtige Messdaten und Erkenntnisse für die Auslegung zukünftiger Fahrzeugflotten. Der Energiebedarf des mit Wasserstoff betriebenen Busses beim Fahren ist auf Grund dessen, wie das Antriebssystem funktioniert, höher als beim elektrischen Bus. Allerdings benötigte das eingesetzte Modell keine (Diesel-) Zusatzheizung, was vorteilhaft für den Gesamtenergiebedarf und die Reduktion der Treibhausgasemissionen war.

Eine Herausforderung hinsichtlich eines reibungslosen Betriebs von Brennstoffzellenbussen ist die Bereitstellung des (grünen) Wasserstoffes, bzw. der Tankinfrastruktur. Hier ist es bei der Planung einer größeren Flotte wichtig, eine entsprechende Dimensionierung und Robustheit der Wasserstoff-Tankstellen sowie die Redundanz für eine bestimmte Anzahl an Tagen zu berücksichtigen.

Demonstrationsbetrieb On-Demand Flughafenshuttle

Mit dem Testbetrieb des emissionsfreien GRZ Shuttles am Flughafen Graz, wurden einerseits die Anreise mit den öffentlichen Verkehrsmitteln attraktiviert und andererseits die Bevölkerung hinsichtlich bedarfsabhängiger Systeme sensibilisiert, sowie die Akzeptanz für einen autonomen Betrieb erhoben. Zudem wurde ein innovatives automatisiertes Ladesystem das erste Mal im öffentlichen Raum getestet und die Entwicklung von diesem vorangetrieben. Vor Einführung eines bedarfsabhängigen Angebotes war es wichtig, die genauen Systemgrenzen zu definieren. Dazu wurden im ersten Schritt anonymisierte Mobilfunkdaten ausgewertet, auf deren Basis die Bedarfsprognose erstellt und folgende Rahmenbedingungen definiert wurden:

- Eingegrenztes Bediengebiet rund um den Flughafen Graz mit 6 definierten Haltepunkten
- Bedarfsabhängiges System ohne Fahrplan
- Rufen über die Website www.grz-shuttle.at

- Kostenloses Angebot für den Testzeitraum
- Zwei emissionsfreie Mercedes e-Vito Tourer lang - (9-Sitzer) zur Beförderung von 5 Personen und Gepäckstücken mit einer Systemleistung von 85 kW und einer Batteriekapazität von 41 kWh
- Betriebszeiten: MO-SO täglich von 04.30 – 20.00 Uhr

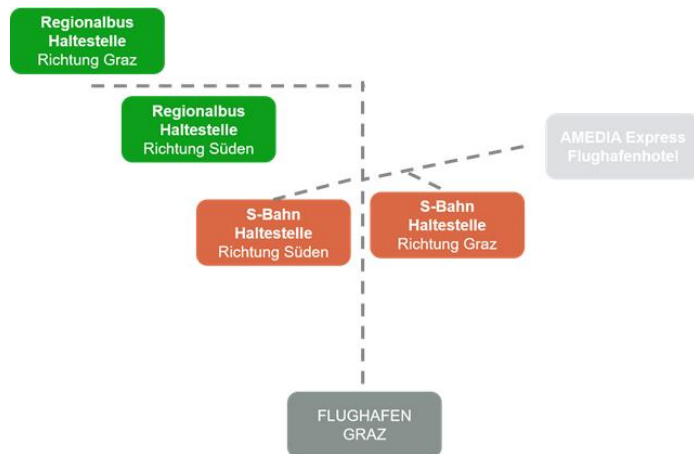


Abbildung 7 Routenverlauf GRZ Flughafenshuttle

In einem fünfmonatigen Testbetrieb wurde das GRZ Shuttle umfassend getestet, und wissenschaftliche Begleitforschung durchgeführt.

Für das Rufen des Shuttles wurde im Rahmen des Projektes ein Buchungssystem auf der Website www.grz-shuttle.at eingerichtet. Die Buchung erfolgte immer direkt bei Bedarf – d.h. Vorausbuchungen waren nicht möglich. Eine personalisierte App wurde in diesem Testbetrieb nicht verwendet, da sich Personen in der Regel nicht regelmäßig am Flughafen aufhalten und mit Verwendung einer personalisierten App die Eingangshürde für die Verwendung des Angebotes wesentlich erhöht werden würde. Das Rufsystem wurde so programmiert, dass Fahrten intelligent gebündelt werden und die beiden Fahrzeuge durch die eindeutige Identifizierung und die GPS-Position jeweils direkt angesprochen werden. Das Backend des Rufsystems ist in einer App realisiert, sodass die Handhabung für die Fahrer:innen sehr einfach und logisch ist.

Zum ersten Mal wurde in diesem Testbetrieb das konduktive, automatisierte Matrix Charging Ladesystem getestet. Im Boden verbaute Ladeplatten ermöglichen dem Fahrzeug ein automatisches Andocken des im Fahrzeug verbauten Ladearms, sobald das Fahrzeug über dem Ladepad geparkt wird. Das System funktionierte ausgesprochen gut und wurde von den Fahrer:innen als sehr angenehm und als großer Mehrwert empfunden. Auch die Witterungsverhältnisse (Hitze, Staub, Kieselsteine) hatten keinen Einfluss auf das Laden. Lediglich bei starkem Regen waren teilweise mehrere Verbindungsversuche notwendig.

Um das Angebot und die Entwicklungen präzise auf die Bedürfnisse der Nutzer:innen und Fahrer:innen abzustimmen, wurden im Rahmen des Testbetriebes unterschiedliche Befragungen durchgeführt (siehe Arbeitspaket 9). Im Rahmen der Nutzer:innenbefragungen wurde u.a. auch die Akzeptanz von autonomen On-Demand Shuttles erhoben. Die Auswertung zeigte, dass rund die Hälfte der Befragten definitiv autonome Busse bzw. Shuttles nutzen würden. Lediglich 7% der Befragten gaben an, definitiv

kein autonomes Angebot zu nutzen. Mehr als 66% der Männer und 67% der Frauen haben keine Bedenken bei der Nutzung von autonomen Shuttles. Bei der Frage, welche Art von Bedenken die Probanden gegenüber einem autonomen Bus haben, wurden Unfälle am öftesten gewählt, gefolgt von Arbeitslosigkeit der Busfahrer:innen und Hacker Angriffe sowie Vandalismus gegenüber dem unbeaufsichtigten Bus. Zusammenfassend bietet die Umstellung auf bedarfsorientierte öffentliche Verkehrsdienste mit Autonomen Fahrzeugen (AV) bedeutende Chancen. Obwohl diese Dienste den öffentlichen Verkehr insgesamt stärken, erfordern die komplexen Kostenabschätzungen und die Generierung von Einnahmen sorgfältige Überlegungen. Die Analyse hebt wichtige Kostenfaktoren hervor, einschließlich Wartung und Anschaffungskosten. Unsicherheiten bezüglich der Technologieentwicklung, rechtlicher Rahmenbedingungen, Marktkonditionen und externer Faktoren führen jedoch zu Variabilität und Risiken in den Kostenabschätzungsprozessen. Darüber hinaus zeigen Studien die Bedeutung lokaler Faktoren, Annahmen und Marktdynamiken bei der Entwicklung von Kostenmodellen. Trotz dieser Herausforderungen gibt es verschiedene Einnahmemöglichkeiten für AV-basierte öffentliche Verkehrsdienste, darunter Fahrgeldeinnahmen, Werbung, Partnerschaften mit Unternehmen und Institutionen, Datenmonetarisierung, Mehrwertdienste und staatliche Subventionen.

