

# Machbarkeitsstudie: Alternative Antriebe für Piccolonia Bus-Reisen

Abschlussbericht

22.11.2024

Philipp Sinhuber, Alexander Funke | eBusplan GmbH



|  |     |
|--|-----|
| ■ Executive Summary .....                        | 3   |
| ■ Ablauf der Machbarkeitsstudie .....            | 8   |
| ■ AP 1 Rahmen- und Betriebsdatenanalyse .....    | 22  |
| ■ AP 2 Technische und betriebliche Analyse ..... | 79  |
| ■ AP 3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....      | 126 |
| ■ AP 4 Umstellungsplanung .....                  | 157 |

# Executive Summary

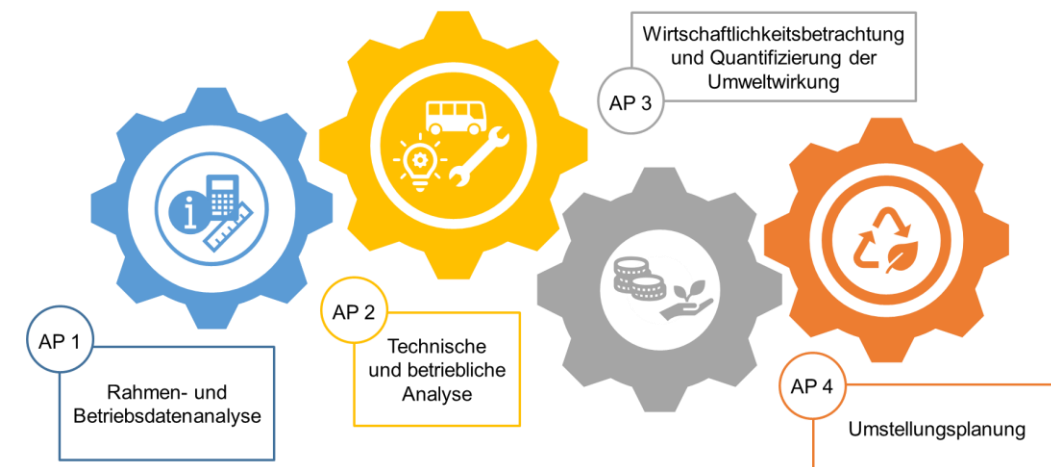
- Die vorliegende Machbarkeitsstudie untersucht und bewertet die Fahrleistungen der Piccolonia Bus-Reisen (nachfolgend „Piccolonia“) hinsichtlich einer Umstellung auf alternative Antriebe. Der Fokus liegt dabei auf Batterie- und Brennstoffzellenbussen. Ziel der Studie ist die Erarbeitung eines Konzeptes zur Umrüstung der Dieselflote der Piccolonia auf emissionsfreie Fahrzeuge mittels einer Machbarkeitsanalyse unter Verwendung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben.
- Grundlage der Studie sind die Betriebsdaten der Piccolonia, die im Rahmen der Studie aufbereitet und analysiert wurden. Zur Erfassung der örtlichen Situation wurde der Betriebshof anhand einer Betriebshofbegehung und der von der Piccolonia zur Verfügung gestellten Informationen analysiert.
- Um die am Markt verfügbaren bzw. von den Herstellern angekündigten Batterie- und Brennstoffzellenbusse in der Studie abzubilden, wurden für die betrachteten Technologien Referenzfahrzeuge definiert. Für die Batteriebusse wurden verschiedene Fahrzeugkonfigurationen mit Variationen der Batteriekapazitäten und des Heizkonzeptes definiert. Als Betriebskonzept wurde eine Depotladung mit Standardladegeräten angenommen. Für Brennstoffzellenbusse wurde eine maßgebliche Referenzfahrzeugkonfiguration angenommen. Die Betankung erfolgt an einer nahe gelegenen Wasserstofftankstelle.

- Für jede Fahrzeugkonfiguration wurden mittels energiebasierter Umlaufplanung – d.h. unter Berücksichtigung des durch Simulationen ermittelten Energieverbrauchs und der verfügbaren Batterie- bzw. Tankkapazität sowie der jeweils benötigten Lade- bzw. Tankphasen – der Fahrzeugbedarf (Fahrplanbedarf), die Leerkilometer, die Fahrerzeit und die bei Batteriebussen nötige Ladeinfrastruktur ermittelt. Die Verplanung der jeweils selben Nutzfahrleistung für Dieselsebuse diente dabei als Referenz für den Vergleich.
- Untersucht wurden verschiedene Varianten der Fahrleistungen aus dem Linienverkehr und dem Schüler- und Bäderverkehr der Piccolonia mit Ladung im Betriebshof oder Betankung an einer nahegelegenen H<sub>2</sub>-Tankstelle. Es wurde mit Solobussen und Kleinbussen geplant. Der Schüler- und Bäderverkehr wurde teilweise in Fahrten mit mehr oder weniger als 18 bzw. 25 Personen aufgeteilt, um einzelne Fahrten mit Kleinbussen durchführen zu können.
- Die Ergebnisse der Machbarkeitsanalyse zeigen, dass...
  - ... ein separates Fahren von Linienverkehr und Schüler- und Bäderverkehr zu einem Mehrbedarf von 1 bis 3 Fahrzeugen, je nach Fahrzeugkonfiguration und Antriebsart, gegenüber dem Dieselbetrieb führt (Variante 1).
  - ... eine Verschneidung aller Fahrleistungen, unabhängig von der Fahrzeugkonfiguration den Fahrzeugmehrbedarf gegenüber dem Dieselbetrieb auf 0 reduziert (Varianten 2 bis 4).
  - ... einzelne Fahrten, abhängig der Anzahl an Fahrgäste, ohne Fahrzeugmehrbedarf, auch mit Minibussen statt mit Solobussen erbracht werden können (Varianten 3 für Fahrten bis max. 25 Fahrgästen und Variante 4 mit max. 18 Fahrgästen).

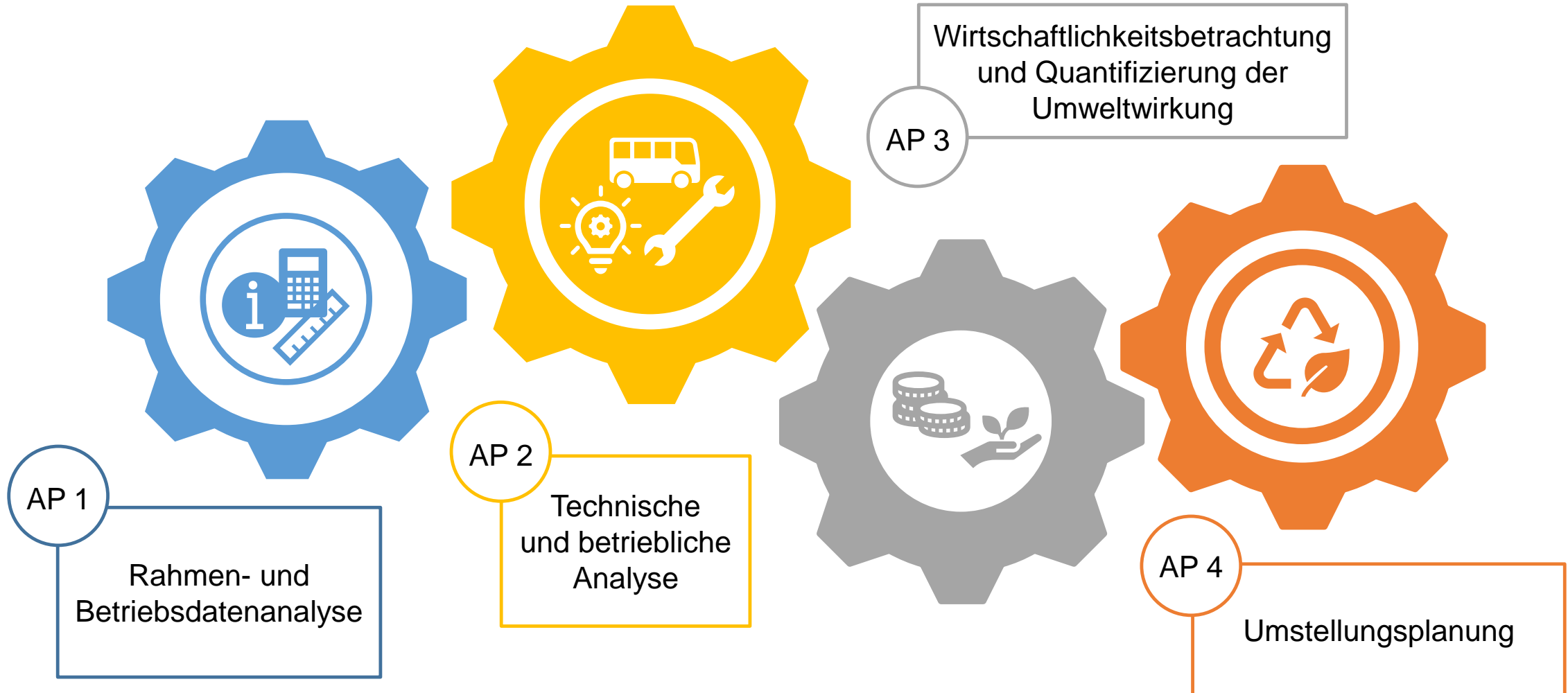
- Aufbauend auf den Ergebnissen des AP 2 wurden für alle Varianten eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Total Cost of Ownership, TCO) durchgeführt. Zudem wurden die Umweltauswirkungen in Form von Emissionen – CO<sub>2</sub>-Äquivalente, Stickoxide NO<sub>x</sub> und Feinstaub PM – quantifiziert.
- Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigen:
  - Der Einsatz von Batteriebussen verursacht jährliche Gesamtkosten von bis zu 2.429 T€ (Variante 1).
  - Durch die Kombination von Linienverkehr und Schüler- und Bäderverkehr können die jährlichen Gesamtkosten auf 1.787 bis 2.158 T€ reduziert werden (Varianten 2 bis 4, abhängig von der Fahrzeugkonfiguration).
  - Die Mehrkosten gegenüber dem Dieselbetrieb liegen zwischen 652 und 1.202 T€ und machen eine Förderung notwendig.
  - Der Einsatz von Brennstoffzellenbussen führt zu ca. 3-fach höheren jährlichen Gesamtkosten gegenüber dem Betrieb mit Dieselbussen – der Einsatz dieser Busse wird nicht weiter verfolgt. (Der Faktor beim Einsatz von Batteriebussen liegt bei ca. 1,57 bis 1,98). Die Unterschiede in den jährlichen Gesamtkosten der Fahrzeugkonfiguration (Batteriekapazität, Heizkonzept) sind in den Varianten 2 bis 4 maximal +7,7%. Im Hinblick auf die Flexibilität bei neuen Fahrleistungen / zukünftigen Fahrleistungsänderungen könnten sich die größeren Batteriekapazitäten rentieren.
- Die Quantifizierung der Umweltwirkungen zeigt:
  - Der Einsatz von Batteriebussen bei Betrieb mit klimaneutralem Strom ermöglicht eine deutliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von ca. 90 % gegenüber der Diesel-Referenz.

- Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Studien wurde im Arbeitspaket 4 eine Technologieempfehlung mit einem konkreten Betriebskonzept und Fahrzeugkonfigurationen abgeleitet. Anschließend wurde ein Umstellungskonzept für die Fahrzeugflotte und den Betriebshof hinsichtlich des Abstellens und des Aufbaus der Ladeinfrastruktur erarbeitet.
- Empfehlung für Solobusse: Busse mit ca. 575 kWh Batteriekapazität und elektrischer Heizung
  - Größere Batterien bieten höhere Reichweiten und damit mehr Möglichkeiten, in Zukunft zusätzliche Fahrleistungen zu übernehmen. Die elektrische Heizung verursacht die geringsten Emissionen. Die Gesamtkosten für beides sind um ca. 8 % höher als bei einer moderaten Batterie und Hybridheizung (Brennstoff-Zuheizer an kalten Tagen).
- Empfehlung für Minibusse: Busse mit ca. 115 kWh Batteriekapazität und Hybridheizung
  - Die Hybridheizung bietet eine größere Reichweite als eine elektrische Heizung. Sie bietet mehr Möglichkeiten, auch außerhalb des ÖPNV-Betriebs Fahrleistungen zu übernehmen.
- Die Depotladung mit mind. 4 Standardladegeräten und Steckerladung hat sich für den Betrieb als ausreichend erwiesen. Es wird dennoch empfohlen, für je 2 Busse ein Ladegerät zu installieren, um auf das Rangieren der Fahrzeuge vor und nach den Ladephasen verzichten zu können.
- Der derzeitige Netzanschluss lässt nur ein zusätzliches Standardladegerät zu, eine Ertüchtigung des Netzanschlusses ist somit erforderlich. Der Betriebshof bietet durch eine Umgestaltung Stellplatzpotential für 29 Solobusse und die dazugehörige Ladeinfrastruktur.

# Ablauf der Machbarkeitsstudie

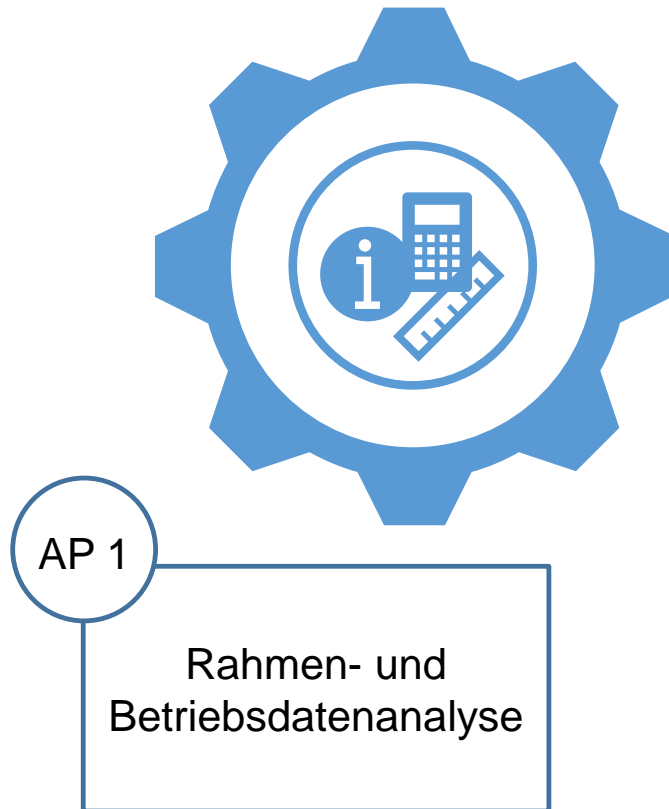






# Ablauf der Machbarkeitsstudie

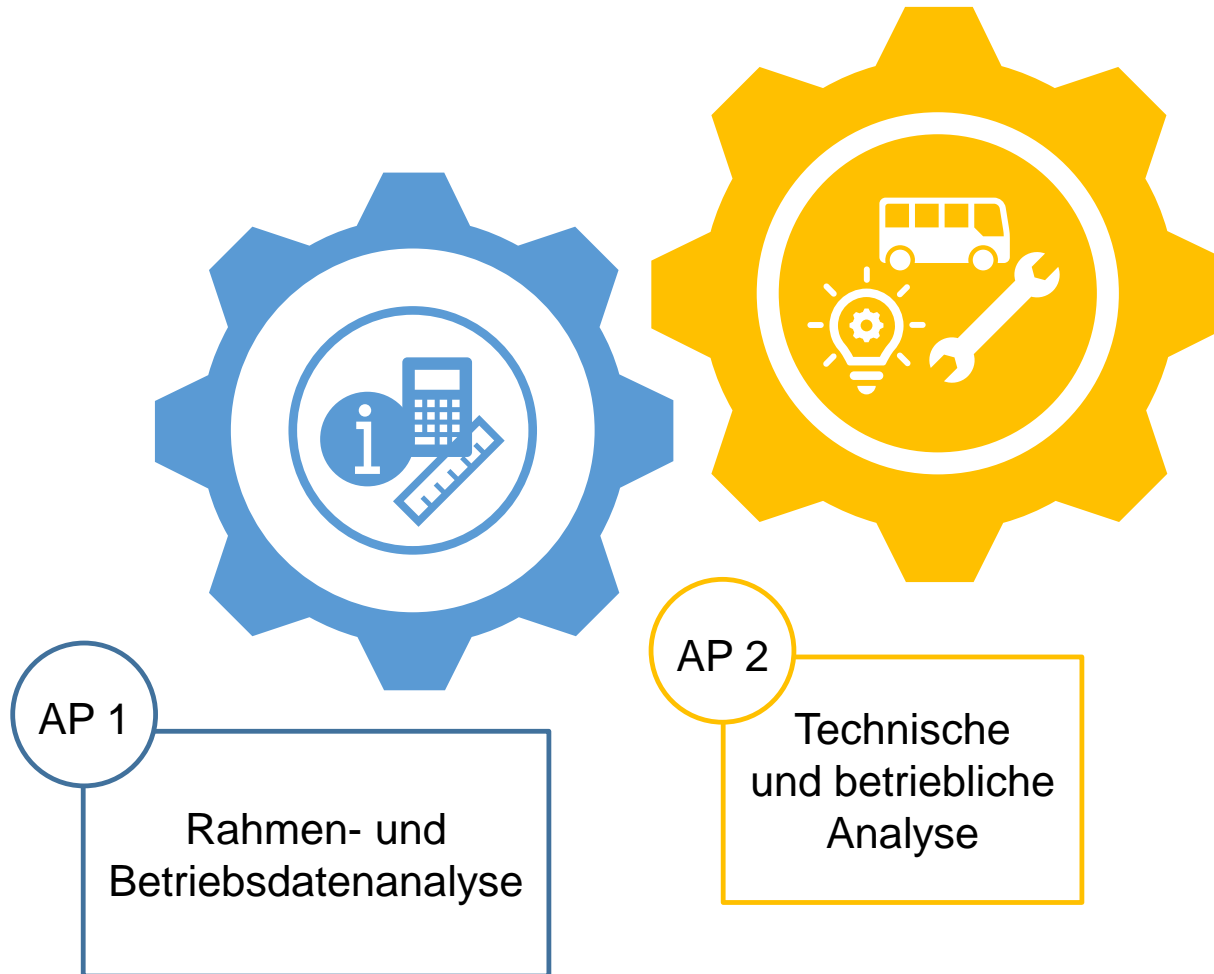
## AP 1 Rahmen- und Betriebsdatenanalyse



- Zusammentragen aller relevanten Informationen und Abbilden der lokalen Situation
  
- AP 1.1: Erfassung der Betriebsdaten und Abbilden der betrieblichen Situation
  - Betriebsdaten erfassen (Betriebsdaten aus Export und Excel-Dateien verarbeiten)
  - Fahrleistung auswählen
  
- AP 1.2: Erfassung der Anforderungen und Abstimmung der technischen Parameter
  - Abstimmung der Fahrzeugkonfigurationen
  
- AP 1.3: Erfassung der Infrastruktur-Situation (Betriebshof)
  - Bewertung des Betriebshofs hinsichtlich der Errichtung von Infrastruktur