Zur optimalen Bewertung und Auswertung des Testbetriebes wurden vorab erforderliche Parameter definiert, sowie ein Konzept zur Datenerhebung und -auswertung erstellt. Auf Basis dessen wurden vom Projektpartner TU Graz CAN-Geräte in Kombination mit zusätzlicher Sensorik-Technologie verbaut und die Datenschnittstellen definiert und eingerichtet. Die Praxis zeigte die Bedeutung einer frühzeitigen Abstimmung mit Fahrzeugherstellern zur Definition der Datenschnittstellen. Nach dem Einbau der Systeme ist im nächsten Schritt eine umfassende Erprobung der Datenaufzeichnung und -auswertung anzuraten. Dafür empfiehlt sich, Leerfahrten auf den geplanten Strecken für eine testweise Aufzeichnung der Daten durchzuführen, um die Funktion des Systems sicherzustellen und die ausgewerteten Daten zu plausibilisieren und verifizieren. Zudem ist das frühzeitige bzw. kontinuierliche Evaluieren der erhaltenen Datensätze wichtig, um gegebenenfalls Verbesserungsmaßnahmen vornehmen zu können.

Im Laufe des Testbetriebs wurden folgende Daten direkt aus dem Fahrzeug ausgelesen: aktueller Kilometerstand, Fahrgeschwindigkeit, Motorleistung, Ladezustand der Batterie, Fahrzeugstandort (GPS) und die Innenraumtemperatur. Darüber hinaus wurden unter den Sitzflächen jedes Beifahrersitzes spezielle Drucksensoren angebracht, welche dokumentieren, ob der jeweilige Sitzplatz belegt ist oder nicht. Dadurch konnte die Anzahl der beförderten Fahrgäste erfasst werden. Im Kofferraum angebrachte Ultraschallsensoren ermöglichten es, die Belegung des Stauraums, d.h. die Anzahl der Gepäckstücke im Kofferraum, zu erheben. Die Aufzeichnung der Tagestemperaturen lieferte weitere Informationen zur Interpretation des Energieverbrauchs, z.B. des Antriebssystems und der Klimatisierung. Um die Auswirkung der Temperatur auf den Verbrauch bewerten zu können, wurde die Datenaufzeichnung in verschiedenen Monaten / zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt. Neben den Fahrzeugdaten konnten folgende Informationen aus dem Backend des Rufsystems ausgelesen werden: Anzahl Buchungen pro Tag, Anzahl Stornierungen pro Tag, Anzahl Fahrten pro Tag, Anzahl Fahrgäste pro Tag, Anzahl Gepäckstücke pro Tag, Verteilung der Abfahrts- und Zielhaltestellen, GPS-Positionen der Fahrzeuge, Fahrzeit pro Strecke, Wartezeit der Nutzer:innen zwischen Buchung und Abholung.

Im Rahmen des Testbetriebs wurden 998 Fahrgäste und 668 Gepäckstücke transportiert. Es ist zu erwähnen, dass alle Buchungsvorgänge problemlos verliefen, jedoch 222 Stornierungen stattfanden, die typischerweise kurz nach der Buchung auftraten. Gründe dafür sind wohl einerseits die Kostenlosigkeit des Angebotes und andererseits die teilweise Unklarheit, dass das Shuttle direkt bei Bedarf vor Ort und nicht im Vorhinein gerufen werden musste.

Die vom Hersteller angegebene Reichweite des Mercedes e-Vito Tourer lang beträgt 186 km. Aus den Daten wurden der Kraftstoff-/Energieverbrauch und die Emissionen, welche durch den Betrieb des elektrischen Shuttles zwischen dem 29. Juni 2022 und dem 31. August 2022 eingespart wurden, ermittelt und analysiert. Es ergaben sich Einsparungen in Vergleich zu einem Shuttle mit Verbrennungsmotor von 231,19 kg CO₂, 1,27 kg NO_x und 19,8 g Feinstaub. Aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten zeigte der elektrische Shuttle eine hohe Effizienz und erreichte einen minimalen Durchschnittsenergieverbrauch.

Arbeitspaket 7 – Autonomes Fahren von On-Demand Shuttles

Im Zuge der Nutzer:innenakzeptanz-Analyse und der wirtschaftlichen Bewertung wurde eine Literaturrecherche zum Thema On-Demand Shuttles und autonome Shuttles (AV) durchgeführt. Dabei wurde der Fokus auf rund 60 bestehende Projekte weltweit gelegt und die Vorteile und Probleme der derzeitigen Shuttle Projekte ermittelt. Des Weiteren wurden Begleiterhebungen der bestehenden Projekte herangezogen, um auf deren Basis eine umfassende Umfrage zum Thema On-Demand Shuttles und autonome Shuttles zu erstellen, mit dem Ziel, die Nutzer:innenakzeptanz dieser Art von Shuttles zu ermitteln. Die Erhebung wurde mithilfe eines Fragebogens in zwei Etappen an unterschiedlichen Standorten in Graz durchgeführt. Im Anschluss an die Erhebung wurde eine wirtschaftliche Bewertung eines autonomen Shuttles in Graz vorgenommen, um in Kombination mit den Ergebnissen der Befragung zu ermitteln, ob der Einsatz von autonomen Shuttles in Graz gesellschaftlich und wirtschaftlich sinnvoll sein kann. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass eine Umstellung auf bedarfsorientierte öffentliche Verkehrsdienste mit AV bedeutende Chancen bietet. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass - obwohl diese Dienste vielversprechend sind, um die Mobilität zu verbessern, Staus zu reduzieren, die Effizienz zu steigern und den öffentlichen Verkehr insgesamt zu stärken - die komplexen Kostenabschätzungen und die Strategien zur Generierung von Einnahmen sorgfältiger Überlegungen bedürfen. Die Analyse hebt wichtige Kostenfaktoren in Zusammenhang mit dem AV-basierten öffentlichen Verkehr hervor, einschließlich Wartung und Anschaffungskosten (Abschreibung). Unsicherheiten bezüglich der Technologieentwicklung, rechtlicher Rahmenbedingungen, Marktkonditionen und externer Faktoren führen zu heute noch schwierig einzuschätzenden Unsicherheiten und Risiken in den Kostenabschätzungsprozessen. Um die Unsicherheiten im Zusammenhang mit dem AV-basierten öffentlichen Verkehr zu bewältigen, sind die Zusammenarbeit mit Expert:innen aus verschiedenen Disziplinen, eine gründliche Szenarioanalyse und die kontinuierliche Überwachung von Markttrends unerlässlich. Durch die systematische Bewältigung dieser Herausforderungen und die effektive Nutzung von Einnahmefähigkeiten können Interessengruppen das Potenzial von bedarfsorientierten öffentlichen Verkehrsdiensten mit autonomen Fahrzeugen nutzen, um die urbane Mobilität zu transformieren und das gesamte Transportsystem zu verbessern.

Arbeitspaket 8 – Implementierungskonzept zur Dekarbonisierung von Busflotten

Simulation des optimalen Technologiemix als Ergebnis des Optimierungsmodells

Das in Rahmen von Arbeitspaket 3 entwickelte Optimierungsmodell wurde anhand realer Daten, insbesondere Routeninformationen aus der Demonstrationsphase und Verkehrsstörungsdaten, validiert. Dabei wurden Einzeltechnologien betrachtet, aber auch zwei Szenarien eines Technologie-Mix. Hier zeigten sich die Technologien OPC + Battery sowie Brennstoffzellen am zuverlässigsten. Auch die Technologien ONC sowie Mix + ONC zeigten hohe Zuverlässigkeit, da die Ausfälle hierbei hauptsächlich durch hohe Verkehrsverzögerungen ausgelöst wurden und nur bei Rückfahrten ins Depot am Ende der Route auftraten. Kritischer waren die Ergebnisse der Technologien OPC + Supercaps sowie Mix + Supercaps. Hier traten Ausfälle auf manchen Linien auch bei reibungslosem Ablauf ohne Verkehrsverzögerungen und während der regulären Kursfahrten auf. Insbesondere kritisch zu sehen ist, dass auch Ausfälle auf Linien auftraten, die selbst keine Verspätung hatten, die jedoch durch die Verspätung auf anderen Linien nicht mehr ausreichend Lademöglichkeiten nutzen konnten. Die Ergebnisse zeigten, den hohen Einfluss, den die Verkehrsverzögerungsdaten auf die Wahrscheinlichkeit von kritischen Ladungsszenarien haben.

Implementierungskonzept („Leitfaden zur Dekarbonisierung von Busflotten“)

Um die gesamten Erfahrungen, Erkenntnisse und Projektergebnisse auch für andere Städte, Flottenbetreiber, Forschungsagenturen etc. zugänglich und verwertbar zu machen, wurde ein Leitfaden zur Dekarbonisierung von Busflotten erstellt. Hier sind sämtliche Ergebnisse zusammengefasst mit dem Ziel, ein klares, praxisorientiertes Entscheidungsunterstützungswerkzeug zu schaffen.

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 deren 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 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.

Der gesamte Leitfaden ist hier zum Download verfügbar: www.grazer-ea.at/move2zero-leitfaden/

On-Demand Services - Geschäftsmodellentwicklung für einen großflächigen Einsatz in Graz

Mit dem Testbetrieb des GRZ-Shuttles am Flughafen Graz wurde die Machbarkeit und Akzeptanz eines batterieelektrischen, bedarfsabhängigen Shuttles mit automatisiertem Ladesystem erhoben. Ziel dieses Testbetriebes war es den Einsatz am Flughafen Graz zu untersuchen, aber in weiterer Folge auch die Basis für mögliche andere Einsatzgebiete von On-Demand Systemen im Raum Graz zu schaffen. Dafür wurden im Zuge des Testbetriebes anonymisierte Mobilfunkdaten ausgewertet und analysiert und Gebiete und Nutzer:innengruppen erhoben, welche Potential für die Nutzung solcher Services bieten. Zusätzlich wurden zur Steigerung der Effizienz im Rahmen des „Masterplan Öffentlicher Verkehr“ nicht so gut nachgefragte Gebiete bzw. Linien erhoben, welche möglicherweise (teilweise) durch On-Demand Services ersetzt werden könnten. Daraus ergibt sich folgendes Ziel für bedarfsabhängige Services in Graz:

Erhebung des Potentials, bedarfsabhängige Services in das öffentliche Verkehrsangebot zu integrieren, für

1. Ersatz von nicht so gut nachgefragten Buslinien bzw. Randzeiten
2. Attraktivierung des öffentlichen Verkehrs und somit Steigerung der Nutzer:innenzahlen
3. Anbindung von aktuell noch nicht bzw. zu wenig mit öffentlichem Verkehrsangebot bedienten Gebieten (in der Innenstadt sowie Umlandgebiete)

Im Rahmen der Angebotsdefinition eines On-Demand Services ist es wichtig, sämtliche Stakeholder miteinzubeziehen, auf vergangenen Projektergebnissen aufzubauen, sowie mit parallelen Projekten in diesem Bereich zu kooperieren. Da es in Graz aktuell von unterschiedlichen Stakeholdern Bestrebungen dahingehend gibt, war es wichtig, all diese zu bündeln und zu verknüpfen. Nachfolgend eine grobe Darstellung der wesentlichen Schritte – grün markiert die Teile, die im Rahmen des Leitprojektes move2zero adressiert wurden.



Für diese Themen wurden im ersten Schritt alle bestehenden Überlegungen, Erkenntnisse und Ergebnisse konsolidiert. Anschließend wurden auf dieser Basis in regelmäßigen Abstimmungen mit Holding Graz, TU Graz und Stadt Graz die technischen und organisatorischen Details definiert. Weiters wurden alle Kostenpositionen je Kategorie erhoben, sowie sämtliche noch offene Fragestellungen evaluiert.

Arbeitspakete 9 und 10 – Information, Bewusstseinsbildung und Öffentlichkeitsarbeit

Begleitend zu den Demonstrationsphasen wurden Maßnahmen zur Bürger:innenbeteiligung und –information entwickelt und durchgeführt. Einerseits sollte damit möglichen Ängsten und Unsicherheiten in Bezug auf neue Technologien entgegengewirkt werden, andererseits allgemein mehr Bewusstsein für das Thema Klima- und Umweltschutz geschaffen werden. Im Projekt waren sowohl emissionsfreie Busse als auch ein bedarfsabhängiges E-Shuttle im Einsatz. Daraus ergeben sich verschiedene Mobilitätsangebote, auf die in der Kommunikation und Bewusstseinsbildung eingegangen wurde. Wichtiger Bestandteil war die Stakeholderanalyse zu Beginn. Als Stakeholder wurden 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 werden, angesehen. Unterteilt wurden die Stakeholder in externe und interne Stakeholder. Vor allem die Einbindung interner Stakeholder war unerlässlich für den Projekterfolg.

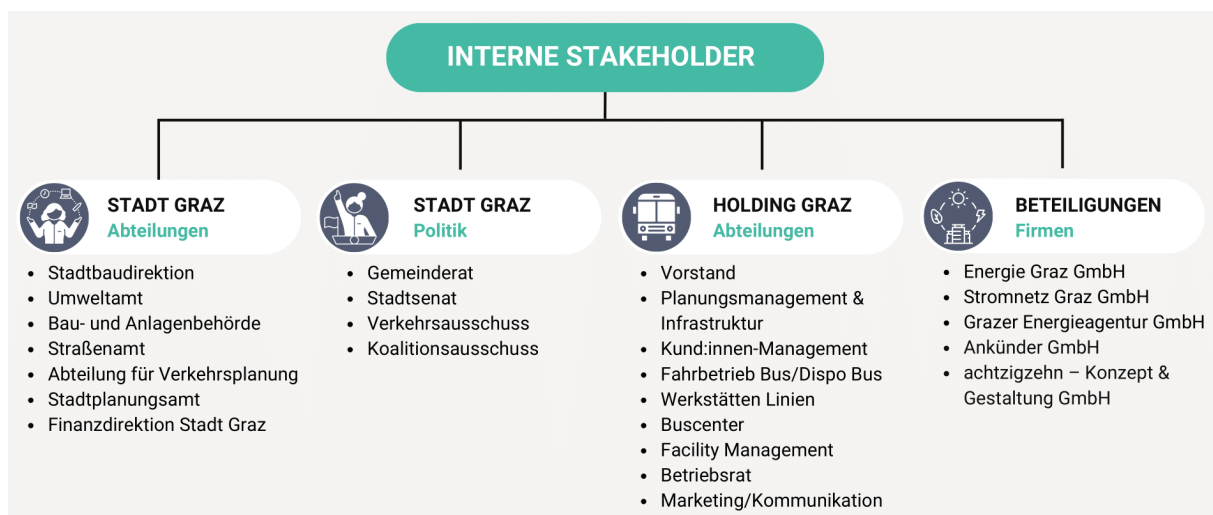


Abbildung 8 Ausgewählte interne Stakeholder

Um die Stakeholder optimal einzubinden, wurden eigene Kommunikations- und Bewusstseinsbildungsstrategien für die einzelnen Technologien erarbeitet und verschiedenen Methoden der Einbindung evaluiert und angewendet. Nachfolgend eine Übersicht zentraler Methoden zur Einbindung interner und externer Stakeholder.