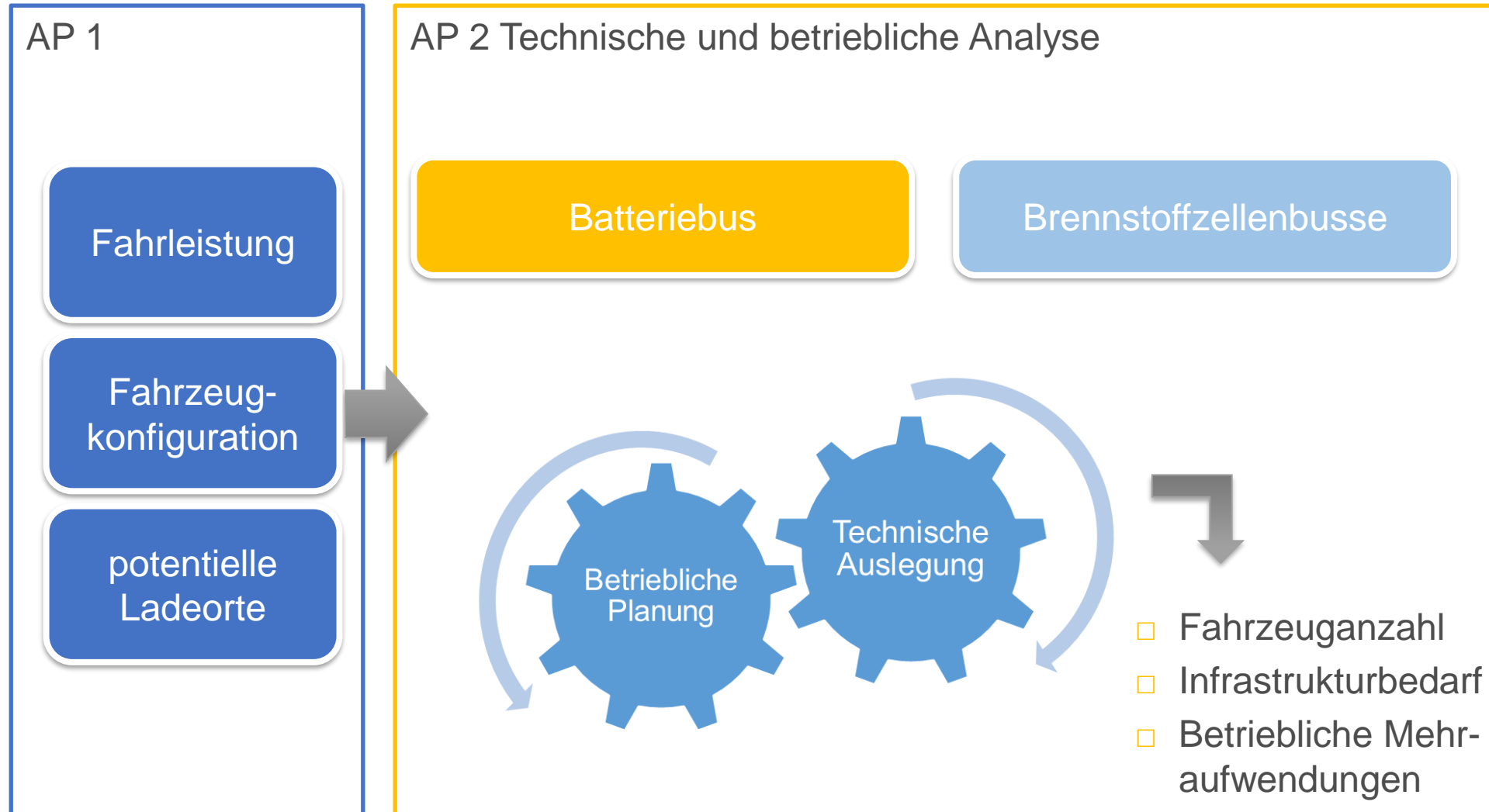
# Ablauf der Machbarkeitsstudie

## AP 2 Technische und betriebliche Analyse

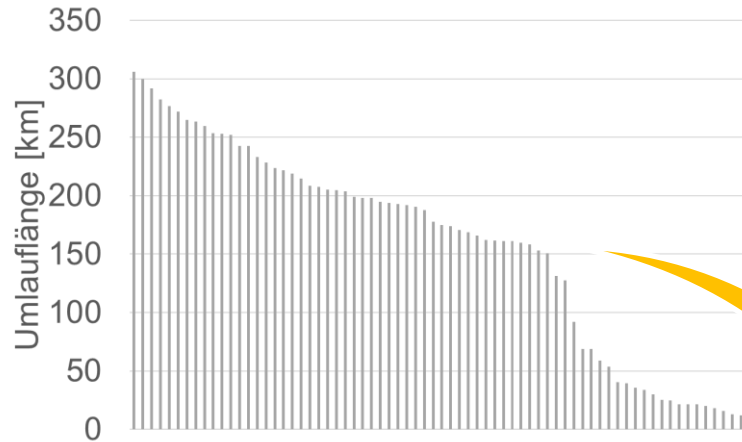


# Ablauf der Machbarkeitsstudie

## AP 2 Technische und betriebliche Analyse



## ■ Betriebliche Situation



## ■ Technische Rahmenbedingungen

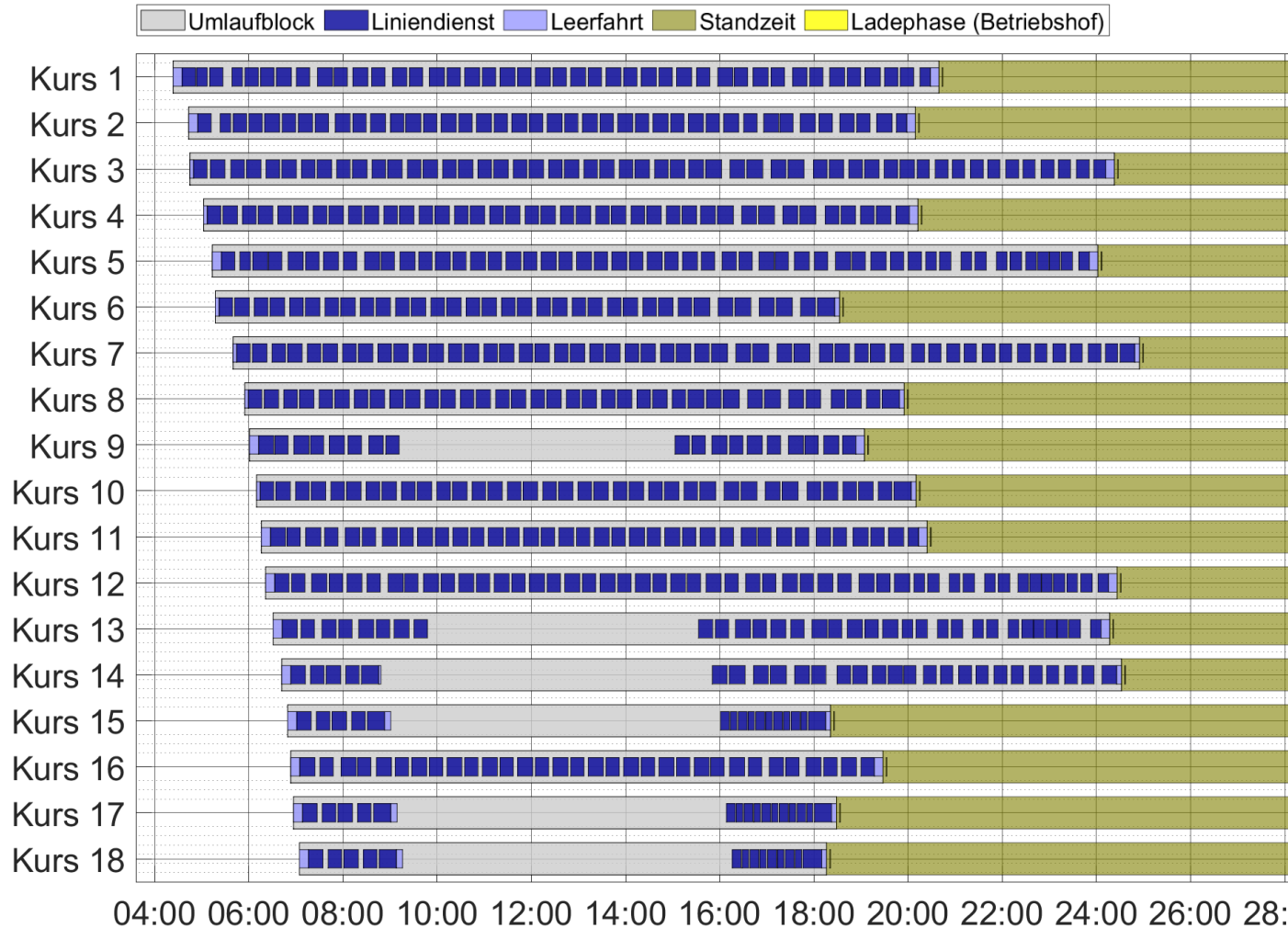


→ Referenzbustypen mit Worst Case Annahmen

Technische Machbarkeitsprüfung einer Elektrifizierung mit betrieblichen Anpassungen

# AP 2 Technische und betriebliche Analyse

## Beispielhafte betriebliche Anpassungen



### Referenz - Dieselseinsatz

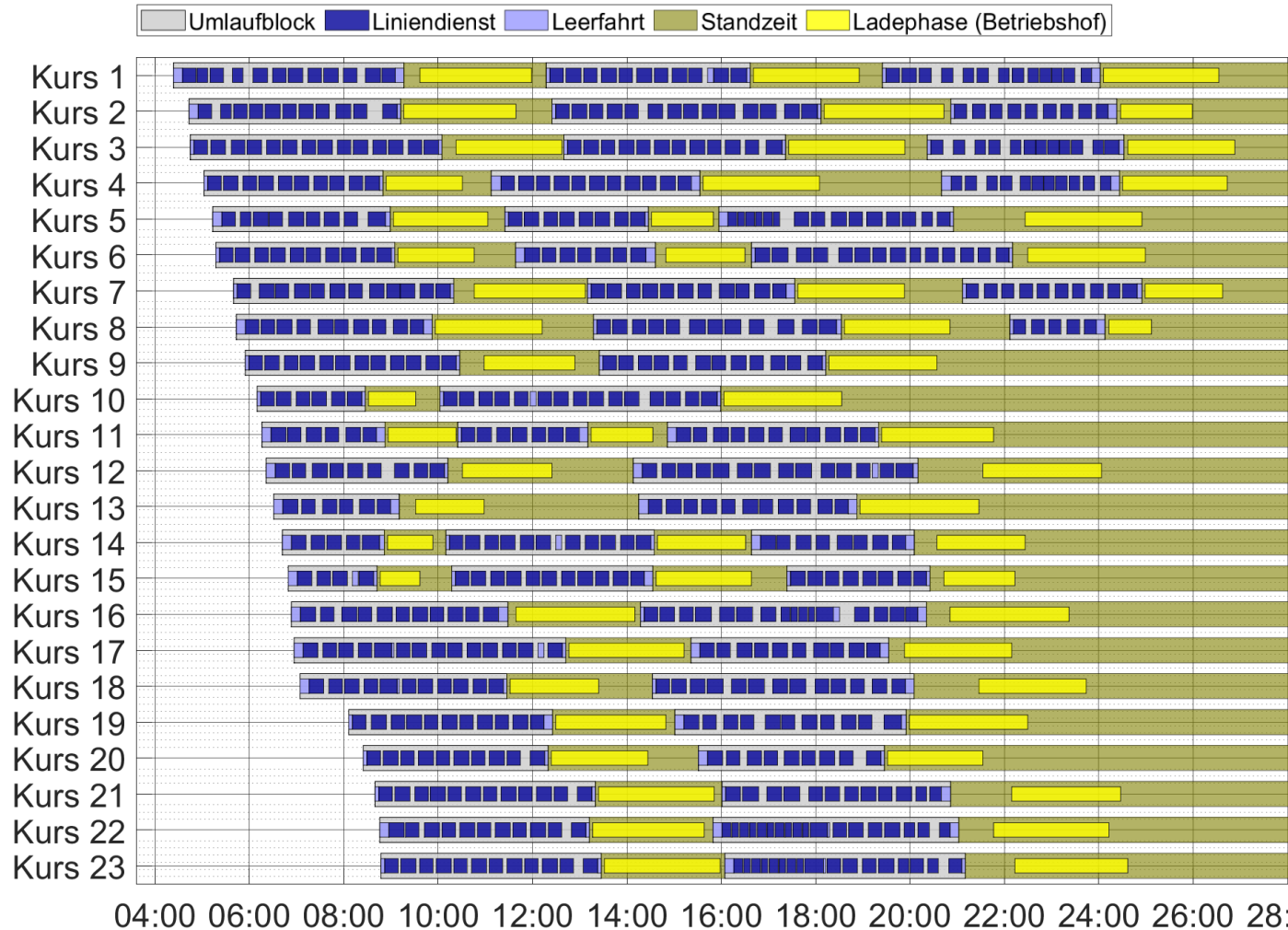
|                |        |
|----------------|--------|
| Fahrzeugbedarf | 18     |
| Leerkilometer  | 158 km |
| Einsatzdauer   | 235 h  |

- Einsatzkonzept der Dieselsebuse beschreibt die untere Grenze hinsichtlich der betrieblichen Kennzahlen

Beispiel  
(andere Stadt)

# AP 2 Technische und betriebliche Analyse

## Beispielhafte betriebliche Anpassungen



### Energiebasierte Umlaufplanung

|                |        |
|----------------|--------|
| Fahrzeugbedarf | 23     |
| Leerkilometer  | 424 km |
| Einsatzdauer   | 243 h  |

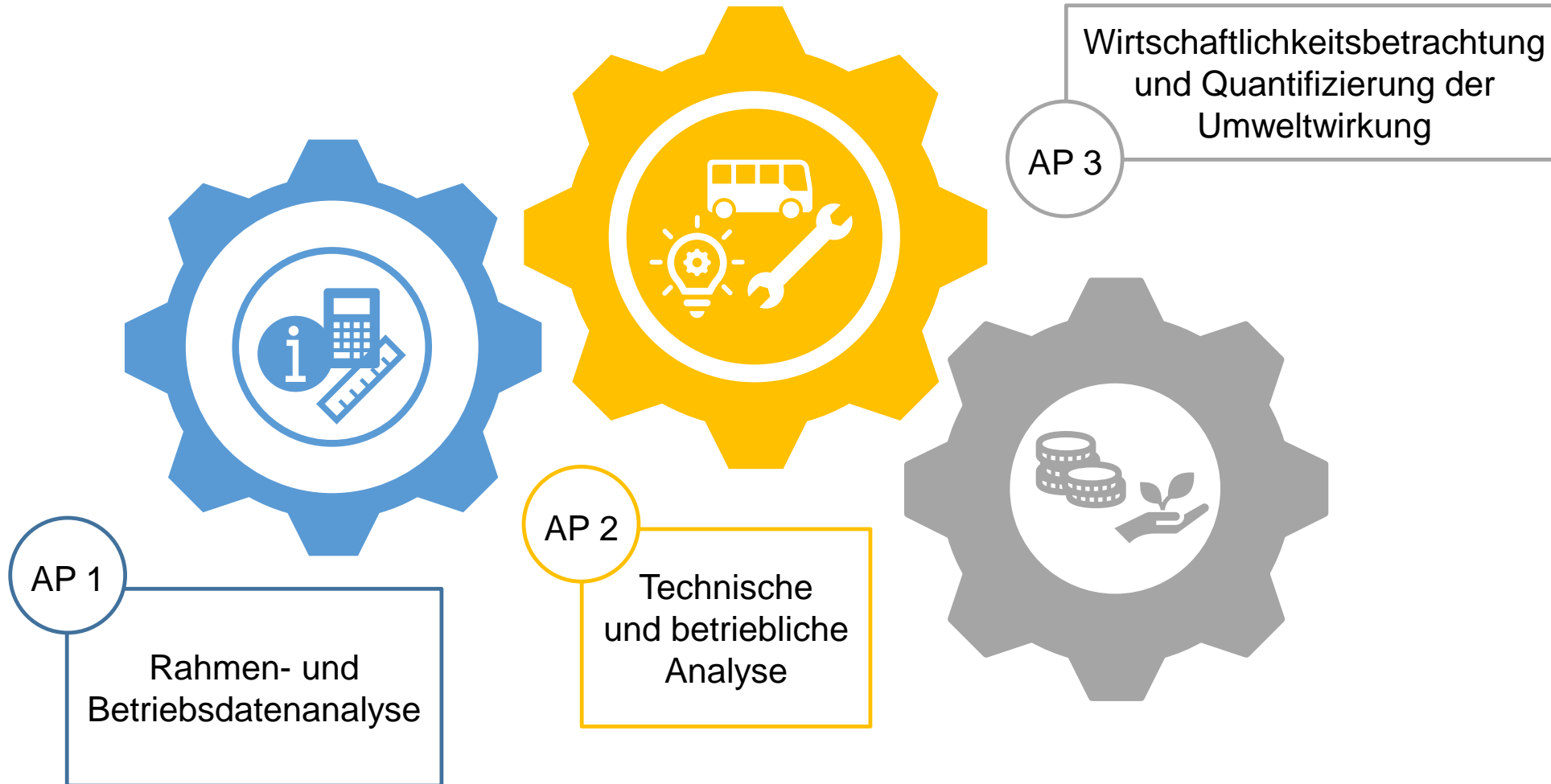
- Begrenzte Reichweite erfordert untertägige Nachladungen
- Integration der Nachladephasen in den Betrieb oftmals nur mit zusätzlichen Fahrzeugen möglich

Beispiel  
(andere Stadt)

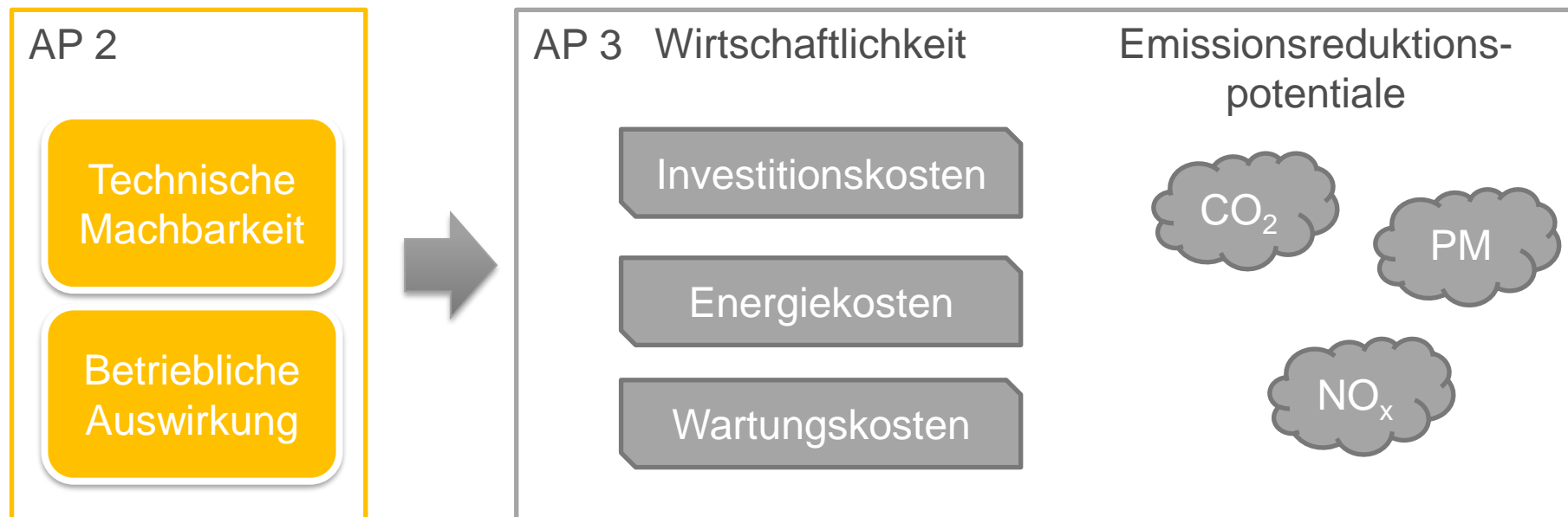


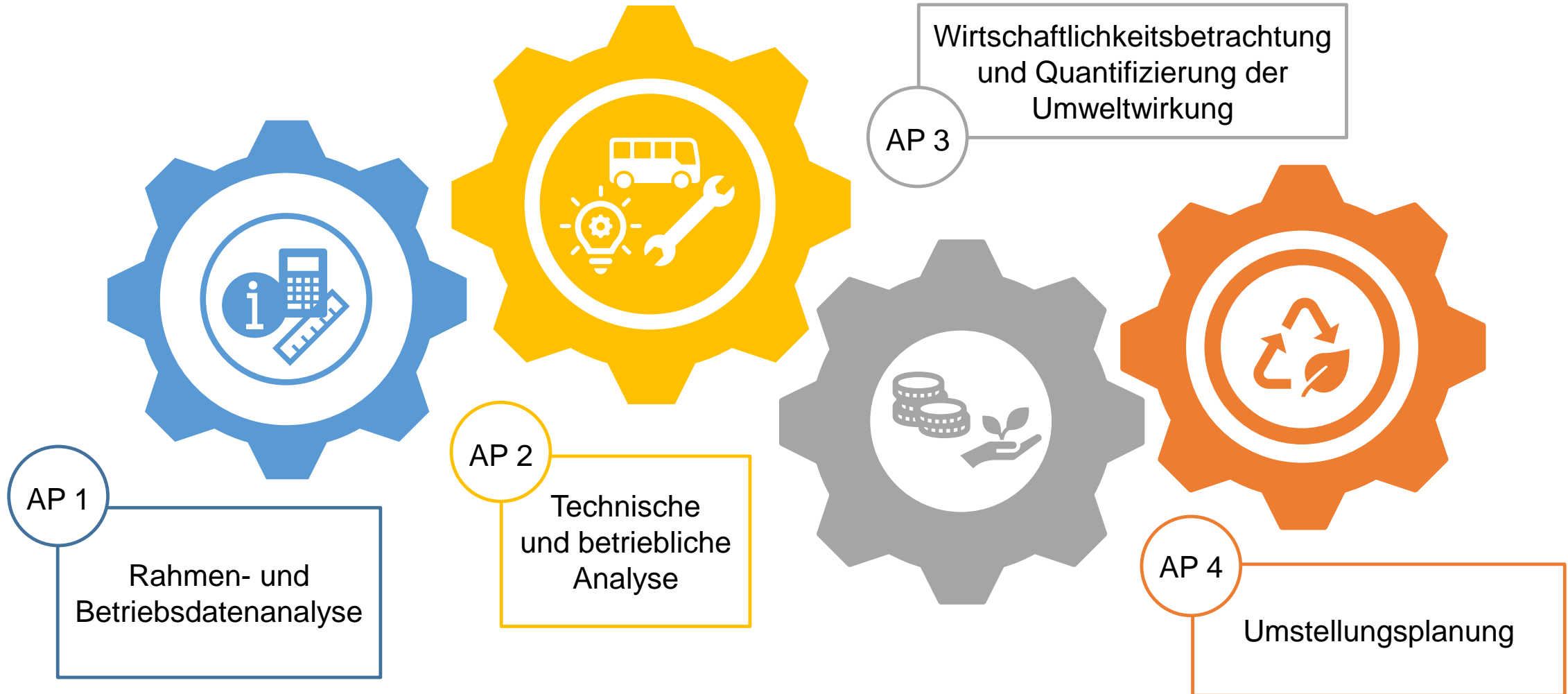
# Ablauf der Machbarkeitsstudie

## AP 3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Umweltauswirkungen

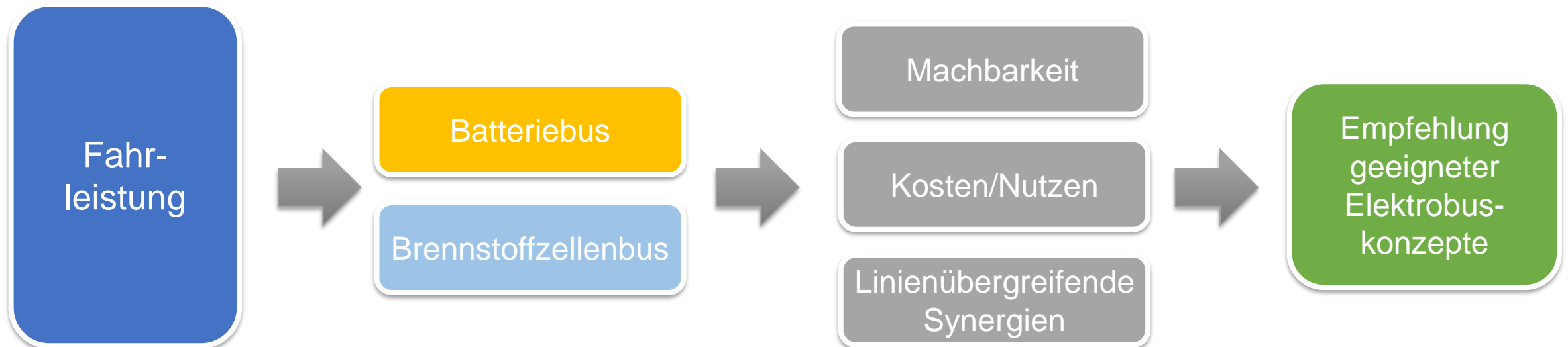


- Technische Machbarkeit und betriebliche Auswirkungen der Konzepte wurden in den vorherigen Arbeitspaketen ermittelt
- Auf dieser Basis erfolgt nun die Kostenrechnung und Emissionsbewertung (Kosten-Nutzen-Gegenüberstellung)

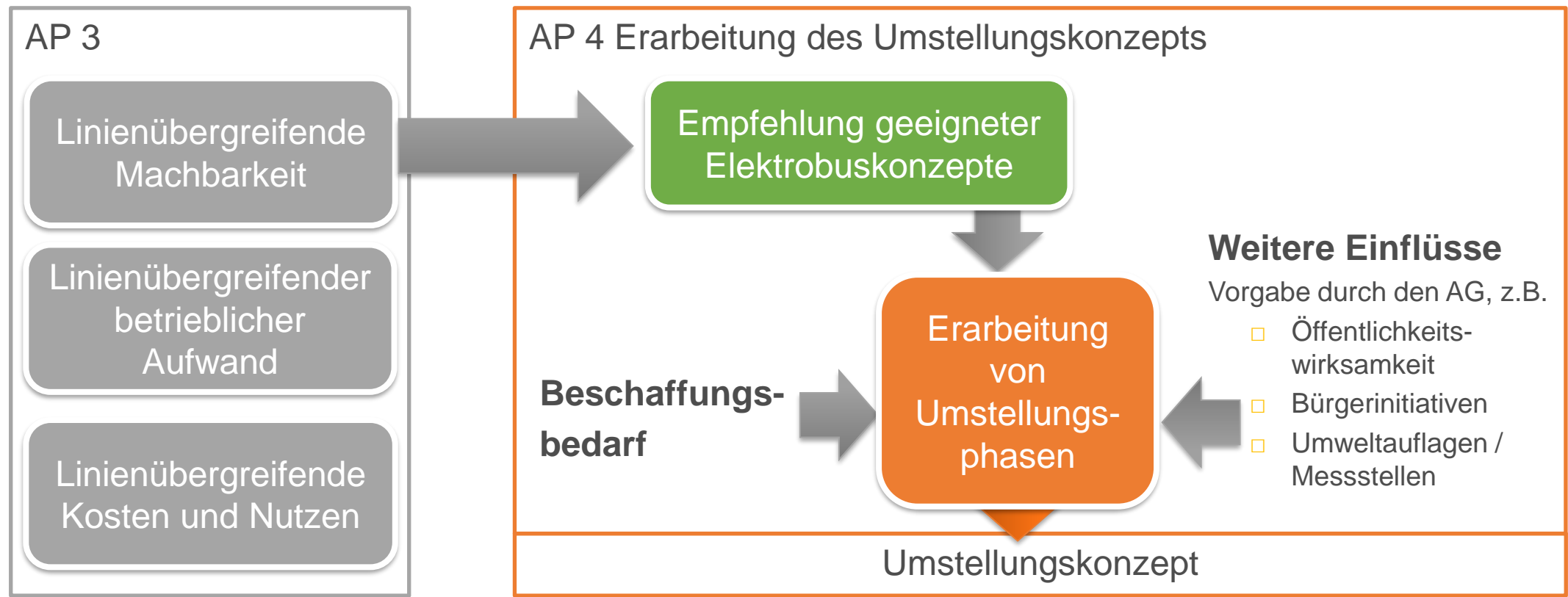




- Auswahl geeigneter Konzepte erfolgt auf Grundlage der technischen Machbarkeit, der betrieblichen Auswirkungen, der Emissionsreduktionspotentiale und der Kosten
- Weiterhin werden die aktuelle Marktsituation sowie erwartete zukünftige Entwicklungen einbezogen



- Ermittlung von Umstellungsphasen anhand des jährlichen Beschaffungsbedarfs im Rahmen der Umstellungsplanung



# AP 1 Rahmen- und Betriebsdatenanalyse





AP 1

Rahmen- und  
Betriebsdatenanalyse

- Im AP 1 erfolgte die Rahmen- und Betriebsdatenanalyse und die Festlegung der wesentlichen Parameter für die weitere Analyse. Der Fokus der Studie liegt auf Batterie- und Brennstoffzellenbussen, die entsprechend der Clean Vehicles Directive (CVD) als emissionsfreie Fahrzeuge definiert sind. Als Referenzfall wurde der EURO VI-Dieselbus festgelegt.
- Neben der Abstimmung der technischen Grundlagen war die Festlegung der betrieblichen Datenbasis von zentraler Bedeutung. Auf Basis von Betriebsdatenexport und Excel-Dateien wurden die Einsatzprofile der Fahrzeuge der Piccolonia identifiziert und ausgewertet. Zudem wurden lokale Randbedingungen für Ladeinfrastruktur diskutiert.
- Im Folgenden werden der Stand der Technik und die aktuelle Marktsituation bei Elektrobussen erläutert. Anschließend wird auf die wichtigsten Grundlagen und Parameter der Studie eingegangen.