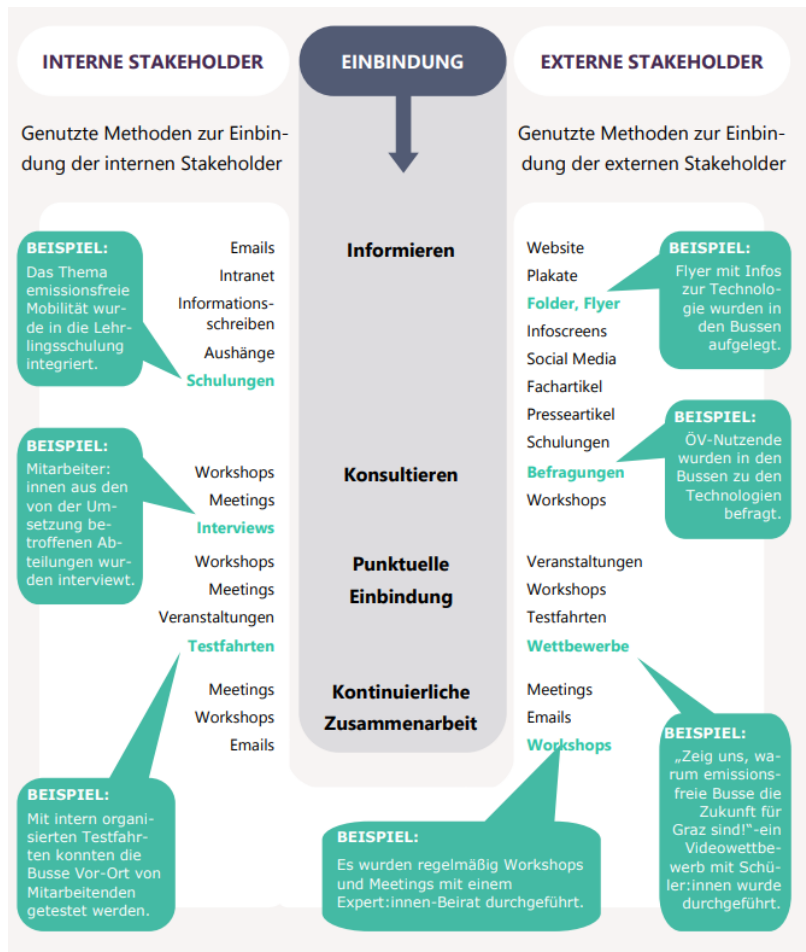


Abbildung 9 Angewandte Methoden zur Bewusstseinsbildung und Kommunikation

Vor allem die direkten Befragungen in den emissionsfreien Bussen und im On-Demand Shuttle konnten sehr wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Motivation und in weiterer Folge der zukünftigen Angebotsgestaltung bringen. Auf Basis der Erkenntnisse aus den Befragungen konnten anschließend zielgerichtet Bewusstseinsbildung und Information durchgeführt werden.

Ein weiteres Highlight, welches für sehr viel positives Feedback gesorgt hat, war das „Bankerlsitzen mit Mobilitätsexpert:innen“. Hier hatten Bürger:innen im Rahmen der europäischen Mobilitätswoche die Möglichkeit, jegliche Fragen direkt und ohne Barriere an Expert:innen (u.a. Vizebürgermeisterin Judith Schwentner und Vorstandsdirektor der Holding Graz Linien Mark Perz) zu stellen.

Mit der Durchführung eines Videowettbewerbes in Schulen und Berufsschulen zum Thema „„Zeig uns, warum emissionsfreie Busse die Zukunft für Graz sind!““ wurde auch die junge Generation aktiv in das Thema Dekarbonisierung von Bussen miteinbezogen.

Neben Aktivitäten zur Bewusstseinsbildung und Information wurden im Zuge des Projekts sämtliche Öffentlichkeitsaktivitäten zur Dissemination der (Teil-)Ergebnisse durchgeführt. Durch Projektpräsentationen auf nationalen und internationalen Fachkonferenzen, Presseartikeln und –events, Verbreitungsaktivitäten auf Social Media und anderen online Kanälen und über 10 wissenschaftlichen Publikationen (siehe Kapitel 8) wurde das Projekt immer wieder ins Licht der Öffentlichkeit gerückt. Im Jahr 2021 konnte zudem der VCÖ-Mobilitätspreis Österreich in der Kategorie “Energiewende und Elektrifizierung in der Mobilität” mit move2zero gewonnen werden!

Um sicherzustellen, dass die Projektergebnisse auch nach Projektende optimal genutzt und verwertet werden, wurde im gesamten Projektkonsortium ein Verwertungsplan mit Nutzungsmatrix erarbeitet.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Notwendigkeit zur Dekarbonisierung städtischer Bustransportsysteme 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. 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. Indem der öffentliche Nahverkehr auf emissionsfreie Technologien umgestellt wird, senden politische Entscheidungsträger:innen darüber hinaus 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.

Das Leitprojekt „move2zero“ zielte darauf ab, den gesamten öffentlichen Verkehr auf emissionsfreie Antriebe umzustellen und innovative bedarfsabhängige Services zur Attraktivierung des öffentlichen Verkehrs einzuführen. Die wesentlichen Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem Projekt sind nachfolgend dargestellt.

EMISSIONSFREIE BUSSE

- **Status Quo Analyse und Zieldefinition**
 Die erfolgreiche Einführung von Bussen mit alternativen Antriebssystemen hängt wesentlich von ihrer praxisorientierten Ausrichtung an die 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. An dieser Stelle ist es wichtig, ausreichend Zeit dafür einzuplanen und zuzulassen, einen Blick auf bereits lange bestehende Strukturen zu werfen und deren Standhaftigkeit zu hinterfragen.
- **Stakeholder Definition und Einbindung**
 Stakeholder sind alle Institutionen oder Personen im Umfeld, die von der Entscheidung zur Dekarbonisierung der Busflotte bzw. Einführung bedarfsabhängiger Services direkt oder indirekt betroffen oder anderweitig in den Prozess eingebunden sind. Eine Umstellung der Fahrzeugtechnologie betrifft sehr viele Unternehmensbereiche. Daher ist auch die Einbindung interner Stakeholder unerlässlich für den Projekterfolg. Um den Projekterfolg sicherzustellen, sollten interne und externe Stakeholder frühzeitig miteingebunden werden – dies lässt sich sehr gut durch regelmäßige Treffen bzw. Meetings durchführen. Besonders bei der Errichtung neuer Infrastruktur müssen Anrainer:innen frühzeitig einbezogen werden, um Widerständen entgegen wirken zu können.
- **Technologieentscheidung für emissionsfreie Busse**
 Bei der Entscheidung für die optimale emissionsfreie Bus-Technologie sollten alle relevanten Faktoren berücksichtigt werden. Die Auswahl der Technologie kann dabei unter verschiedenen Gesichtspunkten getroffen werden. Eine zentrale Zielgröße besteht darin, die Gesamtkosten des Systems zu minimieren. Die relevanten Systemkomponenten umfassen dabei Anschaffungs- und Betriebskosten von Infrastruktur, Fahrzeugen sowie Personal- und Energiekosten über den Lebenszyklus der Fahrzeuge hinweg, inkl. dem Ersatz der Fahrzeuge nach deren Nutzungsdauer. Diese Faktoren und die damit einhergehenden Zahlungsströme können mittels

einer Lebenszykluskostenrechnung (engl. Life Cycle Cost – LCC) erhoben werden. Alternativ zur Kostenbetrachtung können für ausgewählte Szenarien auch andere Faktoren, wie CO₂-Äquivalente oder kumulierter Energieeinsatz für die Gewichtung herangezogen werden. Kosten im Jahresmittel (um saisonale Schwankungen auszugleichen), CO₂-Emissionen und Energieverbrauch sollten dabei über einen geeigneten Zeitraum analysiert werden. Für diese komplexe Aufgabe ist es sinnvoll, unterstützende Modelle oder Tools wie z.B. das in move2zero entwickelte Optimierungsmodell heranzuziehen.