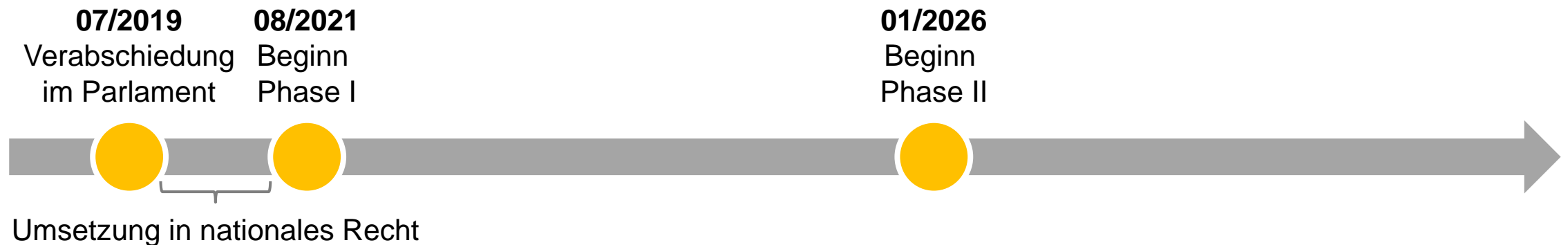
# AP 1 Rahmen- und Betriebsdatenanalyse

- Stand der Technik und Marktsituation
- Diskussion und Definition der Grundlage der Studie
- Mindestreserven
- Datengrundlage





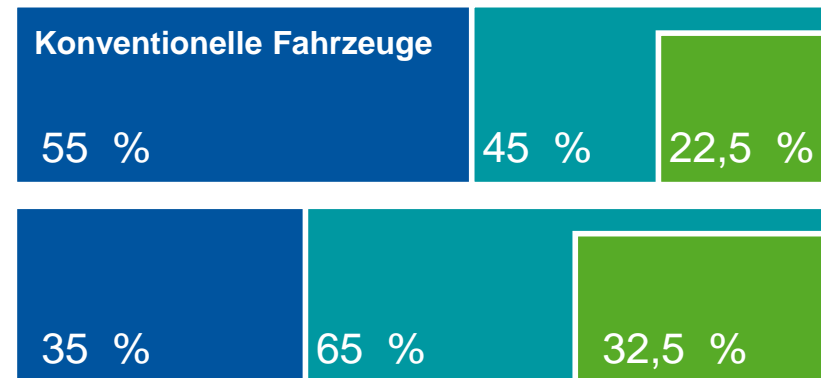
- Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge (Clean Vehicles Directive)
  - Berücksichtigung von Energie- und Umweltfaktoren im Rahmen von Beschaffungen
  - Ursprüngliche Fassung ohne verbindliche Quoten
- Grundlegende Überarbeitung Mitte 2019 mit der Richtlinie 2019/1161 EU
  - Einführung von Beschaffungsquoten für saubere und emissionsfreie Fahrzeuge der Klassen M1, M2, M3 (I und A), N1, N2 und N3
  - Zwei Umsetzungszeiträume beginnend ab 8/2021 Phase I und 1/2026 Phase II



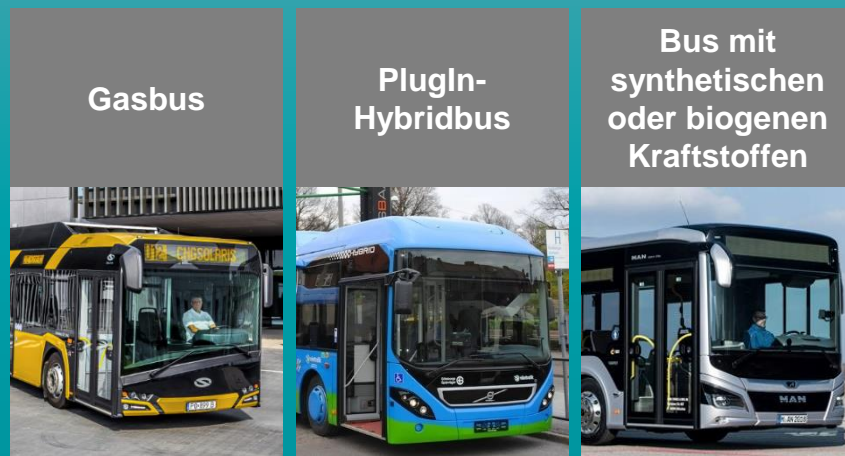
# Clean Vehicles Directive

## Rahmenbedingung für die Umstellung auf alternative Antriebe

- EU-Richtlinie (Clean Vehicles Directive) fordert verbindliche Beschaffungsquoten für saubere und emissionsfreie Fahrzeuge
  - Umsetzung in nationales Recht erfolgt
  - Quoten gelten pro Bundesland



### Saubere Fahrzeuge



### Emissionsfreie Fahrzeuge



# EU: Null Emissionen ab 2035

- „Neue Stadtbusse dürfen von 2035 an gar kein CO<sub>2</sub> mehr ausstoßen.“
  - Ab 2030 müssen bereits 90% der neuen Stadtbusse emissionsfrei sein.

Elektromobilität (E-Mobilität)

Politik

## EU weicht CO<sub>2</sub>-Ziele bei Stadtbusflotten auf

Das noch im Februar formulierte Nullemissionsziel für Stadtbusse soll von 2030 auf 2035 verschoben werden.

[https://www.busplaner.de/de/news/elektromobilitaet-e-mobilitaet-politik\\_eu-weicht-co2-ziele-bei-stadtbusflotten-auf-84780.html](https://www.busplaner.de/de/news/elektromobilitaet-e-mobilitaet-politik_eu-weicht-co2-ziele-bei-stadtbusflotten-auf-84780.html)

<https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/auto-verkehr/eu-beschliesst-co2-grenzwerte-verbrennerverbot-fuer-stadtbusse-von-2035-an-19248950.html>

22.11.2024

Philipp Sinhuber, Alexander Funke | ebusplan

KLIMA UND VERKEHR

## Strikte CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Lastwagen und Busse beschlossen

VON HENDRIK KAFSACK, BRÜSSEL - AKTUALISIERT AM 17.10.2023 - 12:37



**Die Hersteller müssen den Ausstoß von Lastwagen bis 2040 um 90 Prozent verringern. So haben es die EU-Umweltminister beschlossen. Für Stadtbusse soll es sogar ein Verbrennerverbot geben.**



MERKEN



171



46



2 Min.

**D**ie geplante Verschärfung der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Lastwagen und Busse hat bis dato viel weniger Aufmerksamkeit erhalten als die Grenzwerte für Autos. Das dürfte daran liegen, dass für Laster und Busse kein Verbrennerverbot vorgesehen ist – anders als bei Personenwagen und Kleintransportern. Die Pläne sind dennoch beachtlich. Um 90 Prozent soll der Ausstoß bis 2040 sinken, verglichen mit 2019. Darauf haben sich die Umweltminister am Montagabend nach langer Debatte in Luxemburg geeinigt. Für 2035 sieht der Kompromiss eine Reduktion um 65 Prozent vor, 2030 sollen es 45 Prozent sein. Bisher galt für 2030 ein Reduktionsziel von 30 Prozent. Ein kleines Verbrennerverbot enthält der Kompromiss allerdings dann doch: Neue Stadtbusse dürfen von 2035 an gar kein CO<sub>2</sub> mehr ausstoßen.



Batteriebus



Batteriebus mit  
BZ-Range-Ext.



Brennstoff-  
zellenhybrid-  
bus

- Batterie- und Brennstoffzellenbusse verfügen über einen vollelektrischen Antriebsstrang, der einen lokal emissionsfreien Betrieb ermöglicht
- Wesentliche Unterscheidungsmerkmale zwischen den Technologien
  - Betriebliche Konsequenzen (u.a. bedingt durch Reichweitenbeschränkungen)
  - Infrastrukturbedarf
  - Investitions- und Betriebskosten
  - Auswirkungen auf die Wartung und Instandhaltung

“Elektrobusse” ist der Überbegriff für Batteriebusse und Brennstoffzellenbusse.

- Batteriebusse werden mittlerweile von zahlreichen Herstellern angeboten
  - Insbesondere Solobusse und Gelenkbusse
- Batteriekonzepte und die Fahrzeugintegration sind oftmals Alleinstellungsmerkmale der Hersteller



Linkker  
Intelligent eMobility

YUTONG

HEULIEZBUS

Caetano  
Bus

VDL  
BUS & COACH

SCANIA

BYD

EBUSCO®  
Electric Buses & Components

Irizar  
lighting the road

EvoBus\*

SOLARIS

MAN

bluebus

...

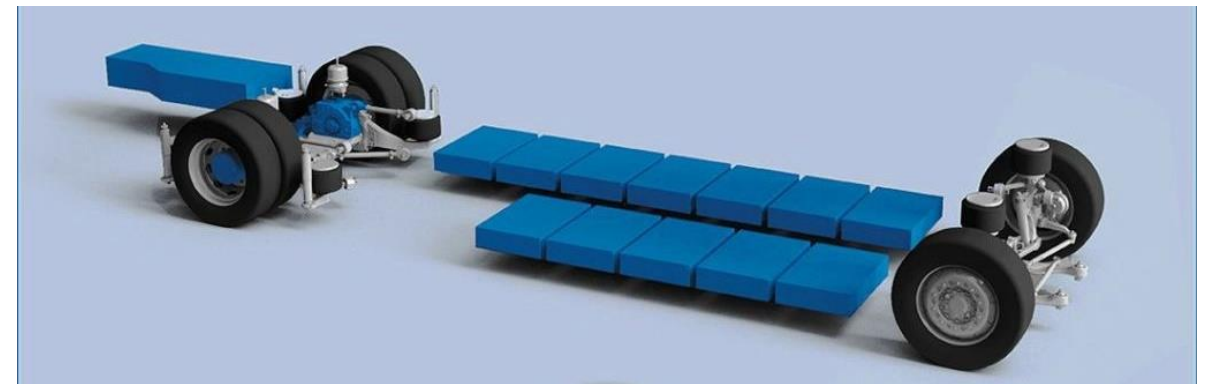
- Kapazitätsanstieg der Bus-Batterien von 250 kWh (2015) auf 500 kWh (2022) → Reichweiten nehmen zu
  - Entwicklung nicht in Zukunft extrapolierbar
  - Bisher viele Sicherheitsmagen gestrichen → nur einmal möglich
  - Entwicklungen aus PKW-Bereich nicht von Vorteil für Bus-Bereich → Steigerung der Batteriekapazität auf Kosten der möglichen Vollzyklen: Reduktion von 3.000 auf ca. 1.000-1.500
- Reichweite bleibt aufgrund begrenzter Zuladung auch bei weiterentwickelten Batterien ein Thema → Batteriegewicht begrenzt die Zuladung und damit die Fahrgastkapazität
- Reichweitenerhöhung durch Senkung des Energiebedarfs
  - Batterien im Fahrzeugboden statt auf dem Dach
  - Mehr Leichtbau ermöglicht Gewichtsreduktion



# Batteriebus

## Bessere Integration der Batterien im Fahrzeug

- Unterbringung der Batterien im Fahrzeugboden
  - Tiefer Schwerpunkt
  - Freie Dachflächen
  - Große Kapazitäten realisierbar



- Es gibt im Wesentlichen zwei unterschiedliche Ladekonzepte:

### 1. Standardladung:

- Ladeleistung mit max. 150 kW
- Angelehnt an eine Steckerladung (CCS Combo 2)
- Standardladung erfolgt nur im Depot



### 2. Schnellladung:

- Ladeleistung mit max. 300 kW
- Realisierung mittels Pantographen
- Schnellladung kann sowohl im Depot als auch an einer Endstelle erfolgen

*Hinweis: Da der Pantograph auf dem Dach installiert wird, ist dort nun weniger Raum für Batterien verfügbar, sodass bei vielen Anbietern die höchstmögliche Batteriekapazität nicht mehr möglich ist*







## Vorteile

- System kann individuell angepasst werden
- Hoher Gesamtwirkungsgrad (direkte Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom möglich)
- Hohe Marktverfügbarkeit und Einsatzreife (Solo- und Gelenkbus)



## Nachteile

- Eingeschränkte betriebliche Flexibilität durch Ladebedarf
- Begrenzte Reichweite bei Depotladern (< 250 km)
- Detaillierte Planung erforderlich (Abstimmung der Technologie und Betrieb)

➔ Insbesondere der Batteriebus mit Depotladung ist eine vielversprechende Technologie, die momentan den Markt dominiert.

- Batteriebus mit Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-RE)
  - Batterie als primärer Energielieferant mit Brennstoffzelle zur Reichweitenverlängerung
  - Sowohl Lade- als auch (kleine) Tankinfrastruktur erforderlich
  - Hohe Reichweiten (allerdings unter Dieselsbusniveau)
  - Vollelektrische Heizung
- Betriebskonzept
  - Tageseinsätze mit langen Umläufen (hohe Fahrleistung pro Tag)
  - Betrieb der Brennstoffzelle wird vor dem Einsatz festgelegt, abhängig von z.B. Kurslänge, Temperatur und Standzeiten im Depot
  - Wasserstoffverbrauch abhängig von Betriebsintensität der Brennstoffzelle → teurer Wasserstoff kann zu Teilen durch günstigen Strom ersetzt werden



- Brennstoffzellenhybridbus (BZ-Hybrid)
  - Batterie für Rekuperation und als Energiepuffer für das Brennstoffzellensystem → nahezu konstantes Leistungsniveau
  - Hohe Reichweiten (allerdings unter Dieselsbusniveau)
  - Wasserstoff-Infrastruktur benötigt, kein Bedarf an stationären Ladegeräten (allerdings CEE-Anschluss)
  - Hohe Energiekosten, da ausschließlich teurer Wasserstoff genutzt
  - Vollelektrische Heizung
  
- Aktuell beteiligen sich meist Solaris, CaetanoBus, Van Hool und neuerdings Wrightbus an Ausschreibungen für Brennstoffzellenhybridbusse

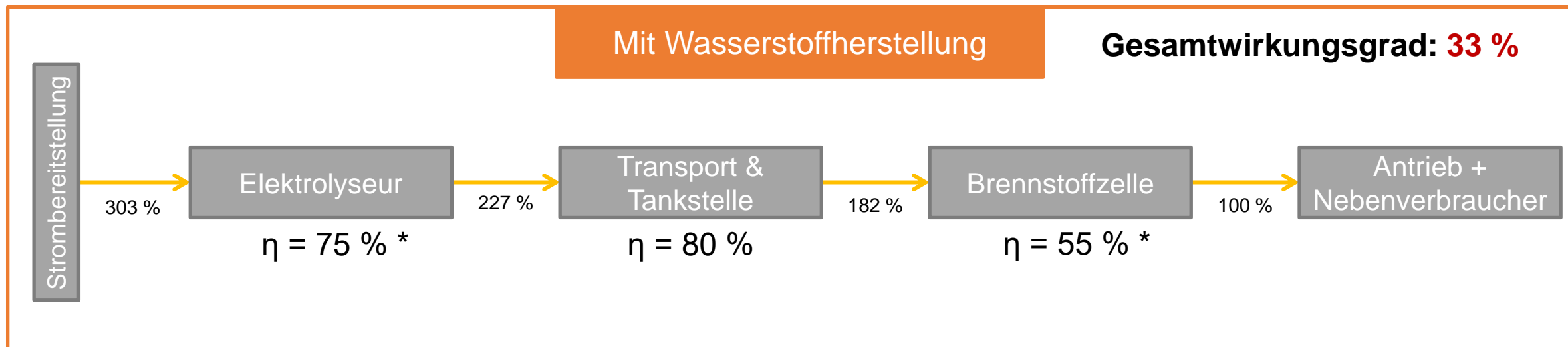
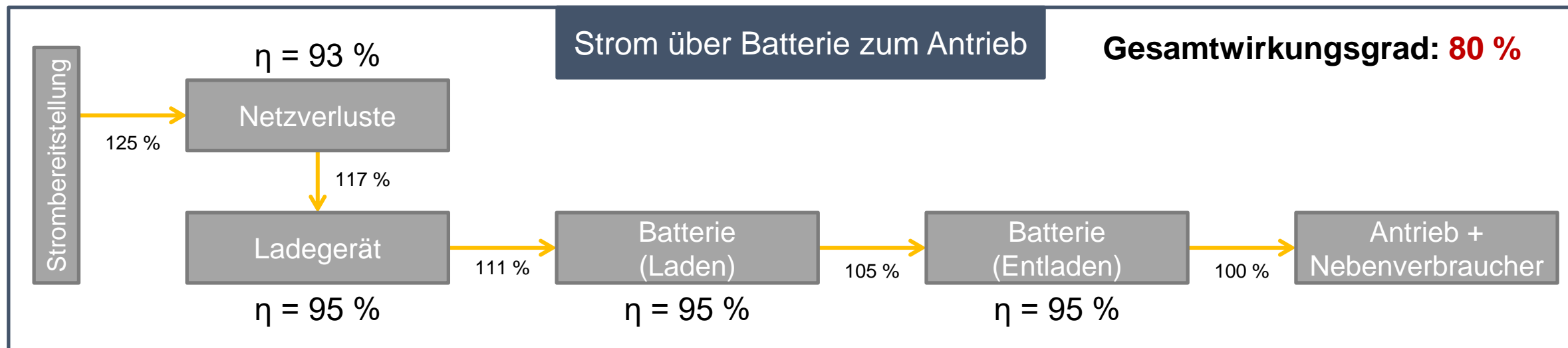


Beispiel: Van Hool A330 Fuel Cell  
 - Eingesetzt vom RVK in Köln  
 - Betankung am Chemiepark

|                                 | Solaris  | CaetanoBus | Van Hool |
|---------------------------------|----------|------------|----------|
| <b>Brennstoffzelle</b>          | 70 kW    | 70 kW      | 70 kW    |
| <b>Inst. Batterie</b>           | 30,4 kWh | 80 kWh     | 24 kWh   |
| <b>Inst. H<sub>2</sub>-Tank</b> | 37,5 kg  | 37,5 kg    | 38,5 kg  |

# Brennstoffzellenbusse

## Energiebereitstellung im Vergleich zum Batteriebus





## Vorteile

- Betriebliche Flexibilität
- Reichweite (> 300 km)  
→ geringer Fahrzeugmehrbedarf
- Tanken innerhalb weniger Minuten  
(ca. 7 bis 20 min)



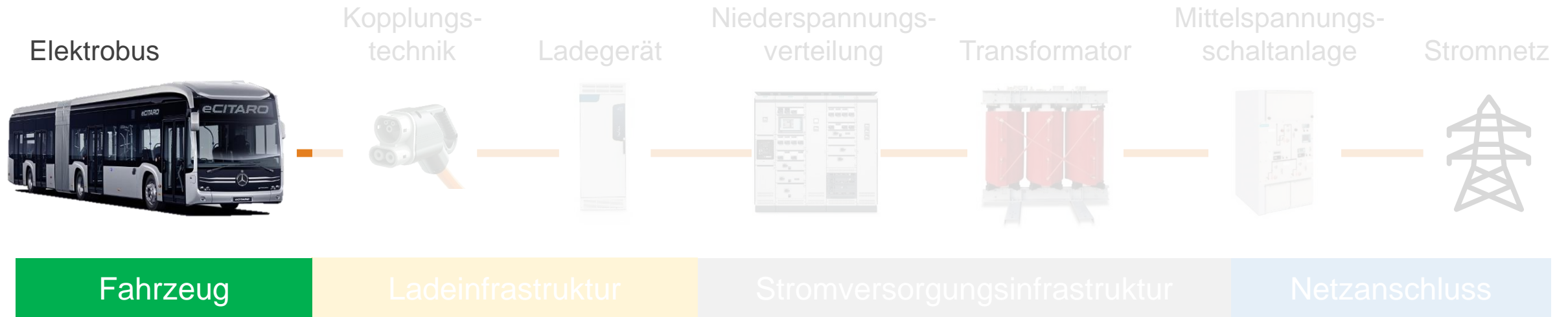
## Nachteile

- Komplexe Technik bei Fahrzeugen und Infrastruktur
- Wasserstoffproduktion aus Strom durch Verstromung über BZ wenig effizient  
→ Hohe (Energie-)Kosten
- Aktuell kaum verbreitet
- Stark begrenzte Marktverfügbarkeit  
(insb. BZ-Hybrid-Gelenkbusse)

→ Betriebliche Vorteile gegenüber Batteriebussen, aber trotz verschiedener Förderanstrengungen noch kein Durchbruch des BZ-Hybridbusses und nur langsam wachsendes Angebot an BZ-REX-Fahrzeugen.