- **E-Ladeinfrastruktur**

Die Ladung der Energiespeicher am Bus kann auf unterschiedliche 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. U.a. relevante Entscheidungskriterien sind das Assessment des Busnetzes inklusive der Umsetzbarkeit dezentraler Ladeinfrastruktur im Busnetz sowie die Umsetzbarkeit der Energieversorgung. Neben der Auswahl der geeigneten E-Ladeinfrastruktur ist ein intelligentes und effizientes Lademanagementsystem ein zentraler Bestandteil im Betrieb von Batteriebussen. Dadurch soll sichergestellt sein, dass Ladeinfrastruktureffizienz und erneuerbare Stromverfügbarkeit optimal genutzt, Netzkapazitäten berücksichtigt und Platz eingespart werden.

- **H₂-Tankinfrastruktur**

Stellt sich heraus, dass im optimalen Technologie(mix) Brennstoffzellenbusse vorkommen und eine eigene Betankungs- und evtl. Erzeugungsanlage errichtet werden muss, ist es gleich zu Beginn wichtig zu überlegen, ob die Wasserstofftankstelle 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. 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 Ausfallsicherheit zu erhöhen. 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.

- **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. Hier gilt es sich umfassend mit der aktuellen Förderlandschaft auseinanderzusetzen bzw. entsprechende externe Expert:innen heranzuziehen.

- **Wirtschaftliche Überlegungen**

Aufgrund des labilen Strommarktes und schwankender Strom- und Wasserstoffpreise sind Wirtschaftlichkeitsrechnungen eine Herausforderung. Hierbei ist es wichtig, die kurz- und langfristigen Auswirkungen unterschiedlicher Parameter auf die Kosten zu betrachten und Sensitivitätsanalysen durchzuführen.

- **Beschaffung und Verfügbarkeit**

Die Beschaffung von emissionsfreien Bussen kann aufgrund von begrenzter Verfügbarkeit und Produktionskapazitäten Probleme bereiten oder mit Verzögerungen einhergehen. Direkte Gespräche mit Herstellern sowie Austausch mit anderen Städten und Flottenbetreibern kann hierbei einen großen Mehrwert bringen. Auch die Beschaffung und vor allem die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff ist eine Herausforderung, welche frühzeitig behandelt werden muss.

- **Betriebliche Anpassungen**

Die Umstellung auf emissionsfreie Busse erfordert einige betriebliche Anpassungen wie z. B. Errichtung bzw. Anpassung der Werkstätten, Errichtung von Havarieflächen für emissionsfreie Busse, Errichtung der Lade- (und/oder Tank-) -infrastruktur, Errichtung bzw. Anpassung von Abstellanlagen. Ob dies am bestehenden Busdepot ausgeführt werden kann, ist oftmals eine Kapazitäten-Frage. Darüber hinaus ist es jedoch noch wichtig sicherzustellen, den laufenden Busbetrieb auch während der Umbauarbeiten uneingeschränkt aufrecht erhalten zu können.

- **Technologieentwicklung**

Die Technologie für emissionsfreie Busse entwickelt sich kontinuierlich weiter. Markterkundungen sowie laufender Kontakt mit Herstellern und anderen Städten bzw. Flottenbetreibern ist wichtig, um die neuesten Innovationen zu kennen und ggf. in die Flotte integrieren zu können.

- **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 Konsenses, um die notwendigen Budgetmittel zeitgerecht aufzustellen.

- **Klimawirkungen**

Dem öffentlichen Verkehr kommt in Bezug auf das Erreichen der Klimaziele eine wesentliche Bedeutung und damit enormes Potential zu. Die Busse fahren lokal vollständig emissionsfrei und können daher die städtischen CO₂ Emissionen senken.

Im Rahmen des Projekts war die Betrachtung, sich nur auf die lokalen bzw. direkten Emissionen zu beschränken jedoch nicht ausreichend, da im Betrieb von Batterieelektrischen- und Brennstoffzellen-Bussen selbst keinerlei Verbrennungsemissionen anfallen. Für einen fundierten Vergleich unterschiedlicher Antriebstechnologien wurde deshalb eine Lebenszyklusanalyse (LCA) durchgeführt, die auch die bei der Herstellung, Wartung und Entsorgung der Busse sowie bei der Bereitstellung der Antriebsenergie anfallenden THG-Emissionen betrachtet. Werden die gesamten Lebenszyklusemissionen eines 12m Busses berechnet, zeigen sich bei einer angenommenen Nutzungsdauer von 10 Jahren deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Antriebssystemen. 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 mit Gelegenheitsladung und Brennstoffzellenbus) mit 80 bis 90 Tonnen sind recht ähnlich. Die Emissionen des batterieelektrischen Busses bei Depotladung liegen ~25% höher als die des batterieelektrischen Busses bei Gelegenheitsladung und jene des Brennstoffzellenbusses.

Die gesamten Projektergebnisse sind detailliert im „Leitfaden zur Dekarbonisierung von städtischen Busflotten“ zusammengefasst und hier verfügbar: www.grazer-ea.at/move2zero-leitfaden/

EMISSIONSFREIE, BEDARFSABHÄNGIGE SHUTTLES

- **Integration On-Demand Services in den öffentlichen Verkehr**

Durch den Einsatz von bedarfsabhängigen e-Shuttles kann das öffentliche Verkehrsangebot zum einen attraktiviert werden. Zum anderen können beispielsweise einzelne, wenig in Anspruch genommene Linienabschnitte bzw. Zeiten durch ein bedarfsabhängiges Shuttle-Service ersetzt werden und somit eine wesentliche Effizienzsteigerung erzielt werden. Gleichzeitig kann dadurch ein wichtiger Beitrag zur Sensibilisierung der Bevölkerung für emissionsfreie Mobilitätslösungen geleistet werden.

Wichtig ist jedenfalls, dass das Angebot gleich zu Beginn vollumfänglich und dauerhaft angeboten wird. Eine Erfahrung beim Testbetrieb am Flughafen Graz war, dass die Nutzer:innenzahlen aufgrund des beschränkten Angebotszeitraums und des damit einhergehenden mangelnden Wissens über das Angebot, nicht sehr hoch waren.

- **Automatisiertes Laden**

Zum ersten Mal wurde in diesem Testbetrieb das konduktive, automatisierte Matrix Charging Ladesystem getestet. Im Boden verbaute Ladeplatten ermöglichen dem Fahrzeug ein automatisches Andocken des im Fahrzeug verbauten Ladearms, sobald das Fahrzeug über dem Ladepad geparkt wird. Das System funktionierte im Rahmen des Testbetriebes am Flughafen Graz ausgesprochen gut und wurde von den Fahrer:innen als sehr angenehm und für einen großen Mehrwert empfunden. Auch die Witterungsverhältnisse (Hitze, Staub, Kieselsteine) hatten keinen Einfluss auf das Laden. Lediglich bei starkem Regen waren teilweise mehrere Verbindungsversuche notwendig.