- Ladung von Elektrobussen erfordert leistungsfähige und aufeinander abgestimmte Infrastruktur
  - Technischen Grenzen der Komponenten müssen in der Systemauslegung berücksichtigt werden
- Bestehende Infrastruktur selten ausreichend, sodass bauliche Maßnahmen erforderlich sind
  - Lokale Gegebenheiten bestimmen die Realisierbarkeit



- Versorgung erfolgt mit Gleichstrom (DC)
  - Externe Ladegeräte mittlerweile Standard
- Spitzenladeleistung variiert abhängig vom Batteriekonzept
  - LMP-Batterien oft auf maximal 100 kW begrenzt
  - NMC- und LFP-Batterien ermöglichen deutlich höhere Ladeleistungen
- Große Fahrzeugbatterien haben zur Konsequenz, dass auch ein 150 kW Ladevorgang mehrere Stunden dauert
  - Fahrzeuge werden idealerweise am Ort der Abstellung versorgt (Ladung und Vorkonditionierung)







- Induktive Lösungen, Partielle Oberleitungen und Verbindungsroboter haben sich bislang am Markt kaum durchgesetzt
- Konduktive Systeme mit CCS-Stecker (Combo Typ 2 nach IEC 62196) und Pantographen dominieren den Markt
  - Eignung hängt von lokalen Gegebenheiten und der langfristigen Strategie ab



Stecker



Pantograph



Invertierter Pantograph

### CCS-Stecker



- Robust und wartungsarm
- Großes Marktangebot
- Standard auf Fahrzeugseite



- Ladeleistung auf 150 kW begrenzt
- Manuelle Bedienung
- Kabelführung zum Fahrzeug evtl. umständlich

### Pantograph



- Vollautomatische Kontaktierung
- Hohe Ladeleistungen übertragbar
- Einfache Depotgestaltung bei fahrzeugseitigem Pantograph



- Flächenbedarf auf dem Dach kann Batteriekapazität reduzieren
- Begrenztetes Marktangebot
- Erhöhter Wartungsbedarf im Vergleich zum CCS-Stecker

- Zahlreiche Hersteller am Markt vertreten
  - ABB, Ekoenergetyka, Heliox, Medcom, Siemens, Schaltbau (SBRS), ...
- Leistungsklasse abhängig vom Anwendungsfall

**Mobiler Lader**  
25 kW bis 40 kW



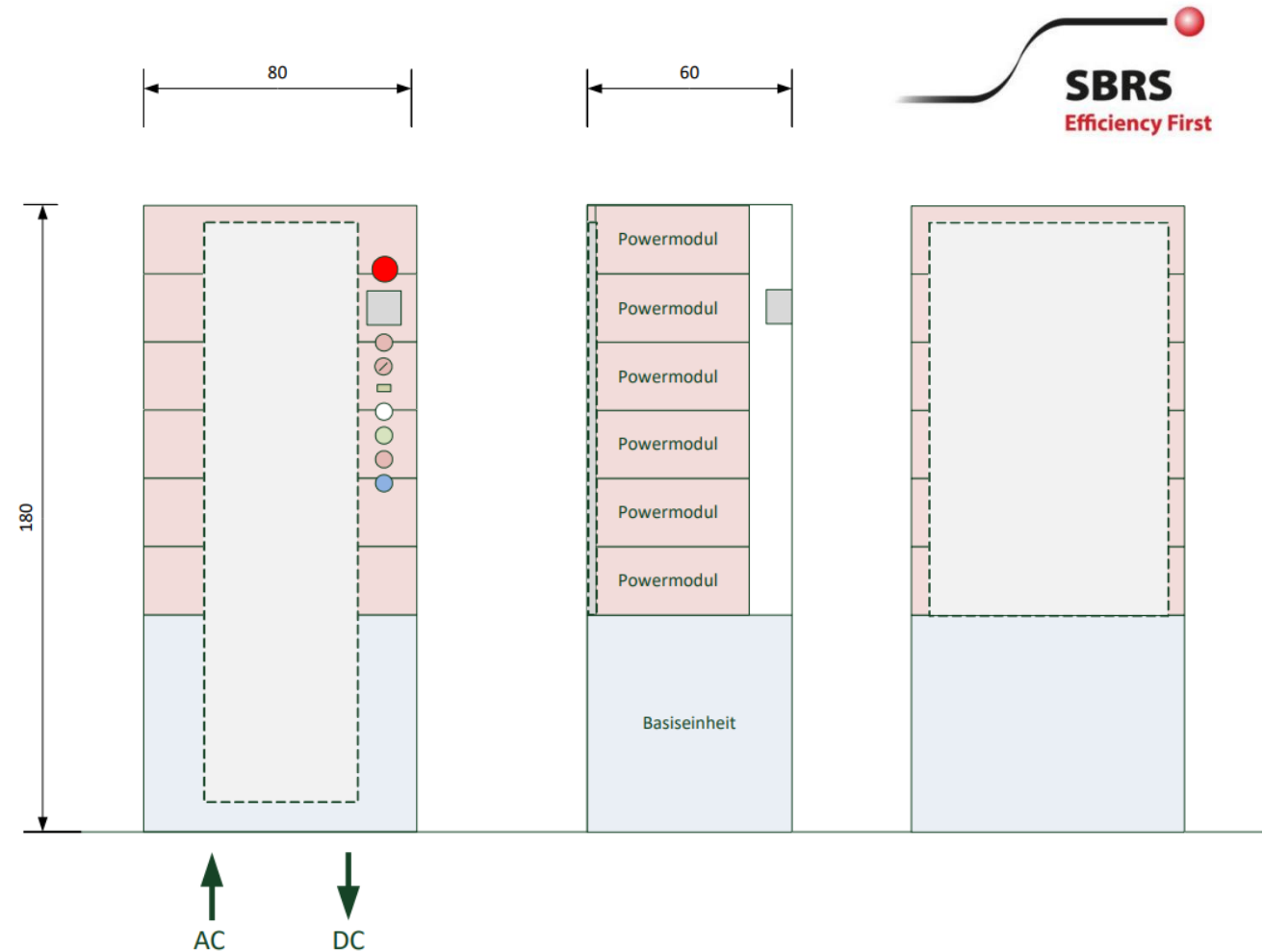
**Standardladung**  
bis zu 150 kW




















**Schnellladung**  
300 kW bis 600 kW

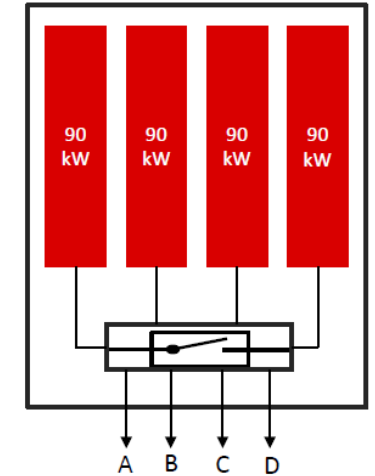


- Ladegeräte sind in der Regel aus mehreren Leistungsmodulen aufgebaut
  - Redundanz im Fehlerfall
  - Einfachere Wartbarkeit
- Versorgung auf der AC-Seite mit Niederspannung (400 V) oder speziellen Spannungsniveau
- Abmessungen nicht unerheblich, sodass Errichtung in der Nähe der Fahrzeuge nur schwer möglich ist



- Neue Konzepte ermöglichen eine flexible Verschaltung der Leistungsmodule und Versorgung mehrerer Ausgänge → effiziente Ausnutzung der Infrastruktur

|  | Nachts – 2 Busse  | Nachts – 3 Busse   | Nachts – 4 Busse   | tagsüber – 1 Bus  |
|--|---|--|--|---|
|  <p>* Abbildung kann vom tatsächlichen Produkt abweichen, Änderungen vorbehalten</p> |  <p>180kW<br/>250A</p> |  <p>180kW<br/>250A</p> |  <p>90kW<br/>125A</p>   |  <p>0kW<br/>0A</p>       |
|  |  <p>180kW<br/>250A</p> |  <p>90kW<br/>125A</p>  |  <p>90kW<br/>125A</p>   |  <p>0kW<br/>0A</p>       |
|  |  <p>00kW<br/>0A</p>   |  <p>90kW<br/>125A</p> |  <p>90kW<br/>125A</p>  |  <p>0kW<br/>0A</p>      |
|  |  <p>0kW<br/>0A</p>   |  <p>0kW<br/>0A</p>   |  <p>90kW<br/>125A</p> |  <p>360kW<br/>500A</p> |



\*\* kann auch einem anderen Mix an Kombinationen entsprechen, z.B. 2x CCS und 2x PD

\*\*\* DC Ausgangsleistung basierend auf 750V Batteriespannung



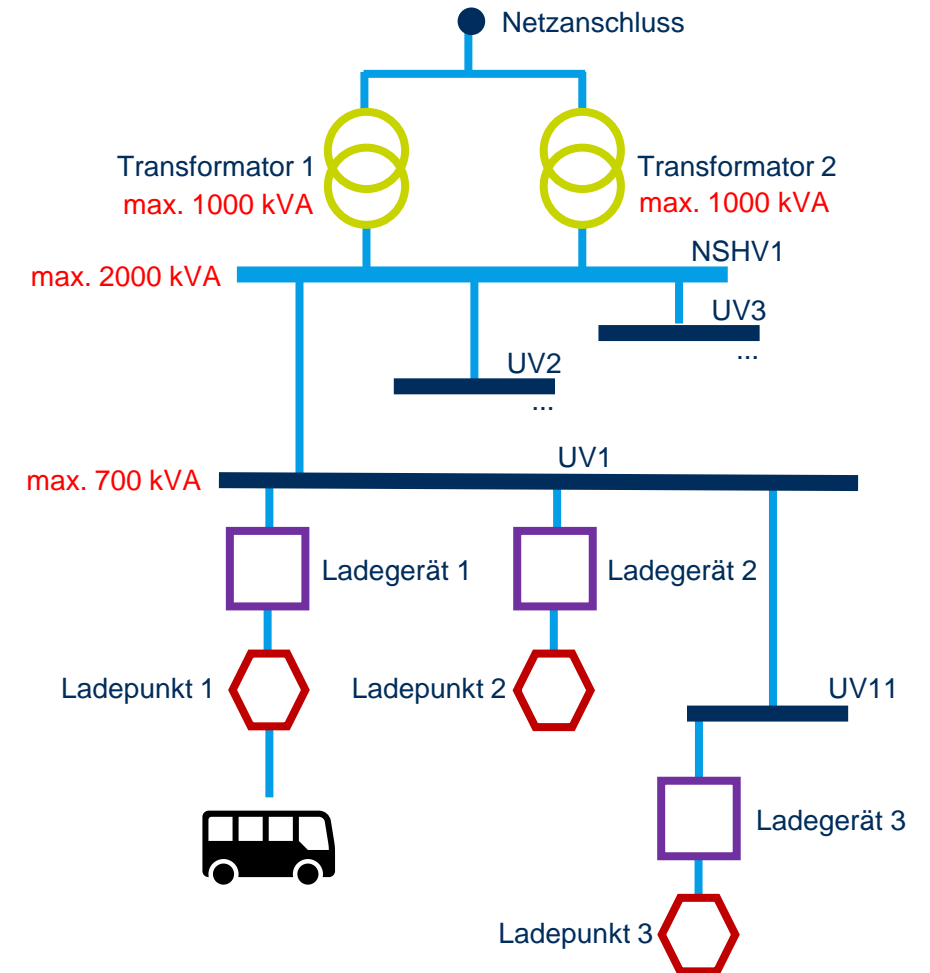
- Ladegeräte sind oftmals luftgekühlt und geben ihre Verlustwärme direkt an die Umgebung ab
  - Errichtung der Infrastruktur in Gebäuden erfordert Lüftungskonzept
- Flüssigkeitsgekühlte Ladegeräte ermöglichen einen besseren Transport der Verlustwärme und bieten neue Freiheitsgrade bei der Unterbringung

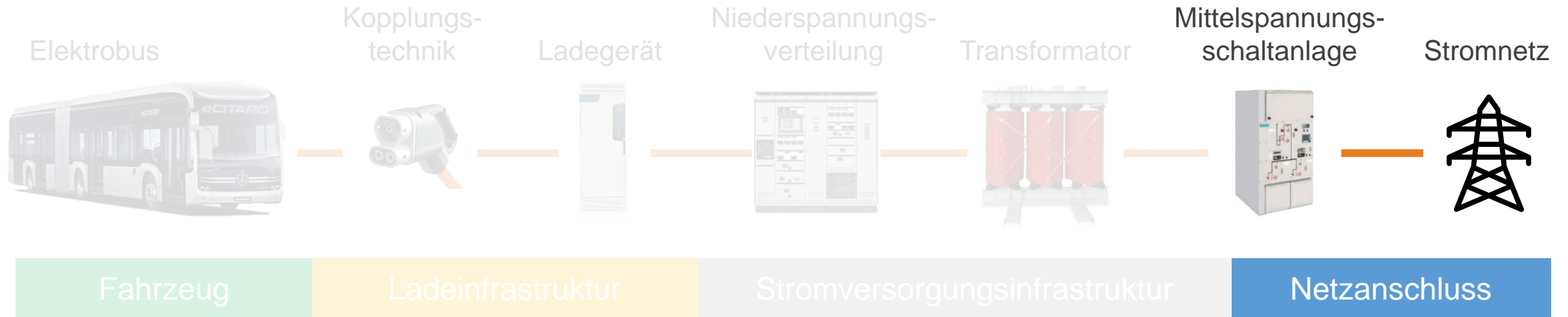






- Nutzung von Standardkomponenten aus dem Niederspannungsbereich (400 V, AC)
  - Schaltanlagen
  - Unterverteilungen
  - Kabel
- Leistungsniveau erfordert große Leitungsquerschnitte und damit eine neue Verkabelung
- Dimensionierung der Verkabelung und Verteilungen sollte den betrieblichen Nutzen nicht übermäßig beschränken
  - Gleichzeitigkeitsfaktor nicht unterschätzen





- Stromnetz ist in mehrere Netzebenen aufgeteilt
  - Spannungsniveau bestimmt Leistungsfähigkeit
  - Niederspannungsanschluss nicht ausreichend, um Ladeinfrastruktur zu versorgen
- Mittelgroße Betriebshöfe sind auch schon heute an das Mittelspannungsnetz angeschlossen, jedoch ist die Leistung hier oftmals auf unter 500 kW begrenzt
- Errichtung von Batteriebus-Infrastruktur erfordert mindestens eine Erweiterung des bestehenden Mittelspannungsanschlusses oder einen Neubau
- Sehr große Betriebshöfe nutzen mehrere Mittelspannungsanschlüsse oder Hochspannung

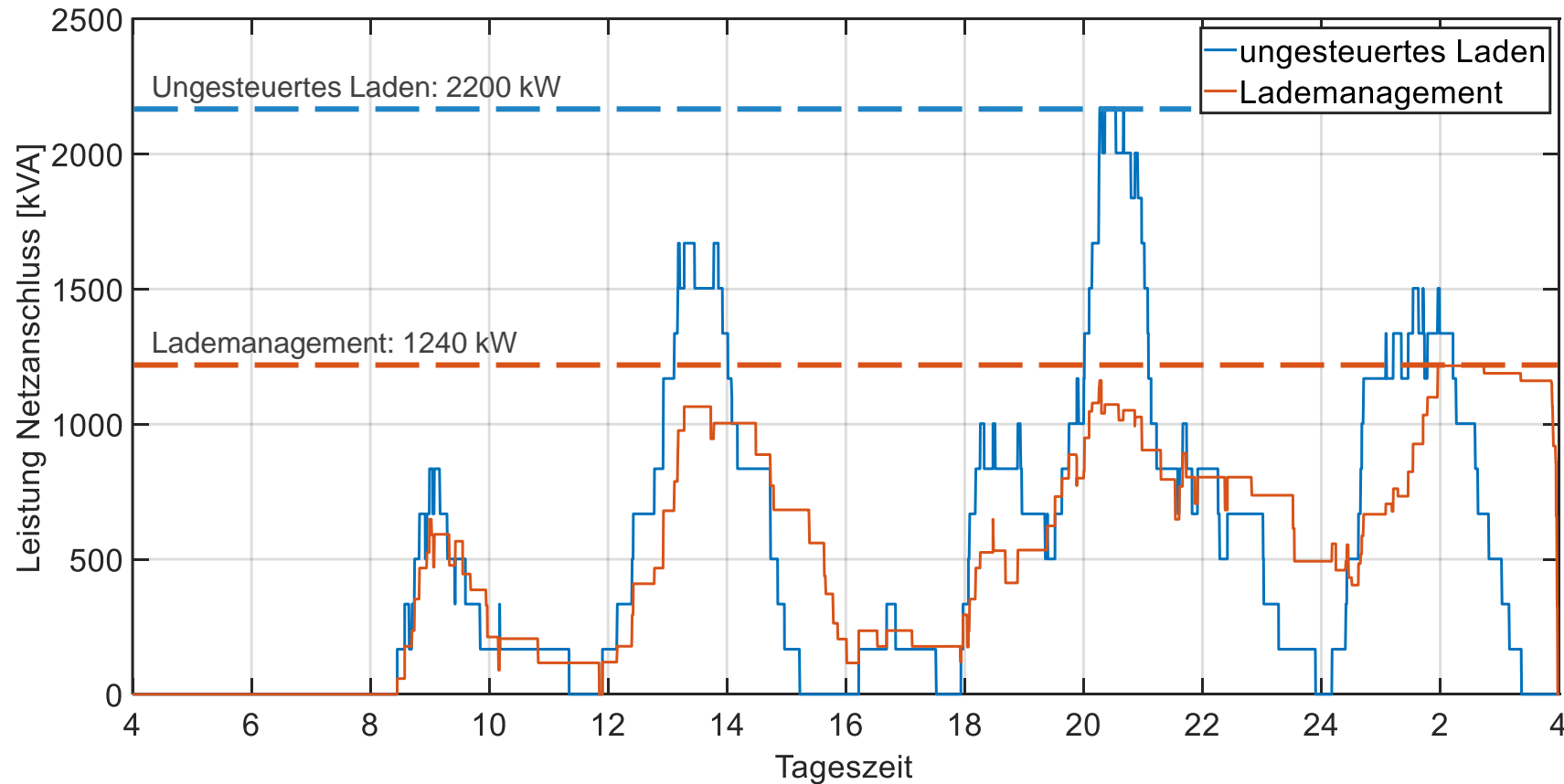
**Höchstspannung**  
220 kV / 380 kV

**Hochspannung**  
110 kV

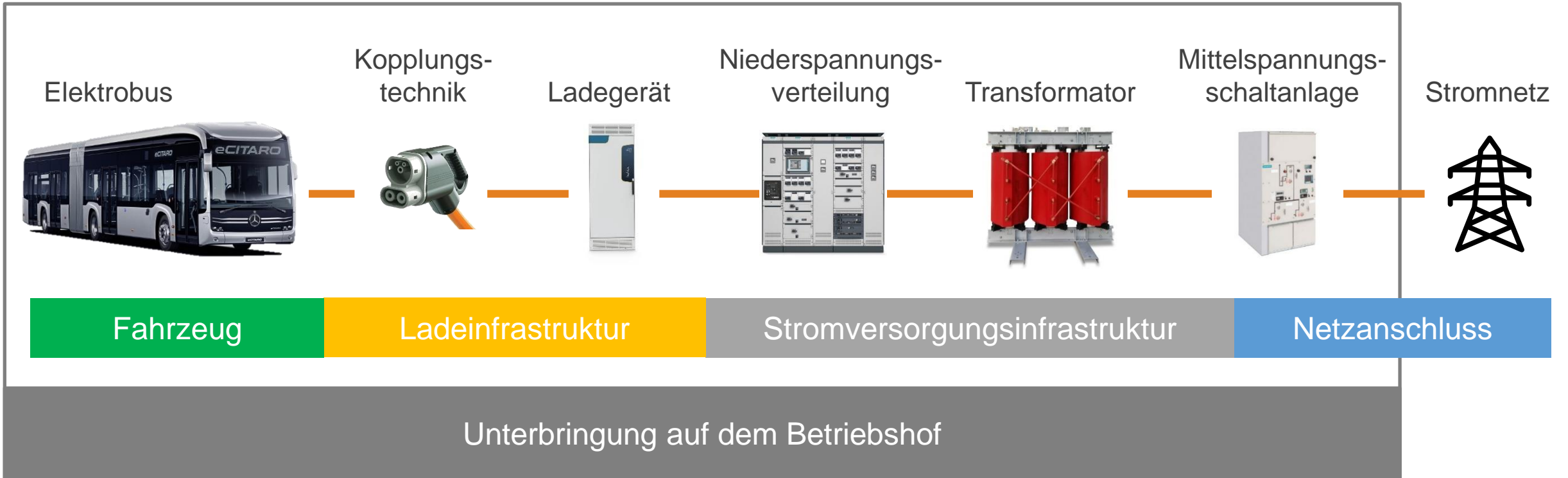
**Mittelspannung**  
10 / 20 / 30 kV

**Niederspannung**  
230 V / 400 V

- Leistungsverlauf für einen Betriebshof mit 37 Batteriegeleitenbussen (Depot- und Gelegenheitslader)



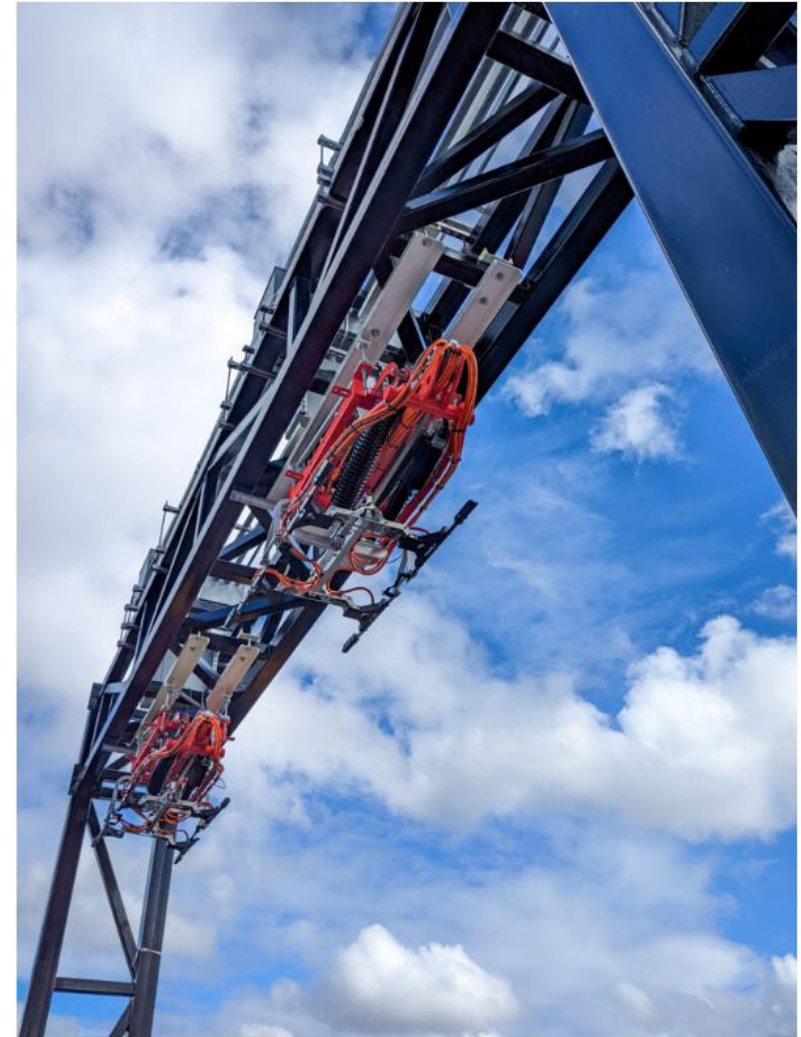
- Jeweils ein 150 kW Ladegerät pro Fahrzeug ergibt eine installierte Ladeleistung von rund 5.500 kW (DC)
- Leistungsbezug auch bei ungesteuertem Laden deutlich geringer
- Lademanagement kann Leistung nochmals reduzieren
- Dimensionierung des Netzanschlusses sollte immer vor dem Hintergrund eines konkreten Einsatzkonzepts der Elektrobusse erfolgen



- Nutzung einer zentralen Spur in der Abstellung zur Errichtung der Ladeinfrastruktur
  - Kurze Kabelwege auf der Gleichstromseite
  - Hoher Flächenbedarf
- Aufgrund des hohen Flächenbedarfs nur selten möglich



# Betriebshofgestaltung Ladeinfrastruktur in der Abstellung – Downward Pantograph

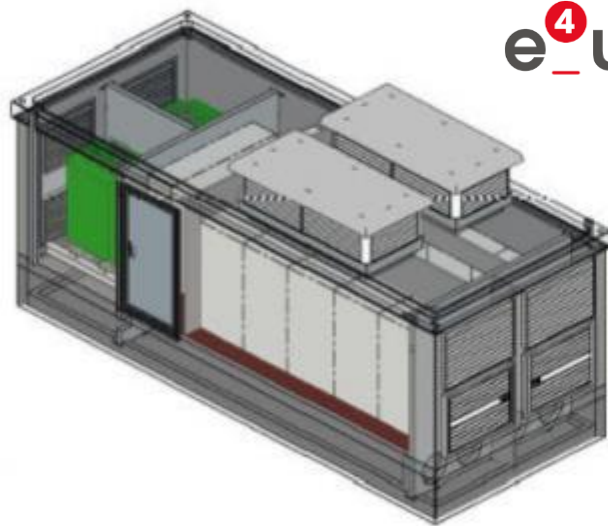


- Errichtung der Ladeinfrastruktur auf einer zweiten Ebene
  - Erhöhter baulicher Aufwand, jedoch nur geringe Reduzierung der Abstellflächen