- **Potential für autonomes Fahren von On-Demand Services**

Im Rahmen der Nutzer:innenbefragungen am Flughafen Graz wurde u.a. die Akzeptanz von autonomen On-Demand Shuttles erhoben. Die Auswertung zeigte, dass rund die Hälfte der Befragten definitiv autonome Busse bzw. Shuttles nutzen würden. Lediglich 7% der Befragten gaben an, definitiv kein autonomes Angebot zu nutzen. Mehr als 66% der Männer und 67% der Frauen haben keine Bedenken bei der Nutzung von autonomen Shuttles. Bei der Frage, welche Art von Bedenken die Probanden gegenüber einem autonomen Bus haben, wurden Unfälle am öftesten gewählt, gefolgt von Arbeitslosigkeit der Busfahrer:innen und Hacker Angriffe sowie Vandalismus gegenüber dem unbeaufsichtigten Bus.

Die Umstellung auf bedarfsorientierte öffentliche Verkehrsdienste mit Autonomen Fahrzeugen (AV) bringt jedenfalls bedeutende Chancen. Unsicherheiten bezüglich der Technologieentwicklung, rechtlicher Rahmenbedingungen, Marktkonditionen und externer Faktoren machen es jedoch zu einer Herausforderung, den Einsatz und die Kosten zu prognostizieren. Darüber hinaus zeigen Studien die Bedeutung lokaler Faktoren, Annahmen und Marktdynamiken bei der Entwicklung von Kostenmodellen. Um die Unsicherheiten im Zusammenhang mit dem AV-basierten öffentlichen Verkehr zu bewältigen, sind die Zusammenarbeit mit Experten aus verschiedenen Disziplinen, eine gründliche Szenarioanalyse und die kontinuierliche Überwachung von Markttrends unerlässlich.

Der gesamte Ergebnisbericht des Flughafenshuttles ist hier verfügbar: www.grazer-ea.at/move2zero-ondemandshuttle/

C) Projektdetails

6 Methodik

Nachfolgend sind unterschiedliche Forschungsansätze je nach thematischem Hintergrund dargestellt.

Projektmanagement

Im Rahmen des Projektmanagements wurden einerseits bewährte Projektmanagementmethoden wie z.B. regelmäßige Jour-Fix Meetings, Sharepoint zum effizienten Daten- und Dokumentaustausch, Risikomanagementpläne, Projektstrukturpläne etc. durchgeführt bzw. verwendet. Darüber hinaus wurden innovative Formate wie z.B. kreative Brainstormingworkshops und innovative Tools wie z.B. Canva verwendet.

Ökodesign

Alle Erstausrüster (OEMs), die zu Beginn des Projekts move2zero eine Absichtserklärung unterzeichnet haben, wurden aufgefordert, auf freiwilliger Basis relevante Dokumente und Informationen zu den Kriterien des Lastenheftes einzureichen. Zusätzlich und aufgrund des freiwilligen Charakters der Beantwortung des Kriterienkatalogs wurde eine Sekundärforschung mit Schwerpunkt auf Nachhaltigkeit in der Lieferkette und Umweltproduktdeklarationen durchgeführt, um zusätzliche Informationen zu sammeln. Auf Basis dieser Gespräche wurde dann ein Ökodesign-Teil im Lastenheft für die Ausschreibung definiert, wobei folgende Dokumente bzw. Zertifikate angefordert werden:

- Betriebliches Umweltmanagementsystem (Zertifizierung nach ISO 14001 oder E-MAS)
- Herstellerangaben (Umweltproduktdeklaration (EPD) nach ISO 14025:2006 oder Ökobilanz (LCA) nach ISO 14044:2006 und detaillierte Beschreibung des Materialeinsatzes und der Massenbilanz)
- Nachhaltige Materialbeschaffung in der Lieferkette (Liste der Unterlieferanten mit funktionierendem Umweltmanagementsystem, Anteil der Materialien und Komponenten von Lieferanten mit funktionierendem Umweltmanagementsystem und Initiativen zum nachhaltigen Abbau von Erzen in der gesamten Lieferkette)
- Verwendetes Kältemittel
- End-of-Life-Maßnahmen (Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit von Bauteilen gemäß ISO 22628:2002, Informationen zur Demontage der Hauptkomponenten, Liste der Kooperationen mit Recyclingunternehmen und Bestätigung, dass keine besonders besorgniserregenden Stoffe (SVHCs gemäß REACH-Verordnung) in einem Produkt/Bauteil enthalten sind)

Life Cycle Assessment

Ein Treibhausgasemissionsfaktor ist ein Koeffizient, der die Rate beschreibt, mit der eine bestimmte Tätigkeit, ein Prozess oder ein Material Treibhausgase in die Atmosphäre freisetzt, und der die sechs wichtigsten im Kyoto-Protokoll (UNFCCC 2008) definierten Treibhausgase abdeckt. Der kumulative Energiebedarf CED ist die Summe des Primärenergiebedarfs, der mit dem Lebenszyklus eines Produkts verbunden ist (d. h. Produktion, Herstellung, Verwendung und Entsorgung). Neben dem Energieeinsatz wird auch der Energiegehalt von Materialien berücksichtigt.

Die Berechnung der THG-Emissionen und des KEA aller Energie- und Materialprozesse basiert im Wesentlichen auf GEMIS (Global Emission Model for Integrated Systems) für die THG-Bilanzierung in Österreich. GEMIS ist ein Software-Tool, ein Modell und eine Datenbank, die für die Berechnung und den Vergleich von Klima- und anderen Umweltauswirkungen verschiedener Systeme und Prozesse in einer umfassenden und konsistenten Weise entwickelt wurde. Darüber hinaus wurden in dieser Studie Daten aus Ecoinvent, einer international anerkannten Datenbank für Lebenszyklusinventare und Umweltemissionen, sowie Daten aus dem US-amerikanischen GREET-Modell (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies) verwendet.

Technologieentscheidung

Optimierungsmodell: Um eine optimale Technologieauswahl für die zu beschaffenden Fahrzeuge zu treffen, ist eine umfassende Bewertung aller Technologie-Optionen inklusive strategischer und betrieblicher Überlegungen erforderlich. Diese komplexe Aufgabe lässt sich gut mit Methoden der mathematischen Optimierung, insbesondere der ganzzahligen linearen Programmierung (ILP), lösen. Im Rahmen des Projekts wurde daher ein Optimierungsmodell entwickelt, das die optimalen Technologien für die Flottenzusammensetzung eines gegebenen Busnetzwerks bestimmt und die dabei entstehenden Systemkosten minimiert. Einbezogen wurden die Auswahl und Dimensionierung von Ladestationen am Depot und entlang von Haltestellen im Busnetzwerk, die Dimensionierung der H₂-Infrastruktur, Umlauf- und Ladepläne der Fahrzeuge, sowie die sich daraus ergebende Flottengröße. Alternativ zur Kostenbetrachtung wurden in einer weiterführenden Untersuchung auch andere Faktoren, wie CO₂-Äquivalente oder der kumulierte Energieeinsatz zur Gewichtung herangezogen. Als Betrachtungszeitraum für die Evaluierung wurde der Zeitraum 2030 bis 2050 gewählt. Da bei einem Planungshorizont dieser Länge Unsicherheiten über zukünftige Entwicklungen unvermeidlich sind, wurden zukünftige Werte anhand von literaturbasierten Prognosen (unter Einbezug von Lernkurven, etc.) geschätzt. Um die Sensitivitäten kritischer Parameter zu berücksichtigen, wurde eine breite Szenarien-Analyse mit über 100 verschiedenen Szenarien durchgeführt. Dadurch konnten Unsicherheiten, die nur geringe Auswirkungen auf die Lösung hatten, bei Seite gelegt und relevante Kipp-Punkte von Input-Größen identifiziert werden. Um mit operativen Unsicherheiten umzugehen, wurde ein Simulationsmodell erstellt, das den Linienbetrieb der berechneten Optimallösung über einen Betriebstag nachbildet. Dies ermöglichte die Identifikation von Engpässen und die Prüfung der Stabilität der Umlaufpläne bei Betriebsstörungen.

Simulationsmodell: In diesem Task wurden die Informationen aus dem Optimierungsmodell in einer dynamischen Simulation verarbeitet und mit zusätzlichen Datenquellen (Verkehrsverzögerungsdaten, Fahrinformationen aus dem Demonstrationsbetrieb – WP 6) verknüpft. Um die Daten in der Simulation verarbeitbar zu machen, bzw. auch möglichst realitätsnah zu simulieren, wurden verschiedene Korrekturen und Annahmen eingebracht. Dies betrifft beispielsweise die Dauer der Halte- und Fahrzeit, die Konsistenz in der Bezeichnung der Haltestellen, Leerfahrten und die Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten und –zeiten.

Effizienzerhöhung H₂-Kompression

Für die Simulation der Kompressor-Technologien wurden die thermodynamischen Grundgleichungen, Massen- und Energiebilanzen sowie elektrochemische und mechanische Beziehungen in den Simulationsumgebungen Matlab (+SIMULINK) und ANSYS Fluent implementiert. Die erzielten Ergebnisse konnten für die Unterstützung der Auslegung eines mechanischen Kolbenkompressors im industriellen Maßstab und eines elektrochemischen Kompressors im Labormaßstab herangezogen werden. Mithilfe der CAD-Modellierungsumgebung CREO wurde der EHC-Prototyp und der dazugehörige Teststand

konstruiert. Nach der Beschaffung der notwendigen Komponenten und Messgeräte wurde der Prüfstand aufgebaut und adaptiert, die Regelung und Datenaufzeichnung implementiert, sowie Proof-of-Concept-Tests mit den Prototypen durchgeführt. Die auf Basis der Versuche definierten offenen Forschungsthemen werden in zukünftigen Projekten weiterführend behandelt. Mithilfe von Ergebnisdaten von umgesetzten H₂-Infrastrukturen konnte trotz fehlender Umsetzung des mechanischen Kompressor-Prototypen ein Vergleich zwischen den 2 Technologien gezogen werden, basierend auf Funktionsweise, Energiebedarf, Druckniveaus, Durchflussmenge, aktuellen Kosten und Betriebs-Einschränkungen.

Entscheidung und Konzeption E-Ladeinfrastruktur

Auf Basis der zuvor definierten Ladetechnologie und -leistungen wurde der Leistungsbedarf für die jeweiligen Planungsphasen (Demobetrieb und Endausbau) definiert. Abhängig von den potenziellen Standorten der Ladeinfrastruktur wurde dann mit Netzberechnungen und -simulationen die Umsetzbarkeit bei der bestehenden Netzsituation evaluiert und anhand der Ergebnisse die notwendigen Maßnahmen (Netzausbau) abgeleitet.

Auf Basis dieser Informationen sowie einer Markerkundung für Ladeinfrastruktur wurden Ausschreibungsunterlagen für die benötigten Ladestationen (inkl. Lademanagementsystem) erstellt und der Beschaffungsprozess gestartet.

Entscheidung und Konzeption H₂-Betankungsinfrastruktur

Basierend auf Literaturrecherchen, Erfahrungsaustausch mit Busflotten-, Tankstellen- und H₂-Trailerbetreibern im DACH-Raum, Behördengesprächen und einem zweiwöchigen Testbetrieb mit einem BZ-Solobus wurden die umfassenden Randbedingungen für die Konzeptionierung der H₂-Infrastruktur definiert. Diese umfassen Bedarfsanalysen inkl. Jahreszeitschwankungen, maximale Speichermengen aufgrund des aktuellen Rechtsrahmens, Versorgungssicherheiten sowie Anliefererszenarien und den entsprechenden Kostenrahmen. Die erstellten Konzepte für unterschiedliche H₂-Infrastrukturdesigns und Betriebsschemata wurden in mehreren Überarbeitungsschleifen mit allen Stakeholdern (Busbetreiber, Energieversorger, Architekturbüro, Gutachter, Behörden) verfeinert und schließlich in entsprechende Ausschreibungsunterlagen überführt. Zur Bewertung der Angebote der Tankinfrastruktur-Anbieter wurden umfassende Bewertungskataloge auf technischer und kaufmännischer Ebene erstellt.

Demonstrationsbetrieb e-Busse

Im Rahmen des Projektes wurden zwei emissionsfreie Busse im Rahmen eines Realbetrieb-Einsatzes erprobt und eine Liste an vordefinierten Parametern erfasst.

Folgende Parameter wurden erfasst:

- ID der Fahrerin oder des Fahrers
- Datum der Fahrt
- Buslinie
- Uhrzeit Abfahrt und Ankunft des Betriebs
- Tankinhalt Wasserstoff am Beginn und am Ende der Fahrt
- Ladezustand der Batterie am Beginn und am Ende der Fahrt
- Tankinhalt des Dieseltanks für die Zusatzheizung am Beginn und am Ende der Fahrt
- Umgebungstemperatur am Beginn und am Ende der Fahrt
- Gefahrene Kilometer

Die erfassten Daten wurden digitalisiert und bezüglich Plausibilität und Vollständigkeit überprüft. Anschließend erfolgten eine Auswertung, Verknüpfung und genaue Evaluierung und Analyse der Daten. Sämtliche Auswertungen wurden anschließend in Diagrammen, Grafiken und Listen dargestellt.

Zusätzlich erfolgte eine Dokumentation von auftretenden Ereignissen, Fehlern und Einflussgrößen, welche für die Interpretation der Ergebnisse von Relevanz sind. So wurden beispielsweise auftretende Fehlfunktionen der Fahrzeuge oder der Lade- bzw. Tankinfrastruktur dokumentiert.

On-Demand Shuttle – Bedarfserhebung

Zur Bedarfs- bzw. Potentialerhebung von bedarfsabhängigen Shuttles wurden anonymisierte Mobilfunkdaten analysiert und ausgewertet und Gebiete / Nutzer:innengruppen erhoben, welche Potential für die Nutzung solcher Services bieten. Im Rahmen der Konzeption des On-Demand Shuttles am Flughafen Graz wurden u.a. die Mobilfunkdaten zur Festlegung der Shuttle-Betriebszeiten herangezogen.

Bewusstseinsbildung und Öffentlichkeitsarbeit

Im Projekt waren sowohl emissionsfreie Busse, als auch ein bedarfsabhängiges E-Shuttle im Einsatz. Daraus ergeben sich verschiedene Mobilitätsangebote, auf die in der Kommunikation und Bewusstseinsbildung eingegangen werden soll.

Es wurden die Stakeholder analysiert, Strategien zur Bewusstseinsbildung/Kommunikation für die Technologien erstellt und die Art der Einbindung (Information, Konsultation, punktuelle Einbindung, kontinuierliche Zusammenarbeit) definiert.