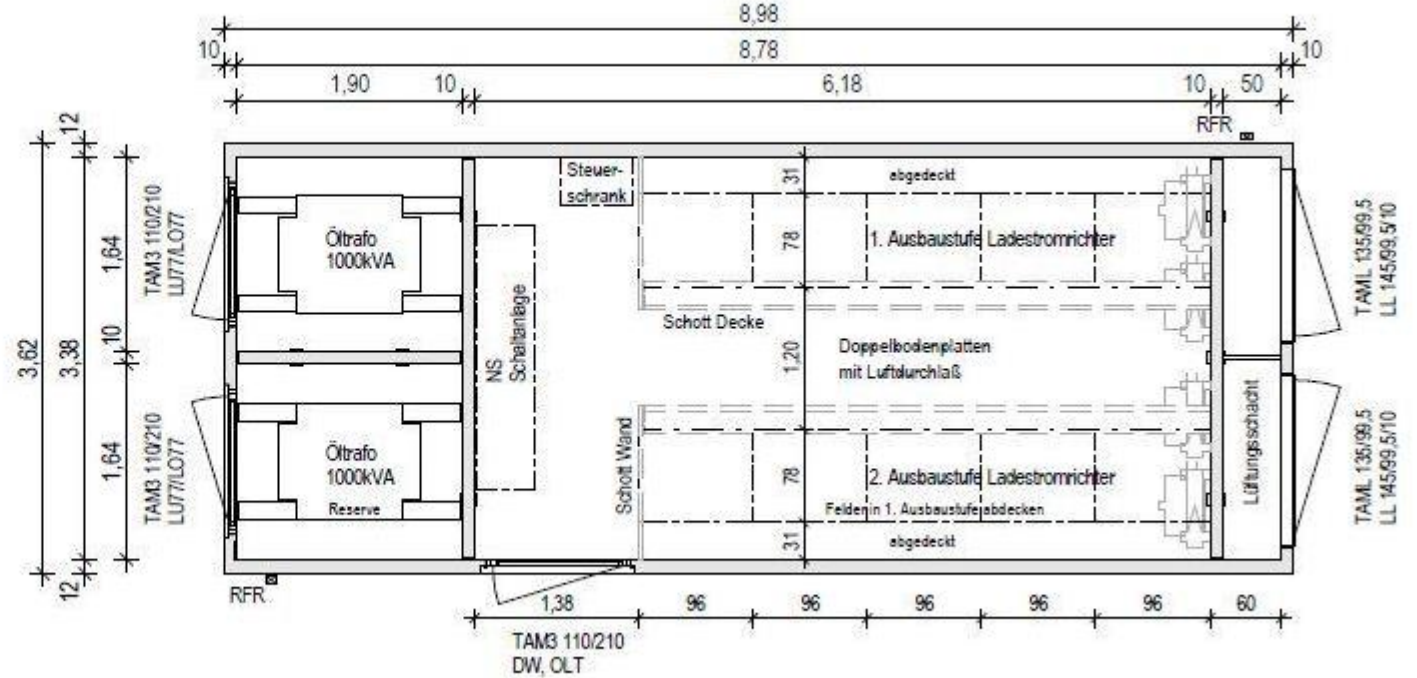




- Errichtung von Stromversorgungs- und Ladeinfrastruktur in Gebäuden oder Containern abseits der Abstellung
  - Reduzierung des baulichen Aufwands, jedoch lange Kabelwege



e<sup>4</sup>you



- Batterie- und Brennstoffzellenbusse haben derzeit deutlich höhere Anschaffungskosten als konventionelle Dieselsebusse
  - aktuelle Marktpreise für Solobusse (12 m), unverhandelt

Dieselsebus ~ 250.000 €

Batteriebus ~ 550.000 €

Faktor 2,2

Brennstoffzellenbus ~ 650.000 €

Faktor 2,6

- Ladeinfrastruktur für Depotlader
- Beispiel 120 bis 150 kW Schnellladestation mit Stecker-Verbindung
- Gesamtkosten rund 60.000 bis 95.000 €
  - Ladegerät mit CCS-Ladekabel
  - Installation



Bildquelle: Heliox

- Ladeinfrastruktur für Gelegenheitsladung
- Beispiel 300 kW oder 450 kW Schnellladestation mit Pantographen
- Gesamtkosten 200.000 € - 340.000 €
  - Ladegerät
  - Mast mit Ladehaube
  - DC-Kabel
  - Installation



Bildquelle: Heliox

# Wirtschaftlichkeit des Elektrobuseinsatzes

## Vergleich der Betriebskosten für Solobusse

Es handelt sich hier lediglich um beispielhafte Annahmen, die nicht zwangsweise mit den in dieser Studie verwendeten Annahmen übereinstimmen müssen!

### Dieselbus



- Verbrauch  
38 l pro 100 km
- Dieselpreis  
1,35 €/l
- Energiekosten  
0,51 €/km

### Batteriebus



- Verbrauch  
165 kWh / 100 km
- Strompreis:  
0,30 €/kWh
- Energiekosten  
0,50 €/km

### Batteriebus mit BZ-RE



- Verbrauch\*  
65 kWh / 100 km  
5 kg H<sub>2</sub> / 100 km
- H<sub>2</sub>-Preis  
15,00 €/kg
- Energiekosten  
1,01 €/km

\* abhängig von der Umlauflänge

### BZ-Hybridbus



- Verbrauch  
9 kg H<sub>2</sub> / 100 km
- H<sub>2</sub>-Preis  
15,00 €/kg
- Energiekosten  
1,35 €/km

# AP 1 Rahmen- und Betriebsdatenanalyse

- Stand der Technik und Marktsituation
- Diskussion und Definition der Grundlage der Studie
- Mindestreserven
- Datengrundlage



- In der Studie werden verschiedene Fahrzeugkonfigurationen untersucht, um die optimale technische Konfiguration für die lokale Situation zu ermitteln
- Fahrzeugkonfigurationen orientieren sich am Marktangebot
  - Konkrete Hersteller oder Modelle werden zu Referenztypen zusammengefasst
  - Sicherstellung eines akzeptablen Hersteller- und Anbieterkreises im Hinblick auf die Ausschreibung
- Batteriebusse werden mit unterschiedlichen Ladeleistungen und Batteriekapazitäten abgebildet
- Brennstoffzellenbusse werden mit einer Konfiguration abgebildet, die das Marktangebot widerspiegelt

## ■ Es gibt zwei unterschiedliche Ladekonzepte

### 1. Standardladung:

- Ladeleistung mit 120 bis 150 kW
- Angelehnt an eine Steckerladung (CCS Combo 2)
- Standardladung erfolgt nur im Depot

### 2. Schnellladung:

- Ladeleistung mit max. 300 kW
- Realisierung mittels Pantographen
- Schnellladung kann sowohl im Depot als auch an einer Endstelle erfolgen

*Hinweis: Da der Pantograph auf dem Dach installiert wird, ist dort nun weniger Raum für Batterien verfügbar, sodass bei vielen Anbietern die höchstmögliche Batteriekapazität nicht mehr möglich ist*

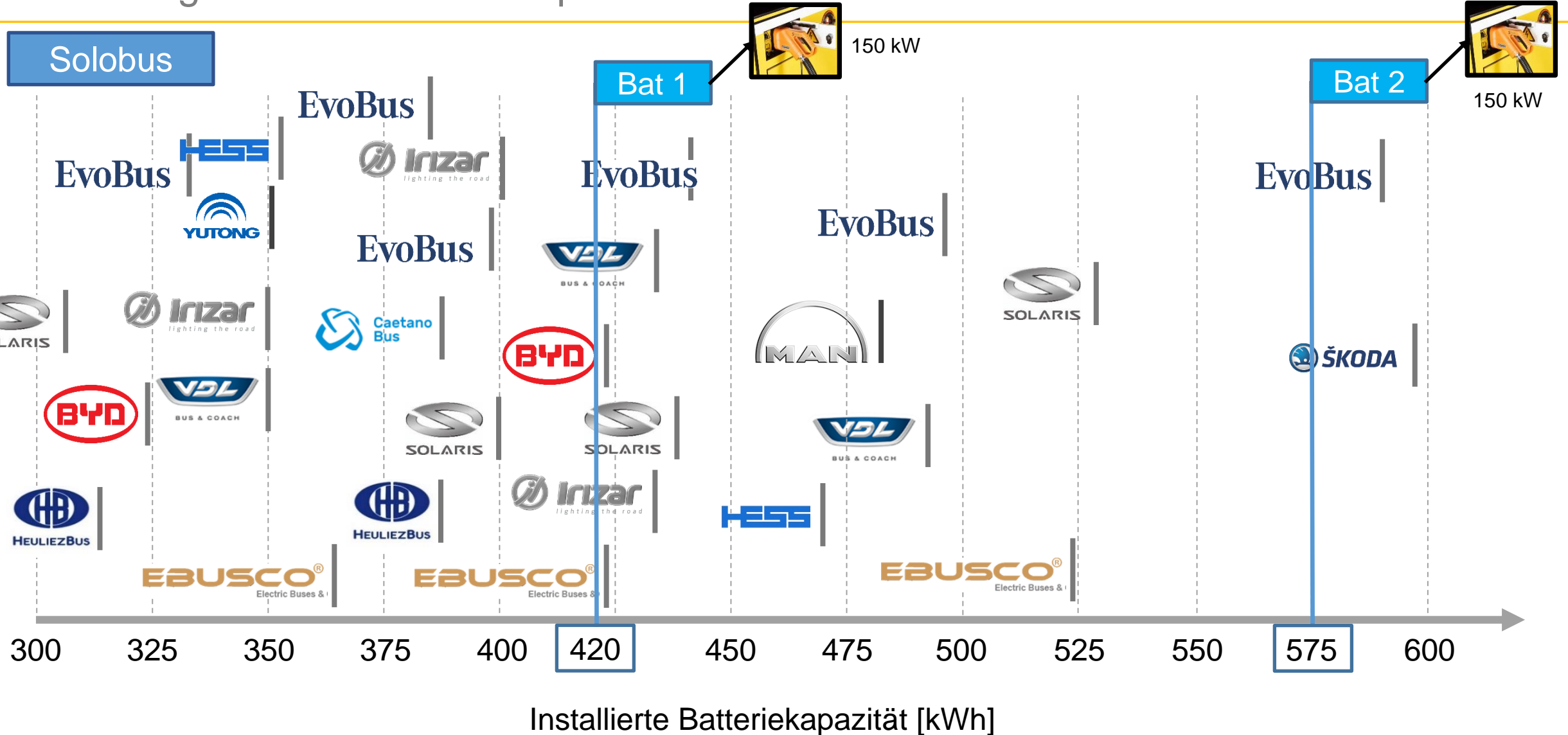
Mit Blick auf die Fahrleistung und der mangelnden Nutzbarkeit von Ladeinfrastruktur an Endstellen wurden nur Untersuchungen mit „1. Standardladung“ durchgeführt.





# Batteriebus

## Marktangebot und Batteriekapazität – Solobus



- **Tremonia Sprinter City 45 Electric**
  - Minibus auf Basis des Mercedes Sprinter
  - Länge: 7,479 m
  - Batteriekapazität: 115 kWh
  - Max. Ladeleistung: 100 kW über CCS-Stecker
  - Sitzplätze: 18 bis 22 (ggf. +1 Rollstuhl)
  - Kosten: 250.000 Euro
  
- **K-Bus E-Solar City L**
  - Minibus auf Basis des Toyota ProAce
  - Länge: ca. 7,5 m
  - Batteriekapazität: 75 kWh
  - Kontaktierung: CCS-Stecker
  - Sitzplätze: 20 bis 34

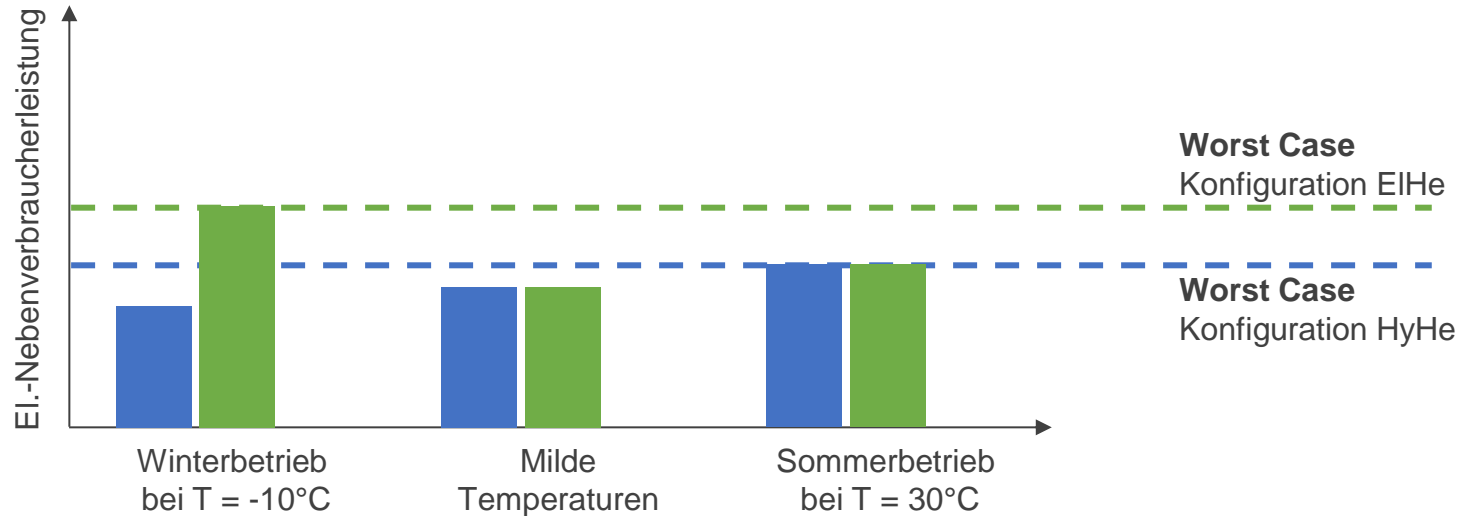


Quelle: Evade



Quelle: Omnibuspiegel

- Energiebedarf der betrachteten Batteriebusse resultiert aus dem Antriebssystem und den Nebenverbrauchern, insbesondere Heizung und Klimatisierung
- Zwei unterschiedliche Heizsysteme werden analysiert
  - **HyHe** Hybrid Heizung (elektrisch / fossil) mit CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe und Klimatisierung
  - **EIHe** Vollelektrische Heizung mit CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe und Klimatisierung



|                           | Batteriebus<br>Elektrische Heizung | Batteriebus<br>Hybridheizung | Brennstoffzellenhybridbus<br>Elektrische Heizung         |
|---------------------------|------------------------------------|------------------------------|--|
| Minibus                   |                                    | 115 kWh                      |  |
| Solobus                   | 425 kWh<br>575 kWh                 | 400 kWh<br>550 kWh           | Bat.: 30 kWh<br>BZ: 60 kW<br>H <sub>2</sub> -Tank: 38 kg |
| Untersuchte Ladeleistung: | Minibus 100 kW<br>Solobus 120 kW   |                              |  |

# AP 1 Rahmen- und Betriebsdatenanalyse

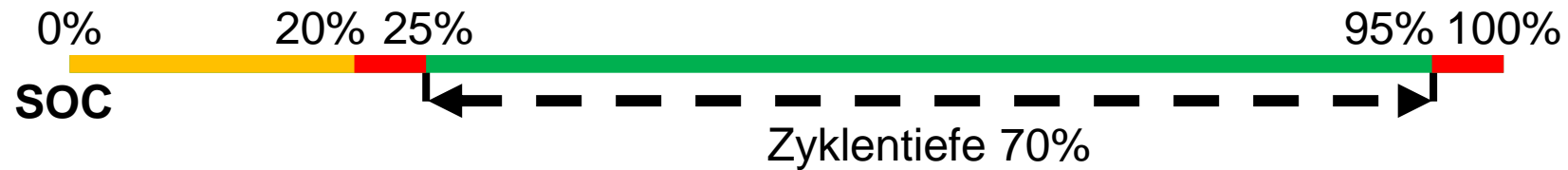
- Stand der Technik und Marktsituation bei Elektrobussen
- Diskussion und Definition der Grundlage der Studie
- Mindestreserven
- Datengrundlage



# Batteriebusse

## Installierte vs. nutzbare Batteriekapazität

- Zulässiger Betriebsbereich der Batterie ist begrenzt
  - End-of-Life durch Alterung angenommen: 80% Restkapazität
  - Randbereiche des verfügbaren SOC-Bandes teilweise nicht nutzbar

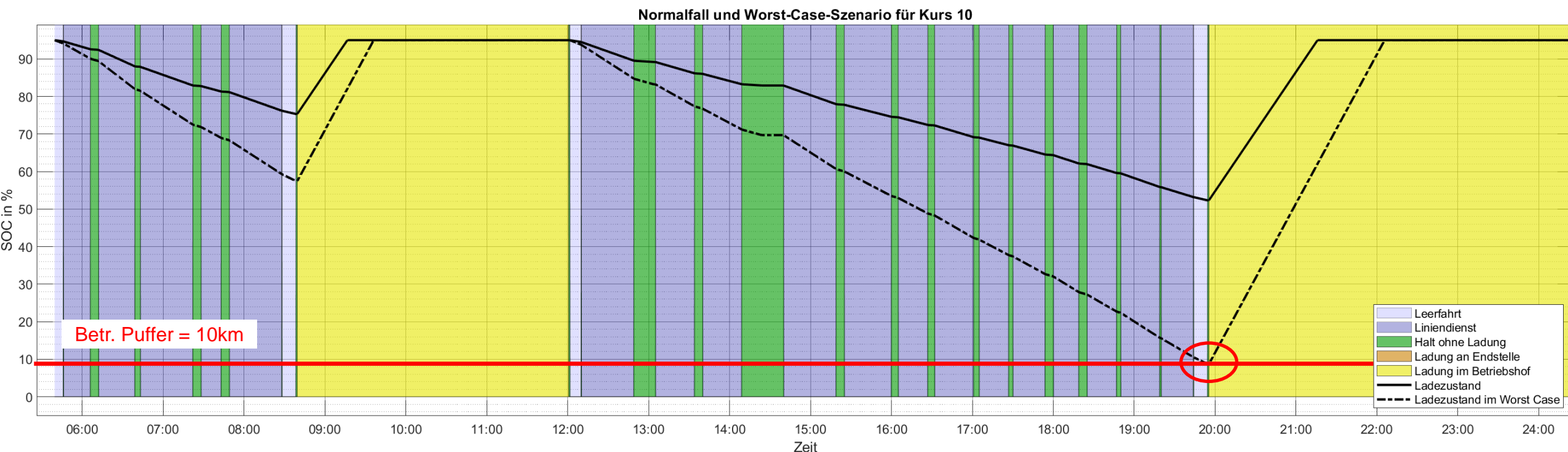


- Nutzbare Kapazität
- Kapazitätsverlust durch Alterung
- Begrenzung aufgrund von Spannungsregulierung

# Batteriebusse mit Depotladung

## Betriebliche Puffer und Verspätungsausgleich

- Planung mit betrieblichen Puffern sichert die Betriebsstabilität im Worst Case, auch bei Batterien am Lebensdauerende
  - Angesezt: 10 km Restreichweite
- Puffer für Verspätungsausgleich
  - Angesezt : 2 Minuten
- Puffer wird von der verfügbaren Ladezeit im Depot abgezogen



# AP 1 Rahmen- und Betriebsdatenanalyse

- Stand der Technik und Marktsituation bei Elektrobussen
- Diskussion und Definition der Grundlage der Studie
- Mindestreserven
- Datengrundlage

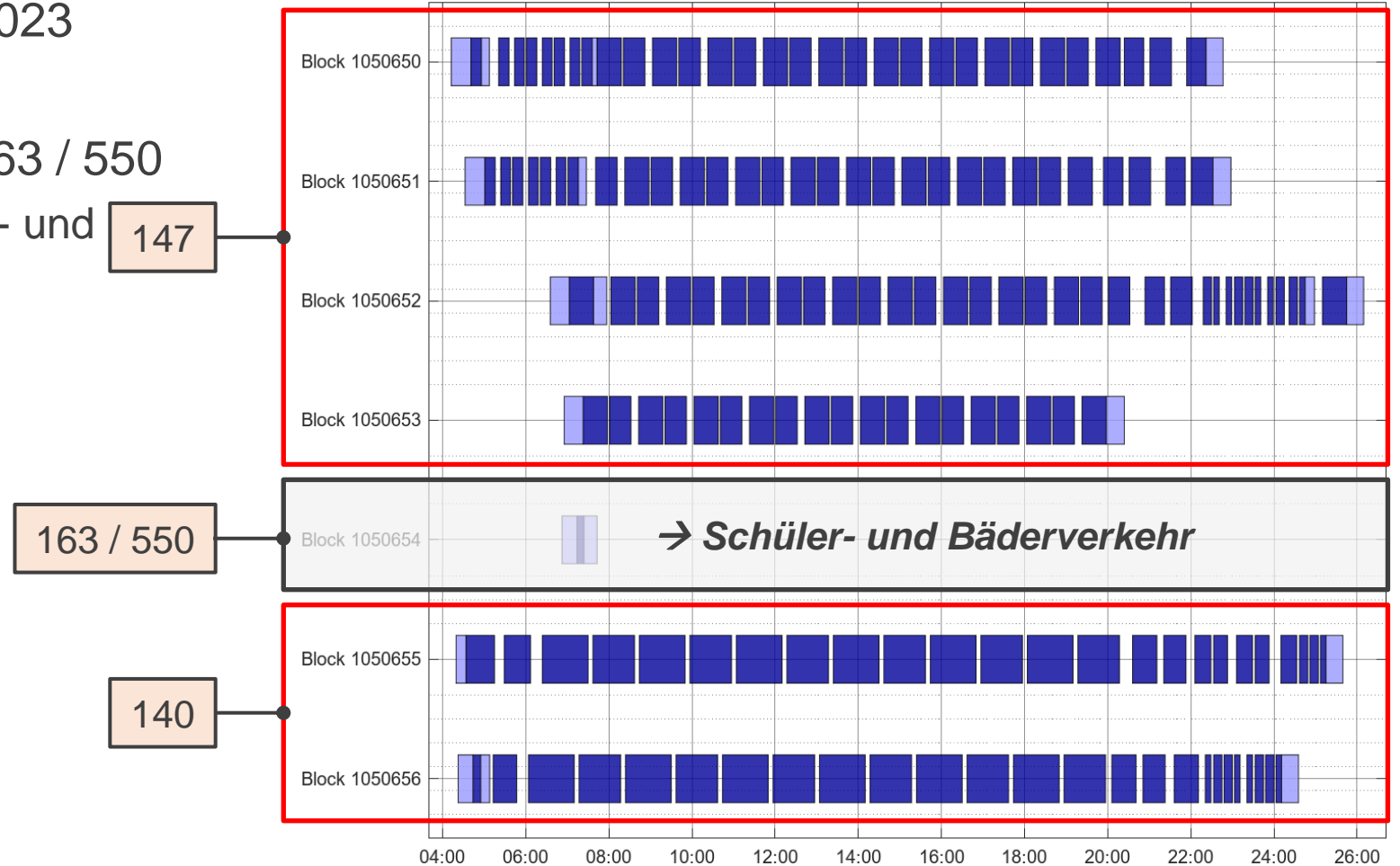




- Abgestimmte relevante und zu untersuchenden Fahrleistungen
  - L** Linienverkehr: Umfasst 3, die linienwechselnd verplant werden können. Wird unabhängig vom Schüler- und Bäderverkehr gefahren. Linie 163 / 550 kann auch im Schüler- und Bäderverkehr verplant werden.
  - S** Schülerverkehr: Kann gemeinsam verplant werden. Wird unabhängig vom Linienverkehr gefahren.
  - B** Bäderverkehr: Wird gemeinsam mit dem Schülerverkehr geplant.
  - R** Der Reisebusverkehr wird nicht betrachtet.