Folgende Methoden zur Einbindung wurden angewendet:

- Vor Ort Info (Beschilderungen, Markierungen, Haltestellen, Screens)
- Drucksorten (Folder, Flyer, Plakate)
- Befragungen
- Ausstellungen
- Videos
- Workshops
- Veranstaltungen
- Meetings
- Interviews
- Social Media
- Websites
- Schulungen
- Infotage
- Aussendungen
- Pressearbeit

7 Arbeits- und Zeitplan

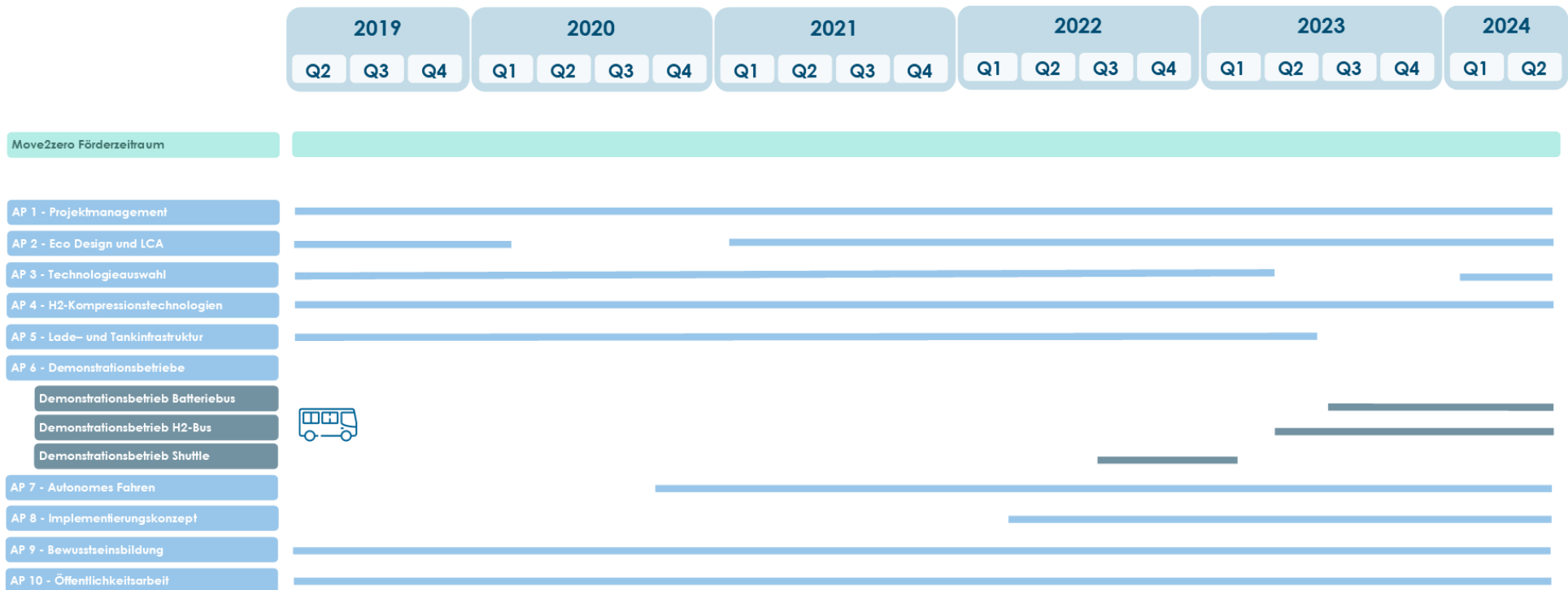


Abbildung 10 Zeitplan Arbeitspaketebene

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Im Rahmen des Projektes wurde eine kontinuierliche Dissemination der Ergebnisse gewährleistet. Diese umfasste eine Reihe von Maßnahmen, darunter Projektpräsentationen, gezielte Öffentlichkeitsarbeit, Online-Verbreitungsaktivitäten und die Veröffentlichung von wissenschaftlichen Papers. Insgesamt wurden etwa 50 Presseartikel veröffentlicht, die breit gestreut die Kernergebnisse des Projektes kommunizierten.

Die systematische Verbreitung des „Leitfadens zur Dekarbonisierung städtischer Busflotten“ erfolgt(e) primär durch strategische Vernetzung und gezielte Ansprache von Entscheidungsträger:innen in anderen Städten und Gemeinden, sowie durch Einbindung relevanter kommunalbezogener Verbände auf nationaler Ebene, wie beispielsweise dem Österreichischen Städtebund und dem Österreichischen Gemeindebund. Zudem spielten verschiedene Clusterorganisationen wie der Austrian Mobility Cluster und der Green Tech Cluster eine zentrale Rolle als Know-How-Transfer-Drehscheiben.

Um eine effektive Verbreitung und Nutzung der Projektergebnisse sicherzustellen, wurde zudem ein spezieller „Exploitation Plan“ entwickelt. Dieser Plan definierte detailliert die Strategien und Maßnahmen zur Verwertung der Projektergebnisse und zielte darauf ab, die Implementierung der im Leitfaden vorgeschlagenen Maßnahmen zu maximieren. Durch diese strukturierten Disseminationsaktivitäten soll das Projekt einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung des öffentlichen Verkehrs leisten.

Ausgewählte Projektpräsentationen auf größeren Konferenzen

- Urban Future Conference Oslo (2019)
- IONICA conference (2019)
- GSV-Forum Wien (2019)
- H₂-Cluster conference (2019)
- Mobility state price (2019)
- Energy Lunch of the Styrian Energy Agency (2020)
- Digital conference Procurement solutions (2020)
- Webinar „Grüner Wasserstoff“ (2020)
- Seminar ÖVG „Der Busverkehr der Zukunft“ (2021)
- Steiermarkschau (2021)
- Geco Festival Graz (2023)
- Falling Walls Lab Austria, Graz (2023)
- Falling Walls Lab Austria, Allpach (2023)
- Science Summit Berlin (2023)
- Styrian mobility week (2023)
- Mobility Forum Salzburg (2023)
- Symposium Energieinnovation Graz (2024)
- MotionExpo (2024)
- E3 Mobility Convention Innsbruck(2024)
- El Motion Wien (2024)
- 10. Grazer Nutzfahrzeuge Workshop (2024)
- European Hydrogen PhD Conference (2024)
- World Passenger Festival Wien (2024)

Wissenschaftliche Publikationen

- Move2zero - Full decarbonisation of the urban public transport bus system and integration of innovative on-demand services in the City of Graz, 27th I T S world Congress Hamburg (10.2024)

- Move2zero - Full decarbonisation of the urban public bus system and integration of innovative on-demand services in the City of Graz, 17. Symposium Energieinnovation (02.2022)
- Optimizing the technology split for an electric urban bus network, 17. Symposium Energieinnovation (02.2022)
- Decision-Support System for the Optimal Technology Split of a Decarbonized Bus Network, IEEE 45th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)(07,2021)
- Sustainable hydrogen society – Vision, findings and development of a hydrogen economy using the example of Austria, International Journal of Hydrogen Energy (12.2021)
- Investigation of favourable operating conditions for electrochemical hydrogen compressors by simulation, 2nd Renewable Hydrogen Energy Convention (05.2023)
- Planning a Zero-Emission Mixed-Fleet Public Bus System with Minimal Life Cycle Cost, Public Transport (11.2023)
- How to exploit the full potential of electrochemical hydrogen compressors - Investigation of favourable operating conditions by 3D CFD simulation and tests, International Journal of Hydrogen Energy (02.2024)
- EHC - Electrochemical Hydrogen Compression or Efficient Humidification Counts, European Hydrogen PhD Conference (03.2024)
- Master Class regarding stack development and electrochemical compressor results, World Electrolysis Congress (03.2024)
- Working title: Multi-Objective Optimization of a Public Bus System, Transportation Research Part D (04.2024)
- How to decarbonise an urban public transport system based on user needs and sustainable resources, Open Springer BMC (04.2024)

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechthinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.