- Plandaten der KVB vom 27.09.2023
- Kurse der Linien 140, 147 und 163 / 550
  - Linie 163 / 550 wird beim Schüler- und Bäderverkehr verplant

Leerfahrt  
 Linienfahrt



- Plandaten des Schüler- und Bäderverkehrs (→ „S+B“)
  - Startzeiten, Adressen, Schüleranzahl, Liniendaten
  - Maßgebender Tag ist Mittwoch mit der höchsten Schüleranzahl und Fahrleistung
    - Freitag etwas geringer
    - Im Folgenden werden die Daten für einen Mittwoch angesetzt

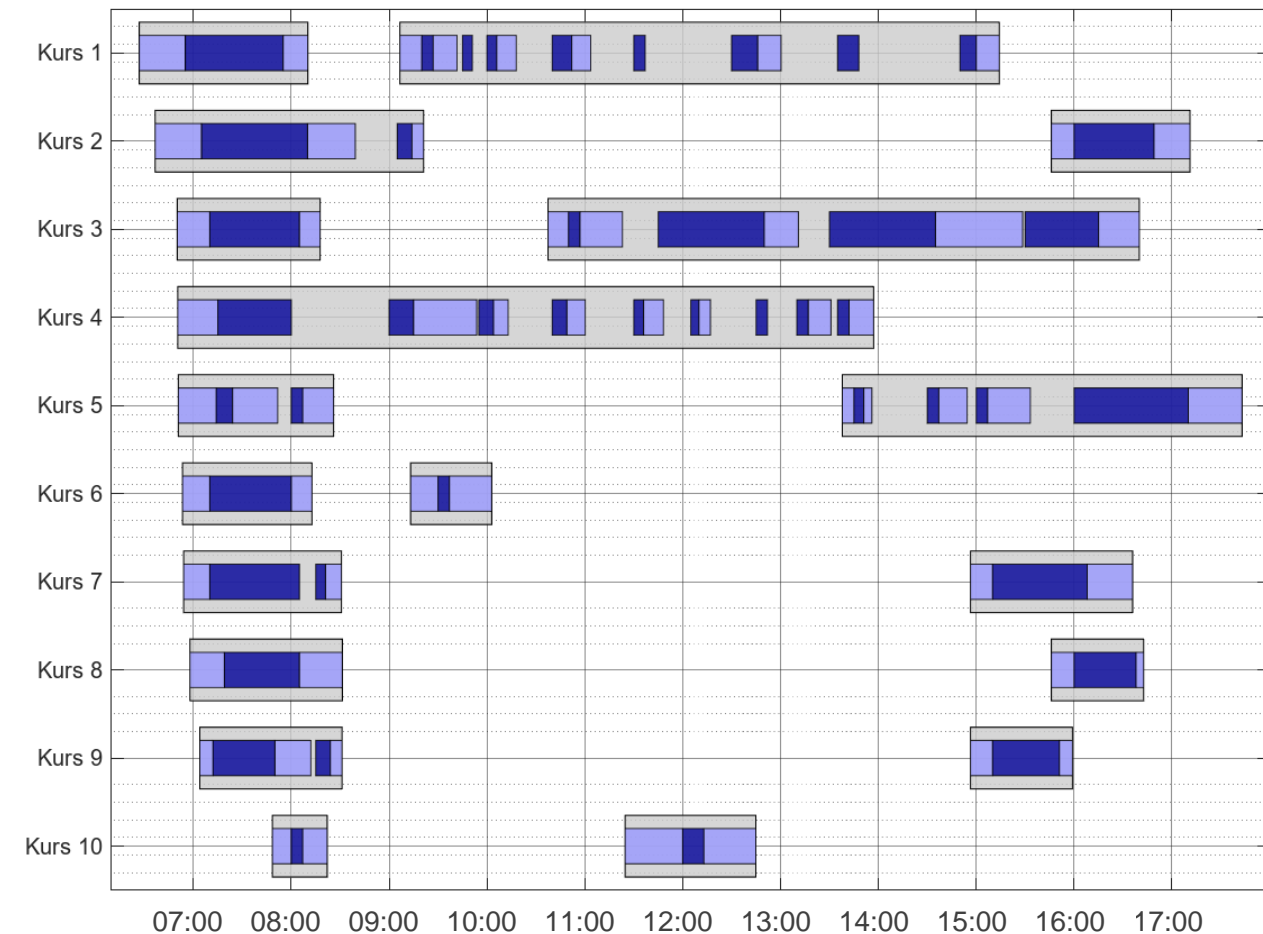
|                   | Schülerverkehr |            | Bäderverkehr |             | Fahrleistung<br>(zusammen mit 163) |                |
|-------------------|----------------|------------|--------------|-------------|------------------------------------|----------------|
|                   | Linien         | Schüler    | Linien       | Schüler     | Kilometer                          | Zeit           |
| <b>Montag</b>     | 15             | 340        | 24           | 883         | -*                                 | -*             |
| <b>Dienstag</b>   | 16             | 390        | 16           | 684         | -*                                 | -*             |
| <b>Mittwoch</b>   | <b>16</b>      | <b>390</b> | <b>24</b>    | <b>1204</b> | <b>422 km</b>                      | <b>18:02 h</b> |
| <b>Donnerstag</b> | 16             | 390        | 24           | 1020        | -*                                 | -*             |
| <b>Freitag</b>    | 16             | 390        | 21           | 754         | 419 km                             | 17:37 h        |

\* Kilometer und Zeit wurden nicht detailliert ermittelt, fallen aber geringer aus als am Mittwoch oder Freitag

|    | A | B       | C                        | D                        | E           | F | G | H       | I                         | J       |
|----|---|---------|--------------------------|--------------------------|-------------|---|---|---------|---------------------------|---------|
| 1  |   |         |                          |                          |             |   |   |         |                           |         |
| 2  |   | Uhrzeit | Start                    | Ziel                     | Schülerzahl |   |   | Uhrzeit | Linie                     | Schüler |
| 3  |   |         |                          |                          |             |   |   |         |                           |         |
| 4  |   | 08:00   | Modemannstraße           | Herler Ring              | 82          |   |   | 07:10   | Alter Mühlenweg 14        | 18      |
| 5  |   | 08:00   | Bernkastler Straße       | Gaedestraße              | 49          |   |   | 07:10   | Alter Mühlenweg 11        | 20      |
| 6  |   | 08:15   | Alter Mühlenweg          | Reitweg                  | 32          |   |   | 07:10   | Alter Mühlenweg 12        | 22      |
| 7  |   | 08:15   | Ferdinand Straße         | Höhenber Bad             | 40          |   |   |         |                           |         |
| 8  |   | 09:05   | Ferdinand Straße         | Höhenber Bad             | 40          |   |   | 06:55   | Auf dem Sandberg 10       | 11      |
| 9  |   | 09:20   | Herler Ring              | Modemannstraße           | 82          |   |   | 07:12   | Auf dem Sandberg 5        | 14      |
| 10 |   | 09:00   | Anna-Freud-Schule        | Tulpenweg                | 25          |   |   |         |                           |         |
| 11 |   | 09:30   | Gaedestraße              | Bernkastler Straße       | 49          |   |   | 07:15   | Anna-Freud-Schule         | 31      |
| 12 |   | 09:45   | Reitweg                  | Alter Mühlenweg          | 32          |   |   |         |                           |         |
| 13 |   | 09:55   | Höhenberg Bad            | Ferdinand Straße         | 40          |   |   | 07:05   | Albert-Einstein-Schule 05 | 50      |
| 14 |   | 10:00   | Alter Mühlenweg          | Reitweg                  | 32          |   |   | 07:19   | Albert-Einstein-Schule 01 | 12      |
| 15 |   | 10:40   | Breitenbachstraße        | Zündorf Bad              | 52          |   |   |         |                           |         |
| 16 |   | 10:40   | Höhenberg Bad            | Ferdinand Straße         | 40          |   |   | 15:10   | Auf dem Sandberg 5        | 14      |
| 17 |   | 10:50   | Hardtgenbuscher Kirchweg | Höhenber Bad             | 58          |   |   | 15:10   | Auf dem Sandberg 10       | 11      |
| 18 |   | 11:30   | Heerstraße               | Zündorf Bad              | 40          |   |   |         |                           |         |
| 19 |   | 11:30   | Reitweg                  | Alter Mühlenweg          | 32          |   |   | 11:45   | Albert-Einstein-Schule 05 | 50      |
| 20 |   | 12:00   | Tulpenweg                | Anna-Freud-Schule        | 25          |   |   | 13:30   | Albert-Einstein-Schule 05 | 50      |
| 21 |   | 12:05   | Falckensteinstraße       | Höhenber Bad             | 35          |   |   | 16:00   | Albert-Einstein OGS       | 10      |
| 22 |   | 12:30   | Zündorf Bad              | Breitenbachstraße        | 52          |   |   |         |                           |         |
| 23 |   | 12:45   | Hardtgenbuscher Kirchweg | Höhenber Bad             | 70          |   |   | 16:00   | Alter Mühlenweg OGS 01    | 20      |
| 24 |   | 13:10   | Höhenberg Bad            | Hardtgenbuscher Kirchweg | 58          |   |   | 16:00   | Alter Mühlenweg OGS 02    | 26      |
| 25 |   | 13:35   | Modemannstraße           | Herler Ring              | 33          |   |   |         |                           |         |
| 26 |   | 13:35   | Modemannstraße           | Lentpark                 | 34          |   |   | 15:30   | Anna-Freud-Schule         | 31      |
| 27 |   | 13:45   | Höhenberg Bad            | Falckensteinstraße       | 35          |   |   |         |                           |         |
| 28 |   | 14:30   | Höhenberg Bad            | Hardtgenbuscher Kirchweg | 70          |   |   |         |                           |         |
| 29 |   | 14:50   | Lentpark                 | Modemannstraße           | 34          |   |   |         |                           |         |
| 30 |   | 15:00   | Herler Ring              | Modemannstraße           | 33          |   |   |         |                           | 390     |
| 31 |   |         |                          |                          |             |   |   |         |                           |         |
| 32 |   |         |                          |                          | 1204        |   |   |         |                           |         |
| 33 |   |         |                          |                          |             |   |   |         |                           |         |
| 34 |   |         |                          |                          |             |   |   |         |                           |         |

- Plandaten Schüler- und Bäderverkehr an einem Mittwoch plus die Daten zur Linie 163 (→ „S+B+163“) wurden in die Simulations- und Optimierungssoftware *eplan* aufgenommen

Leerfahrt  
Linienfahrt



# AP 1 Rahmen- und Betriebsdatenanalyse

## Betriebshof

- Betriebshof der Piccolonia
  - In den Reihen 16 in 51103 Kalk

Piccolonia verfolgt aktuell, diese drei leerstehenden Gebäude entfernen zu lassen, um weiteren Platz für Busabstellung und Ladeinfrastruktur zu schaffen.

Aktuell versorgt eine Trafostation hier im Keller das Gebäude mit Strom.

Hier bestand bis vor Kurzem eine Trafostation, die evtl. reaktiviert werden könnte. Kabel sind wahrscheinlich noch vorhanden.

Gebäude steht derzeit leer.

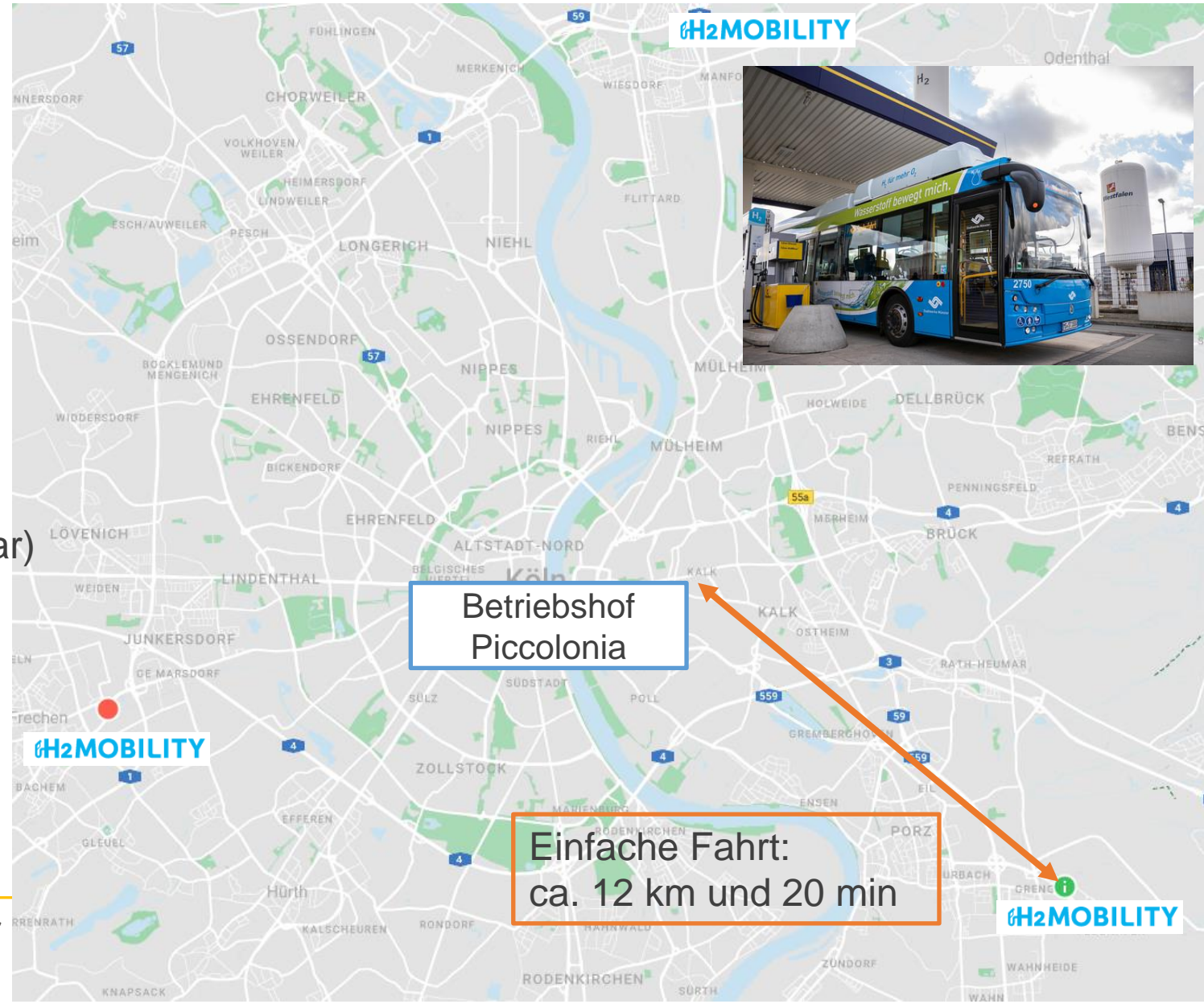
In den Reihen 16

In den Reihen 16  
51103 Köln (Kalk)

# AP 1 Rahmen- und Betriebsdatenanalyse

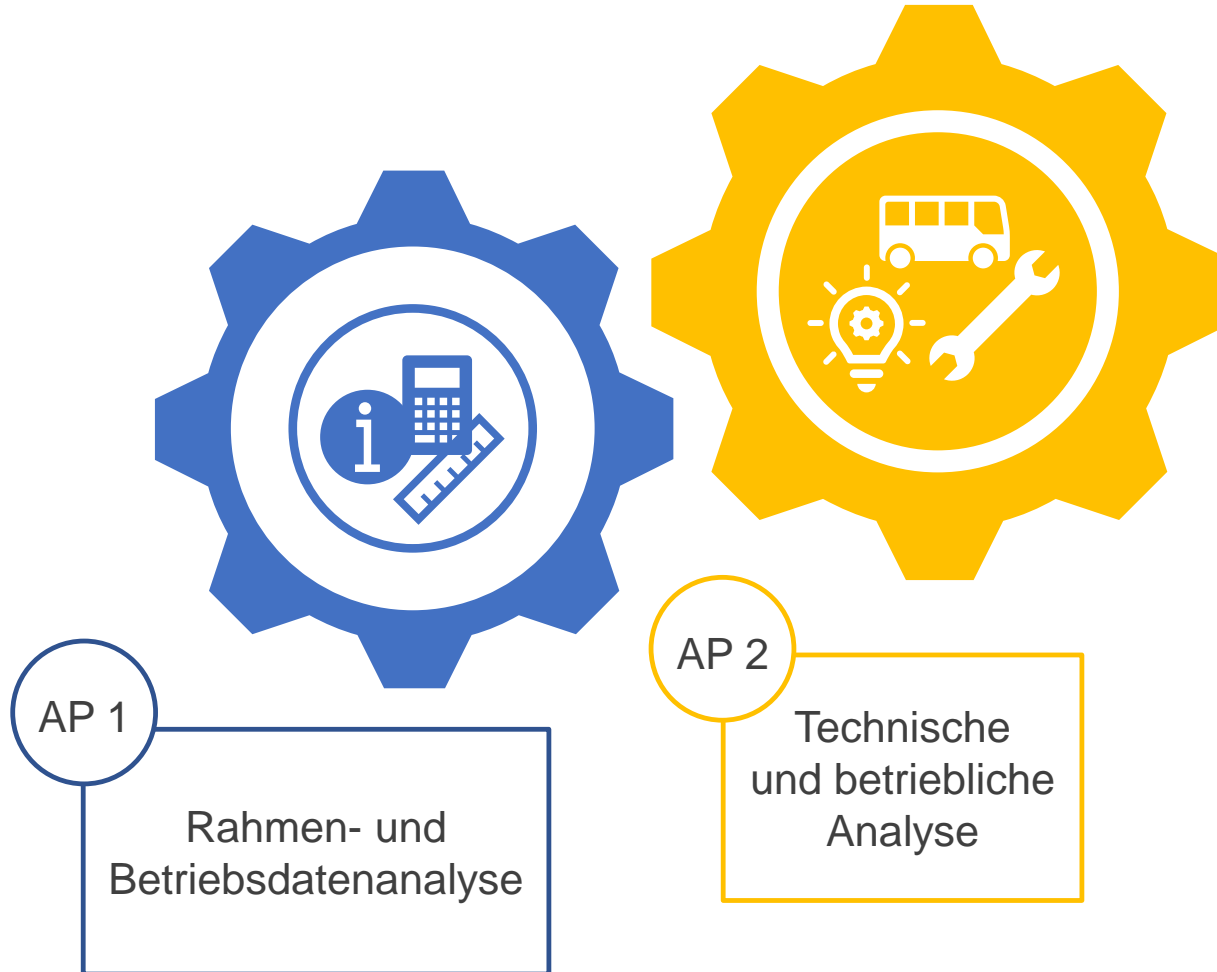
## Energieversorgungsorte – Wasserstoff-Tankstellen

- Nutzung externer Tankmöglichkeiten
- Beispiele:
  - Tankstelle am Flughafen Köln-Bonn
    - 350 bar vorhanden
  - Tankstelle in Frechen
    - 350 bar vorhanden
  - Tankstelle im Süden Leverkusens
    - 350 bar nicht vorhanden (nur 700 bar)
- Potenziell lange Leerfahrten und Bindung des Fahrpersonals
- Ggf. in Linienbetrieb integrierbar?



## AP 2 Technische und betriebliche Analyse









AP 2

Technische  
und betriebliche  
Analyse

- Die Grundlagen aus AP 1 wurden im AP 2 genutzt, um die technischen und betrieblichen Auswirkungen einer Umstellung auf alternative Antriebskonzepte zu analysieren. Dabei wurden verschiedene technische Konfigurationen untersucht.
- Für anspruchsvollere Umläufe mit hohen Fahrleistungen bedarf es betrieblicher Anpassungen. In der Analyse erfolgte eine Überarbeitung der Betriebsplanung unter den Randbedingungen der alternativen Antriebskonzepte. Es wurden Einsatzkonzepte für alle untersuchten Fahrzeugkonfigurationen erstellt und die betrieblichen Auswirkungen aufgezeigt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyseschritte detailliert dargestellt.

## AP 2 Technische und betriebliche Analyse

- Ergebnisse: Technische Machbarkeitsprüfung



- In der technischen Machbarkeitsprüfung mit betrieblichen Anpassungen wurden 4 Varianten mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Fahrten aus „Linienverkehr“ und „Schüler- u. Bäderverkehr + 163“ untersucht („Verschnitten“)
  - In der Tabelle sind die Varianten mit den jeweils angesetzten Gefäßgrößen aufgeführt
  - In den Varianten 3 und 4 wurde anhand der Personenanzahl der Fahrten (dieses betrifft die Schüler- und Bäderfahrten) die Gefäßgröße ausgewählt

| Variante | Linienverkehr   | Schüler- u. Bäderverkehr + 163 |
|----------|---|--------------------------------|
| Var. 1   | Einzel, mit Solobussen  | Einzel, mit Solobussen         |
| Var. 2   | Verschnitten, mit Solobussen  |                                |
| Var. 3   | <b>Verschnitten</b><br>- Fahrten mit >25 Personen, mit Solobussen<br>- Fahrten mit ≤25 Personen, mit Minibussen |                                |
| Var. 4   | <b>Verschnitten</b><br>- Fahrten mit >18 Personen, mit Solobussen<br>- Fahrten mit ≤18 Personen, mit Minibussen |                                |

Mit „Verschnitten“ ist gemeint, dass alle Fahrten des „Linienverkehr“ und des „Schüler- und Bäderverkehrs + 163“ zusammen verplant wurden.

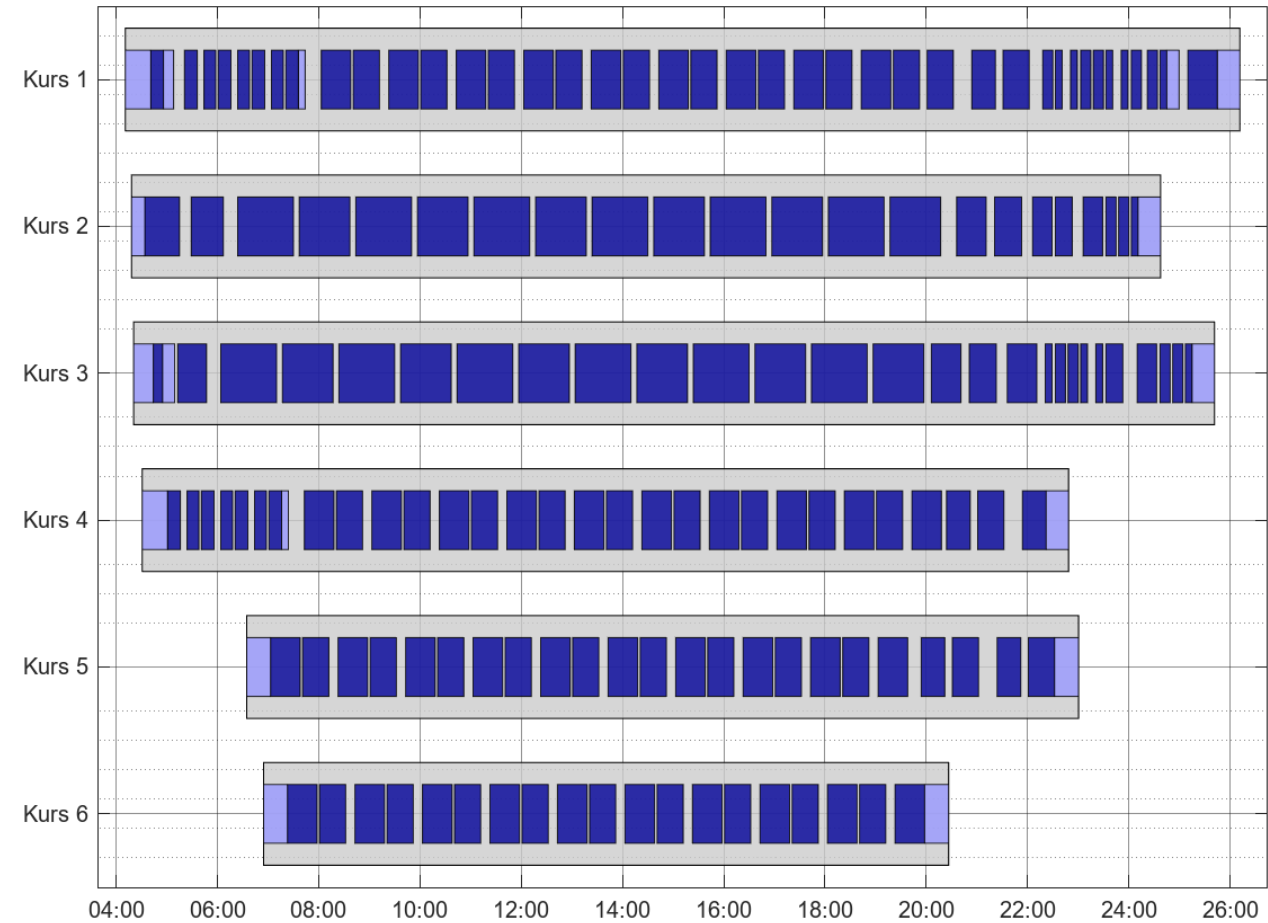
## AP 2 Technische und betriebliche Analyse

- Ergebnisse: Technische Machbarkeitsprüfung
  - Variante 1, Linienverkehr



- **Eingangsdaten**
  - Daten der KVB vom 27.09.2023 (Linie 140, 147)
  - Dieselbusse
- **Umlaufplanung**
  - 6 Busse
  - Fahrleistung (gesamt): 1536 km
  - Fahrleistung (leer): 143 km

Leerfahrt  
Linienfahrt



Dieselbus

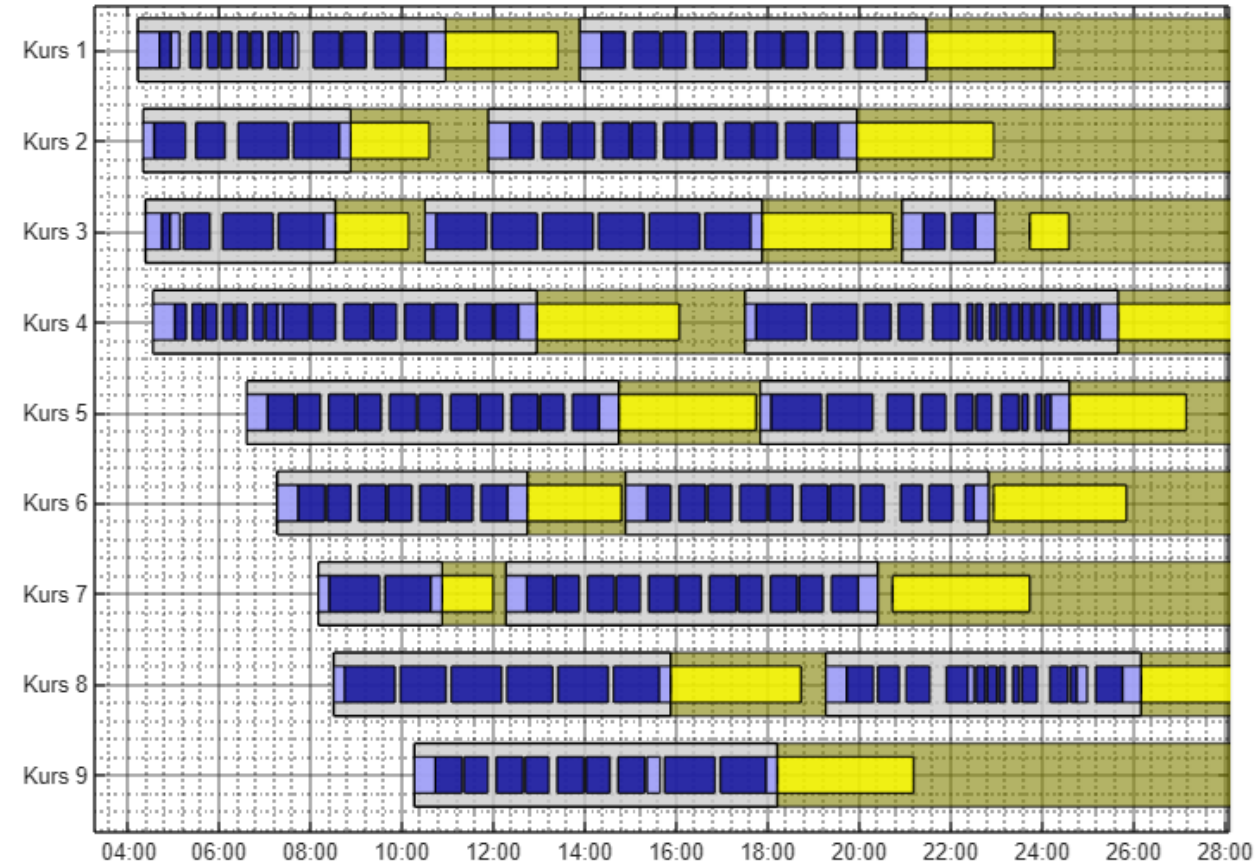
## ■ Eingangsdaten

- Daten der KVB vom 27.09.2023 (Linie 140, 147)
- Batterie-Solobusse mit elektrischer Heizung
- Batterie 425 kWh
- Ladung im Depot 120 kW

## ■ Umlaufplanung

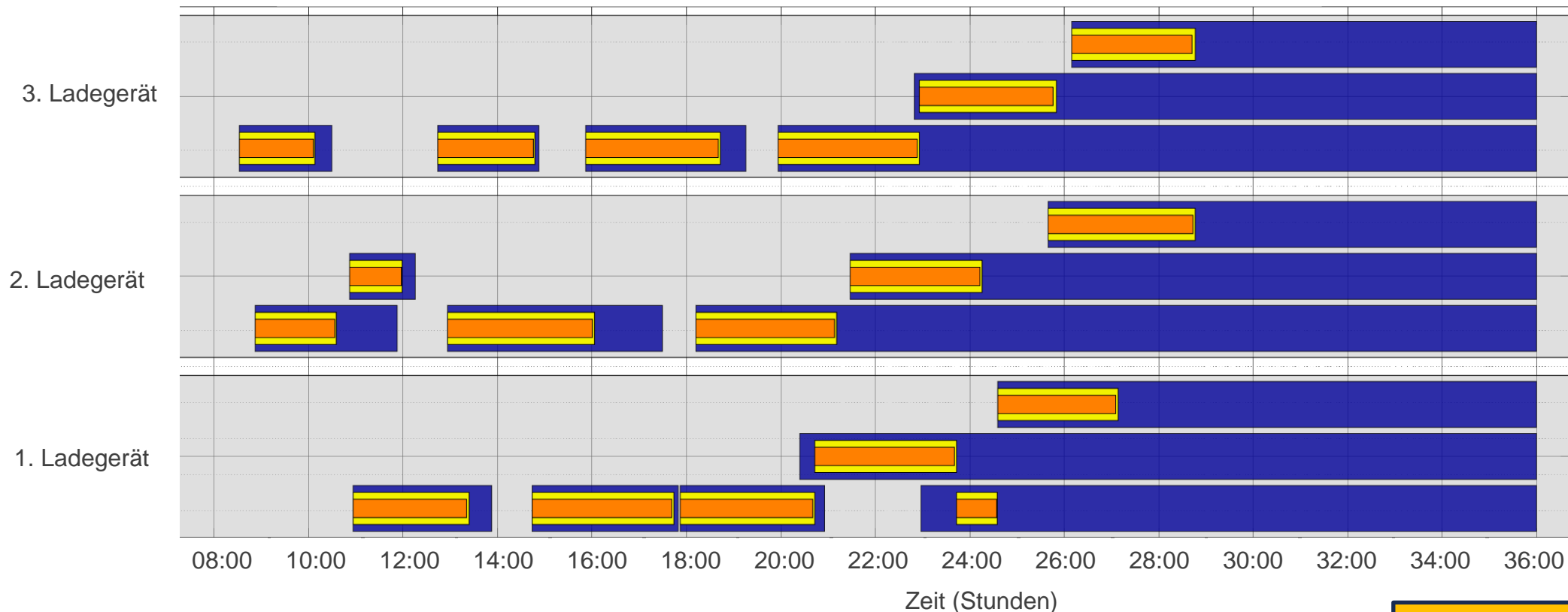
- 9 Busse / 3 Ladegeräte
- Fahrleistung (gesamt): 1766 km
- Fahrleistung (leer): 372 km

- Linienfahrt
- Leerfahrt
- Ladephase Depot

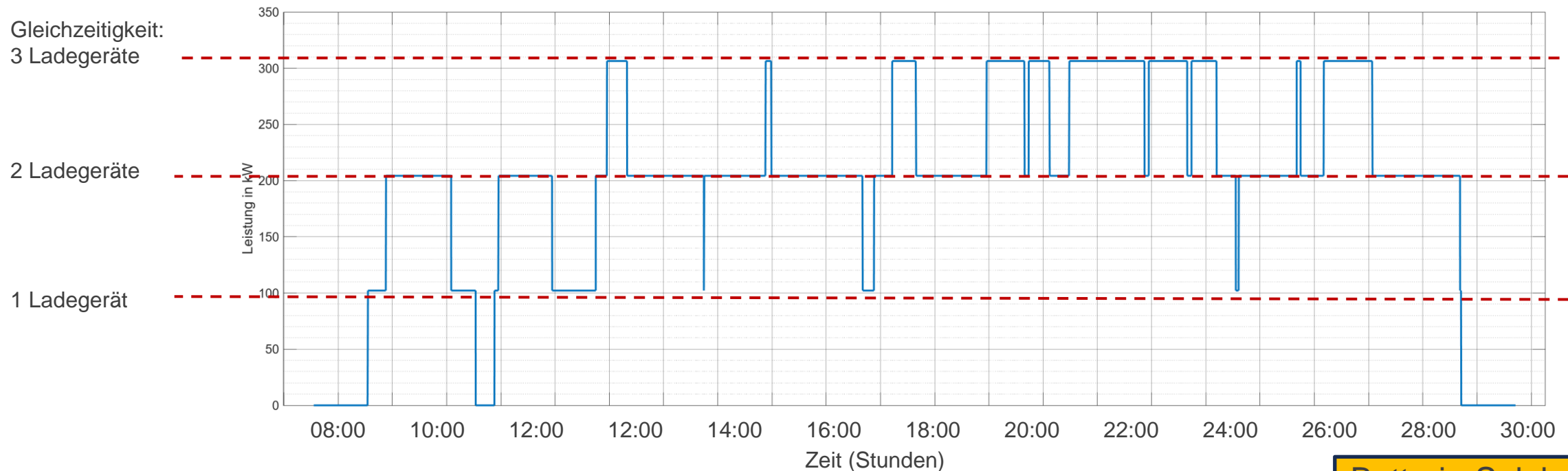


- Ladezeiten der Busse in Variante 1, Linienverkehr (Batteriebus, 425 kWh, EIHe)
  - Betrachtung des Energieverbrauchs im Worst Case (extreme Temperaturen)
  - 3 Ladegeräte

- Standzeit
- Ladefenster
- Ladezeit



- Lastgang Ladung in Variante 1, Linienverkehr (Batteriebus, 425 kWh, EIHe)
  - Betrachtung des Energieverbrauchs im Worst Case (extreme Temperaturen)
  - 3 Ladegeräte
  - Maximale abgerufene Leistung ca. 320 kW (netzseitig)





- **Eingangsdaten**
  - Daten der KVB vom 27.09.2023 (Linie 140, 147)
  - Batterie-Solobusse mit elektrischer o. Hybridheizung / Batterie 400-575 kWh / Ladung im Depot 120 kW
  - Brennstoffzellenbusse
- Ergebnisse sind von der Fahrzeugkonfiguration abhängig

| Linienverkehr (140 / 147) |                |         |              |         |                   |                            |                          |
|---------------------------|----------------|---------|--------------|---------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
|                           | Batterie [kWh] | Heizung | Anzahl Busse | Umläufe | Anzahl Ladegeräte | Fahrleistung (gesamt) [km] | Fahrleistung (leer) [km] |
| Dieselbus                 | -              | -       | 6            | 6       | -                 | 1536                       | 143                      |
| Batteriebus               | 425            | ElHe    | 9            | 18      | 3                 | 1766                       | 372                      |
|                           | 575            | ElHe    | 8            | 15      | 2                 | 1714                       | 321                      |
|                           | 400            | HyHe    | 8            | 13      | 2                 | 1667                       | 273                      |
|                           | 550            | HyHe    | 7            | 9       | 2                 | 1588                       | 194                      |
| H <sub>2</sub> -Bus       | -              | ElHe    | 7            | 8       | -                 | 1564                       | 171                      |

## AP 2 Technische und betriebliche Analyse

- Ergebnisse: Technische Machbarkeitsprüfung
  - Variante 1, Schüler- und Bäderverkehr + 163



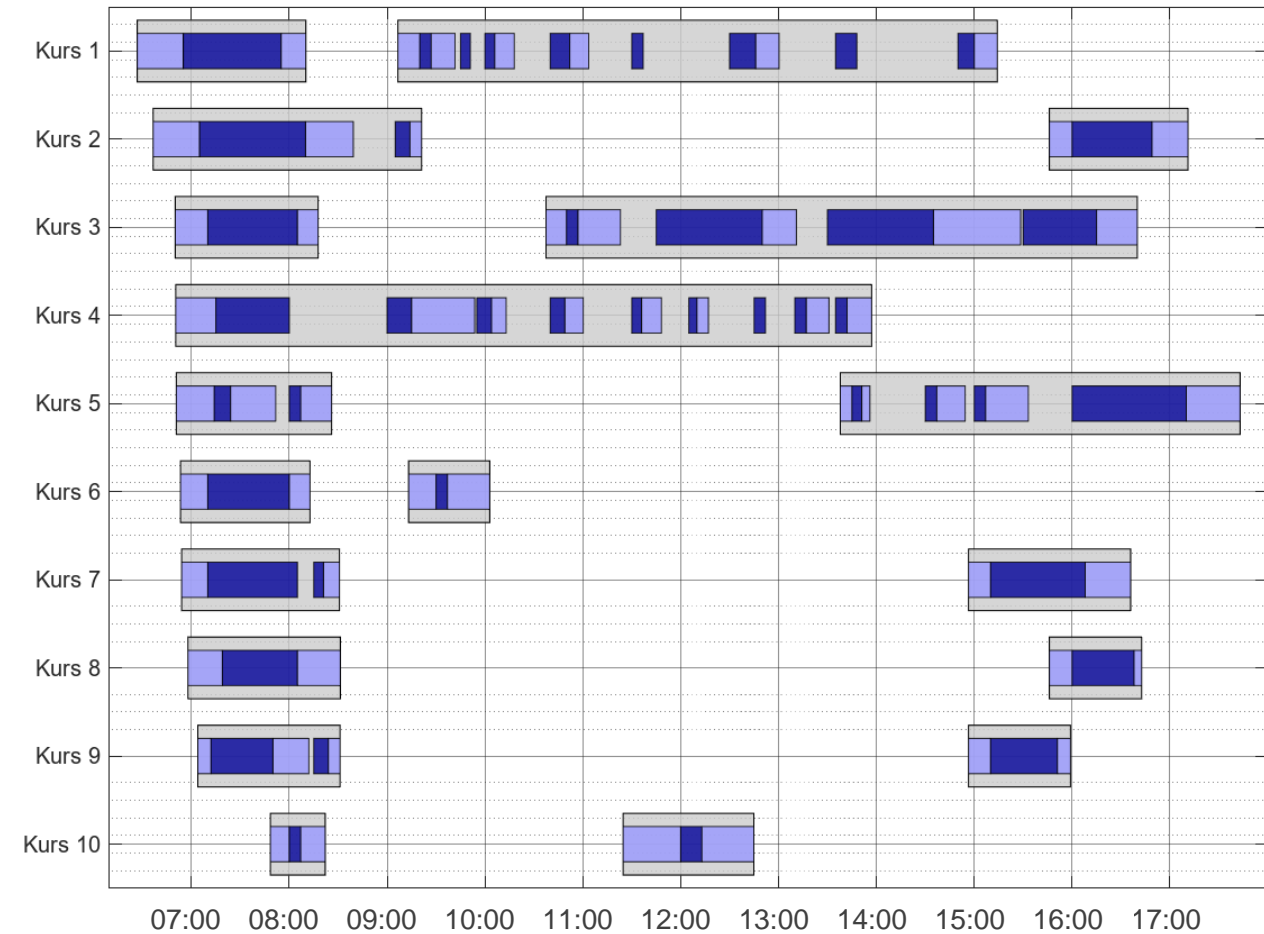
### ■ Eingangsdaten

- Plandaten S+B (Mittwoch) und Linie 163
- Dieselbusse

### ■ Umlaufplanung

- 10 Busse
- Fahrleistung (gesamt): 989 km
- Fahrleistung (leer): 567 km

■ Leerfahrt  
■ Linienfahrt



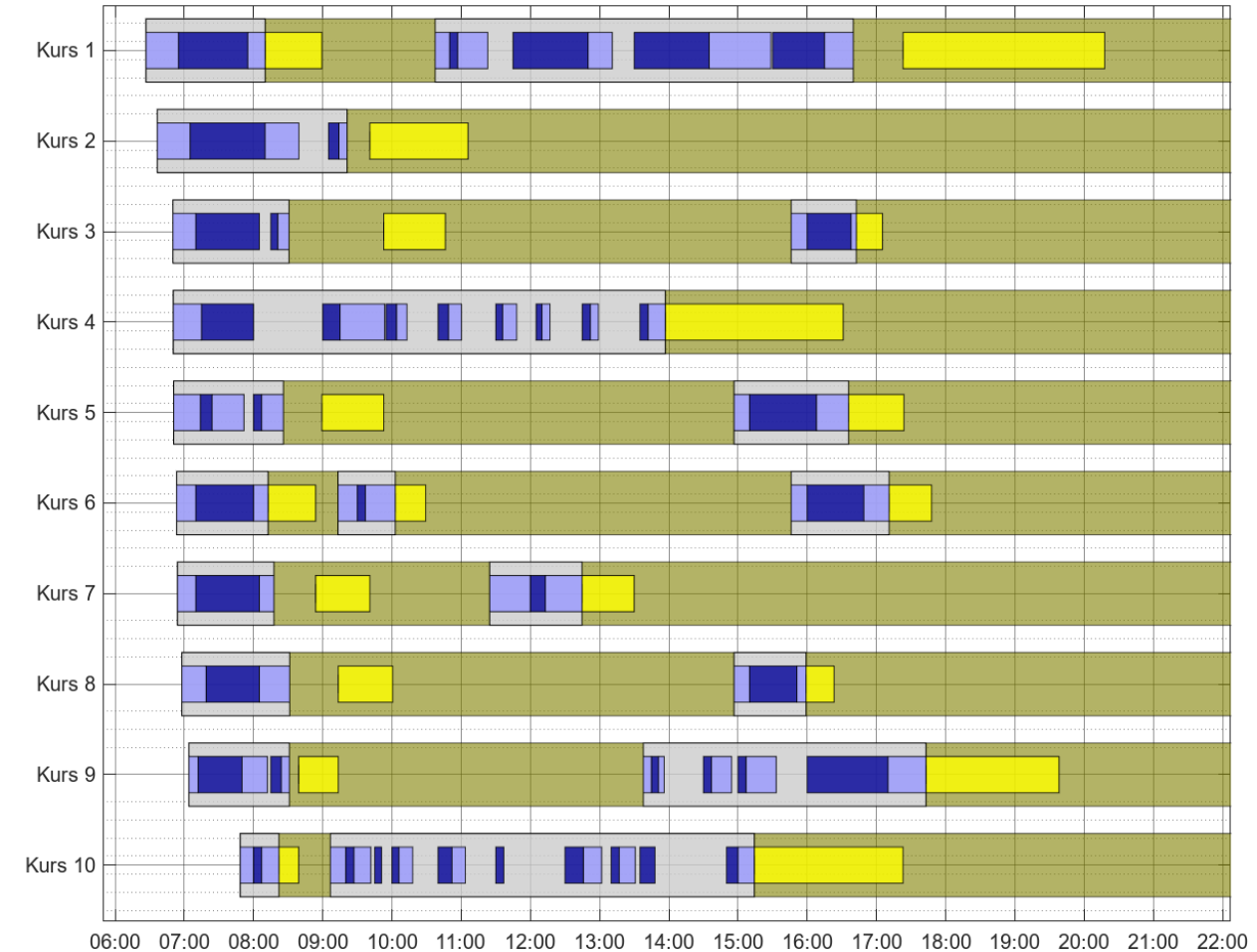
### ■ Eingangsdaten

- Plandaten S+B (Mittwoch) und Linie 163
- Batterie-Solobusse mit elektrischer Heizung
- Batterie 425 kWh
- Ladung im Depot 120 kW

### ■ Umlaufplanung

- 10 Busse / 3 Ladegeräte
- Fahrleistung (gesamt): 989 km
- Fahrleistung (leer): 567 km

- Linienfahrt
- Leerfahrt
- Ladephase Depot



- Eingangsdaten
  - Plandaten S+B (Mittwoch) und Linie 163
  - Batterie-Solobusse mit elektrischer Heizung / Batterie 425 kWh / Ladung im Depot 120 kW
- Bereits die Fahrzeugkonfiguration mit kleiner Batterie und elektrischer Heizung kommt ohne Fahrzeugmehrbedarf und zusätzliche Leerkilometer aus

| <b>S+B+163 (Mittwoch)</b> |                       |                |                     |                |                          |                                   |                                 |
|---------------------------|-----------------------|----------------|---------------------|----------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
|                           | <b>Batterie [kWh]</b> | <b>Heizung</b> | <b>Anzahl Busse</b> | <b>Umläufe</b> | <b>Anzahl Ladegeräte</b> | <b>Fahrleistung (gesamt) [km]</b> | <b>Fahrleistung (leer) [km]</b> |
| Dieselbus                 | -                     | -              | 10                  | 19             | -                        | 989                               | 567                             |
| Batteriebus               | 425                   | ElHe           | 10                  | 19             | 2                        | 989                               | 567                             |

## AP 2 Technische und betriebliche Analyse

- Ergebnisse: Technische Machbarkeitsprüfung
  - Variante 2



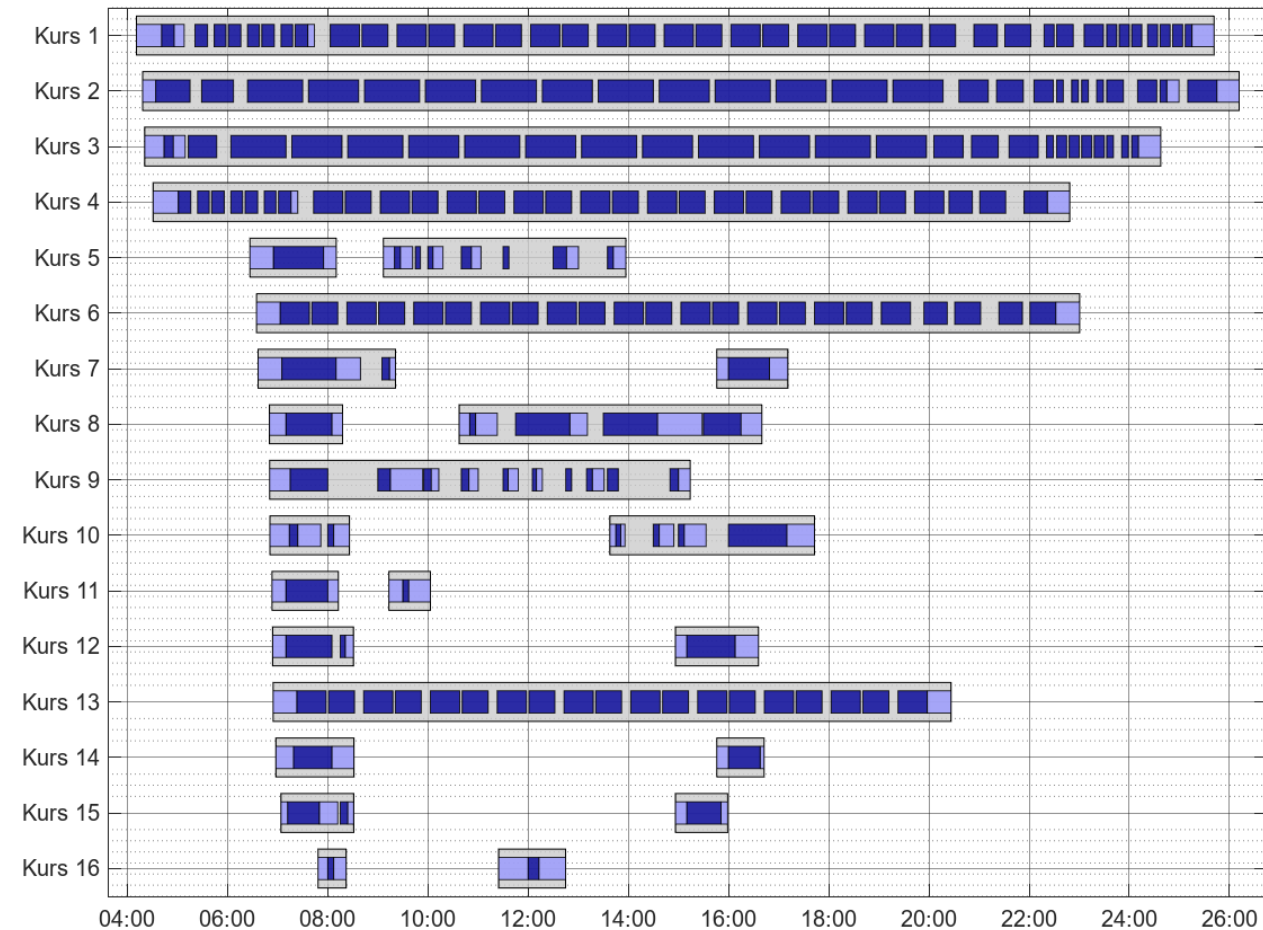
## ■ Eingangsdaten

- Daten der KVB vom 27.09.2023 (Linie 140, 147)
- Plandaten S+B (Mittwoch) und Linie 163
- Dieselbusse

## ■ Umlaufplanung

- 16 Busse
- Fahrleistung (gesamt): 2525 km
- Fahrleistung (leer): 710 km

■ Leerfahrt  
■ Linienfahrt



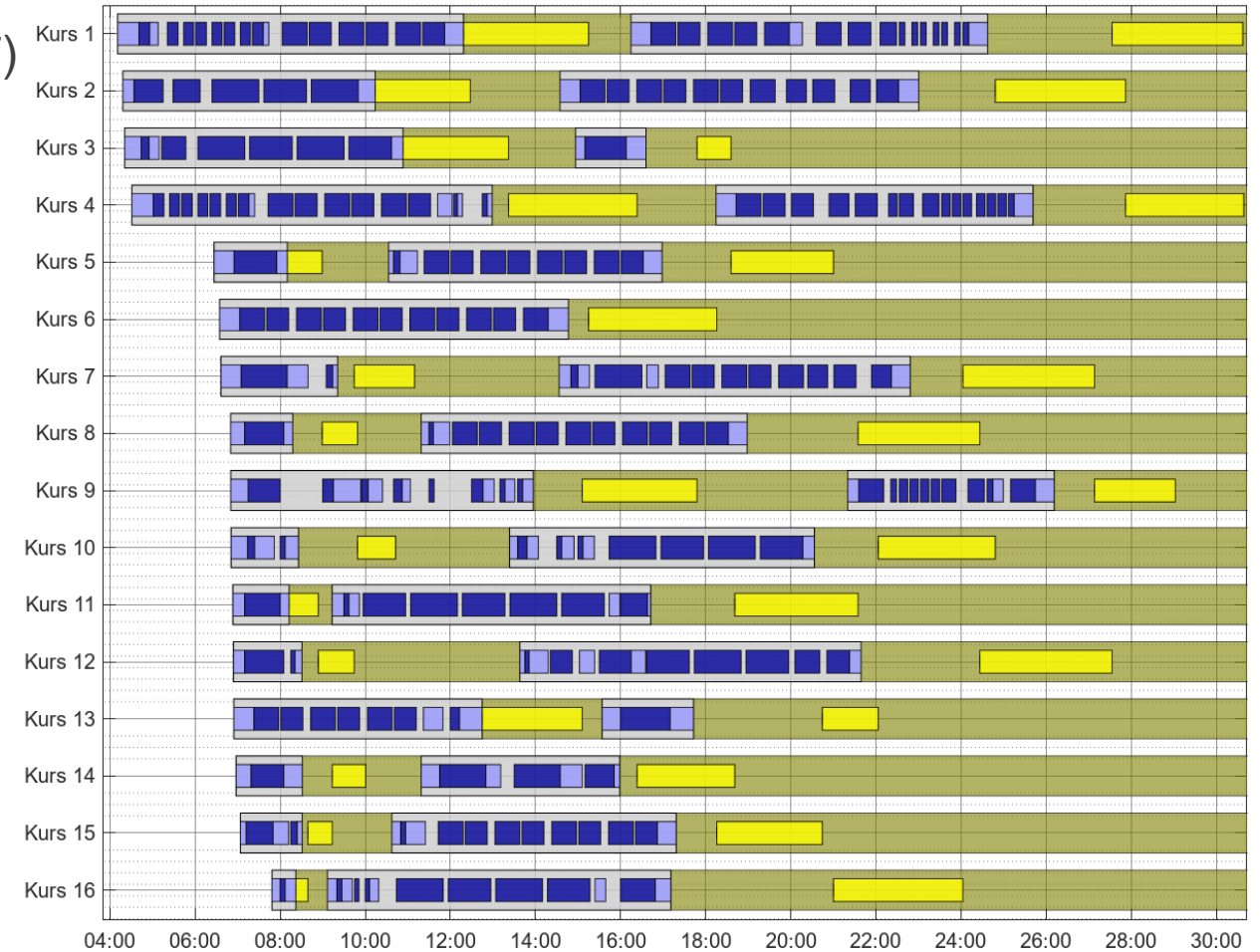
## ■ Eingangsdaten

- Daten der KVB vom 27.09.2023 (Linie 140, 147)
- Plandaten S+B (Mittwoch) und Linie 163
- Batterie-Solobusse mit elektrischer Heizung
- Batterie 425 kWh, Ladung im Depot 120 kW

## ■ Umlaufplanung

- 16 Busse / 3 Ladegeräte
- Fahrleistung (gesamt): 2712 km
- Fahrleistung (leer): 896 km

- Linienfahrt
- Leerfahrt
- Ladephase Depot

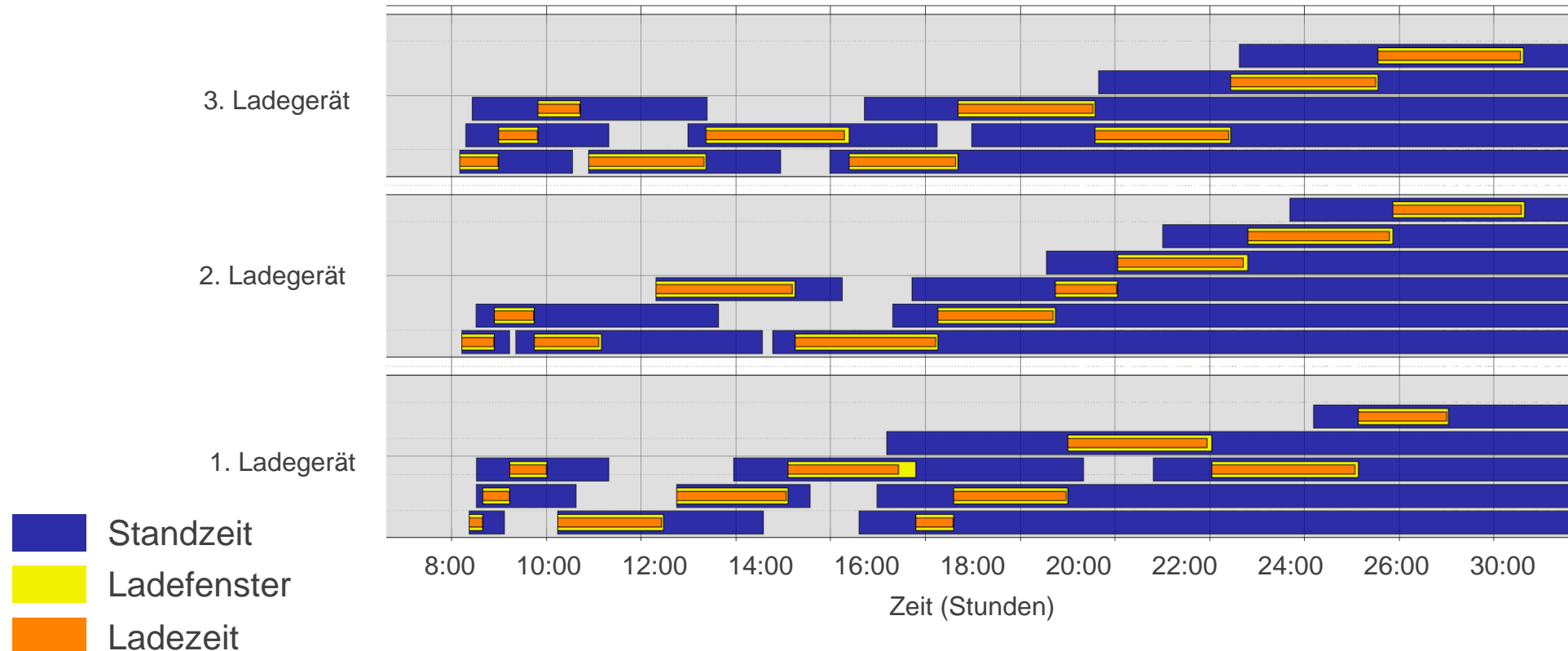




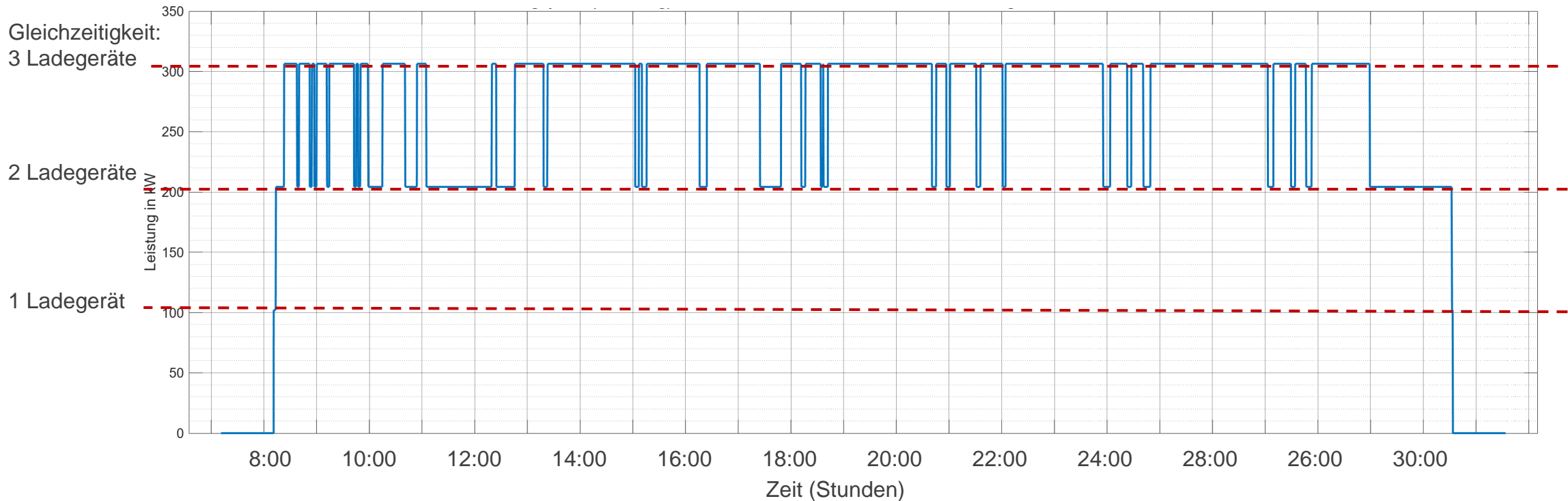
- **Eingangsdaten**
  - Daten der KVB vom 27.09.2023 (Linie 140, 147)
  - Plandaten S+B (Mittwoch) und Linie 163
  - Batterie-Solobusse mit elektrischer o. Hybridheizung / Batterie 400-575 kWh / Ladung im Depot 120 kW
  - Brennstoffzellenbusse
- Bereits die Fahrzeugkonfiguration mit kleiner Batterie und elektrischer Heizung kommt ohne Fahrzeugmehrbedarf aus

| <b>Linie+S+B+163 (Mittwoch)</b> |                       |                |                     |                          |                                   |                                 |
|---------------------------------|-----------------------|----------------|---------------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
|                                 | <b>Batterie [kWh]</b> | <b>Heizung</b> | <b>Anzahl Busse</b> | <b>Anzahl Ladegeräte</b> | <b>Fahrleistung (gesamt) [km]</b> | <b>Fahrleistung (leer) [km]</b> |
| Dieselbus                       | -                     |                | 16                  | -                        | 2525                              | 710                             |
| Batteriebus                     | 425                   | EIHe           | 16                  | 3                        | 2712                              | 896                             |
|                                 | 575                   | EIHe           | 16                  | 3                        | 2604                              | 788                             |
|                                 | 400                   | HyHe           | 16                  | 2                        | 2592                              | 776                             |
|                                 | 550                   | HyHe           | 16                  | 2                        | 2544                              | 728                             |
| H <sub>2</sub> -Bus             | -                     | EIHe           | 16                  | -                        | 2544                              | 729                             |

- Ladezeiten der Busse in Variante 2 (Batteriebus, 425 kWh, EIHe)
  - Betrachtung des Energieverbrauchs im Worst Case (extreme Temperaturen)
  - 3 Ladegeräte



- Lastgang Ladung in Variante 2 (Batteriebus, 425 kWh, EIHe)
  - Betrachtung des Energieverbrauchs im Worst Case (extreme Temperaturen)
  - 3 Ladegeräte
  - Maximale abgerufene Leistung ca. 320 kW (netzseitig)



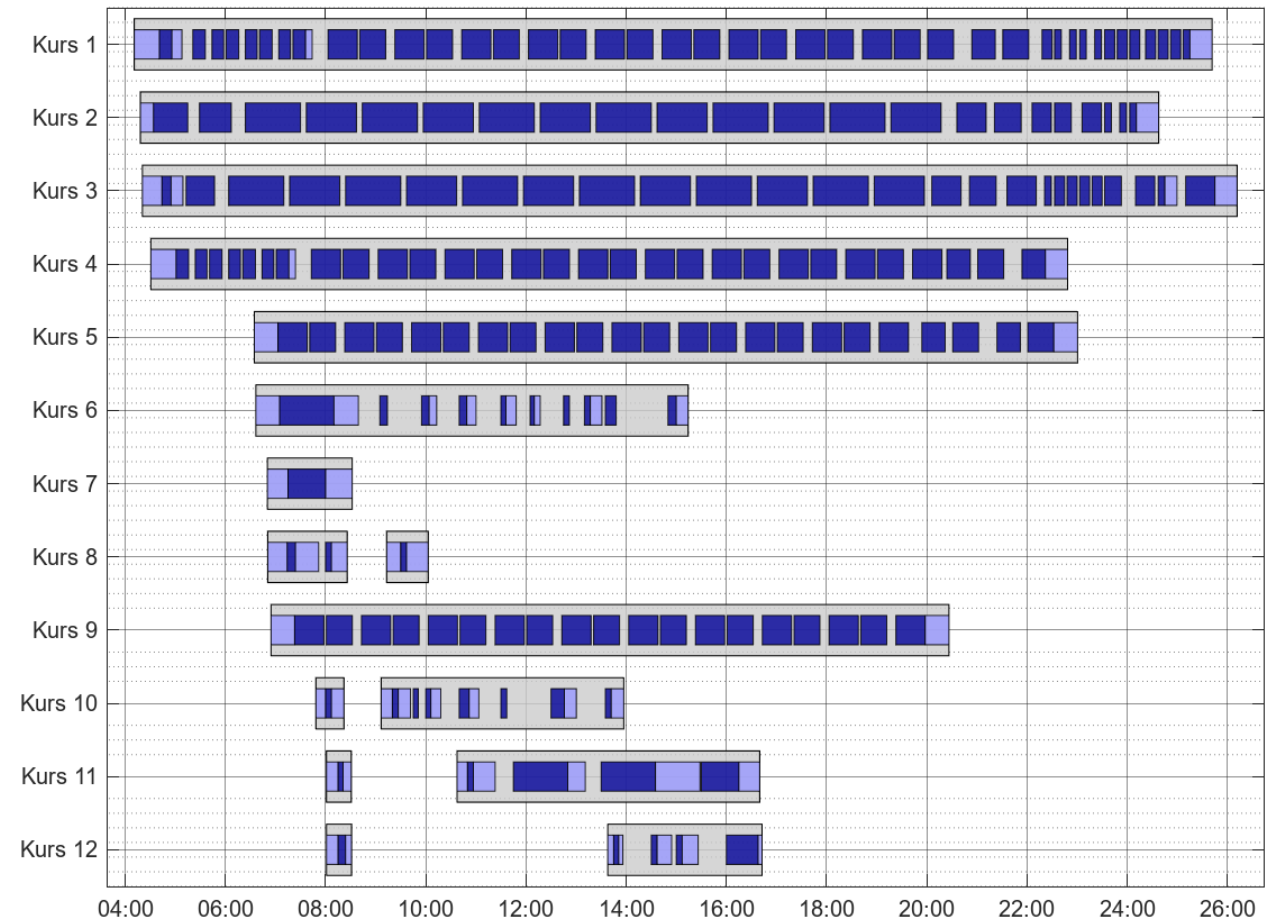
## AP 2 Technische und betriebliche Analyse

- Ergebnisse: Technische Machbarkeitsprüfung
  - Variante 3



- Eingangsdaten
  - Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
    - Nur Solobusse (Linie, S+B >25 Personen)
  - Dieselbusse
- Umlaufplanung
  - 12 Busse
  - Fahrleistung (gesamt): 2088 km
  - Fahrleistung (leer): 485 km

Leerfahrt  
Linienfahrt



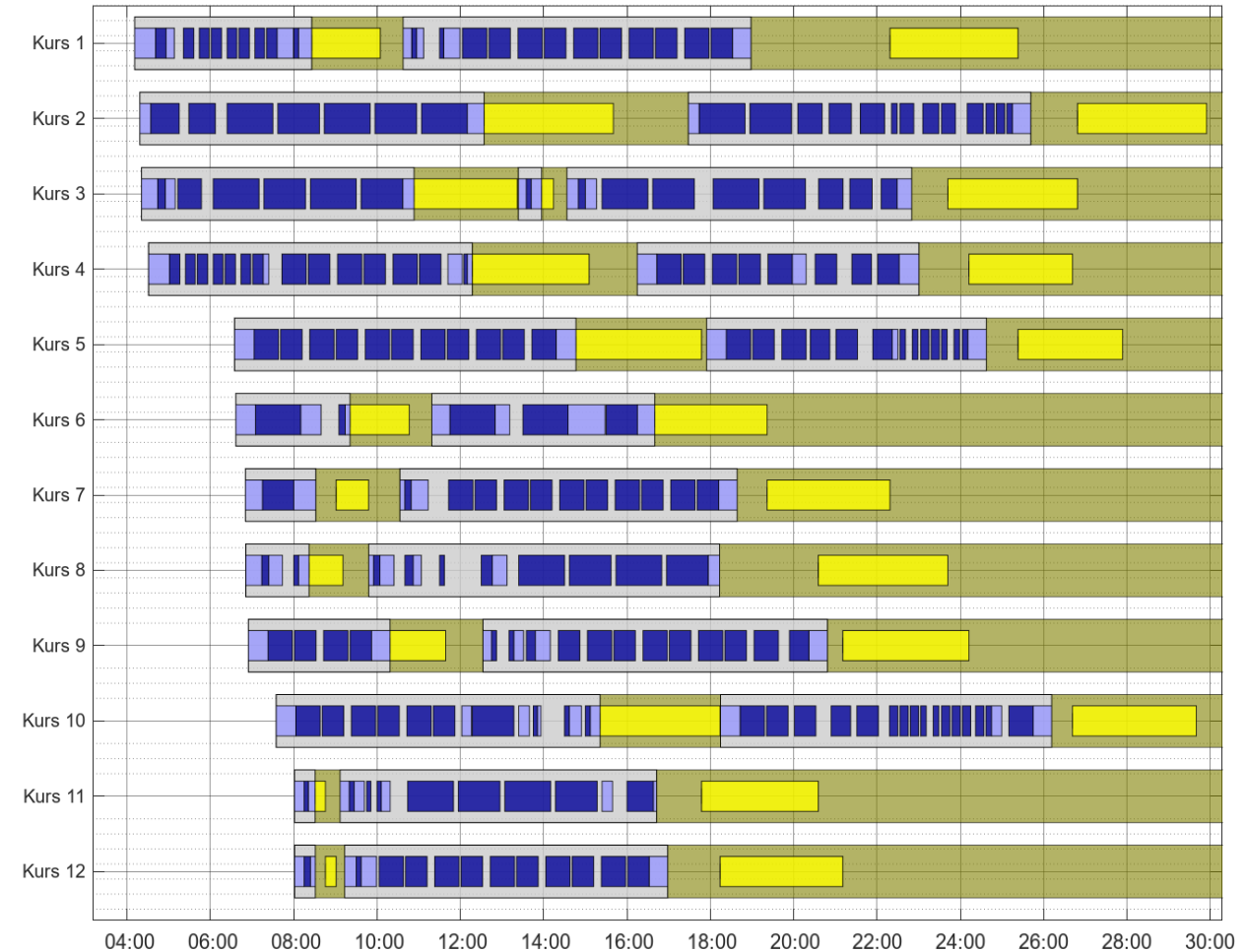
### ■ Eingangsdaten

- Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
  - Nur Solobusse (Linie, S+B >25 Personen)
- Batterie-Solobusse mit elektrischer Heizung
- Batterie 425 kWh, Ladung im Depot 120 kW

### ■ Umlaufplanung

- 12 Busse / 3 Ladegeräte
- Fahrleistung (gesamt): 2296 km
- Fahrleistung (leer): 693 km

- Linienfahrt
- Leerfahrt
- Ladephase Depot

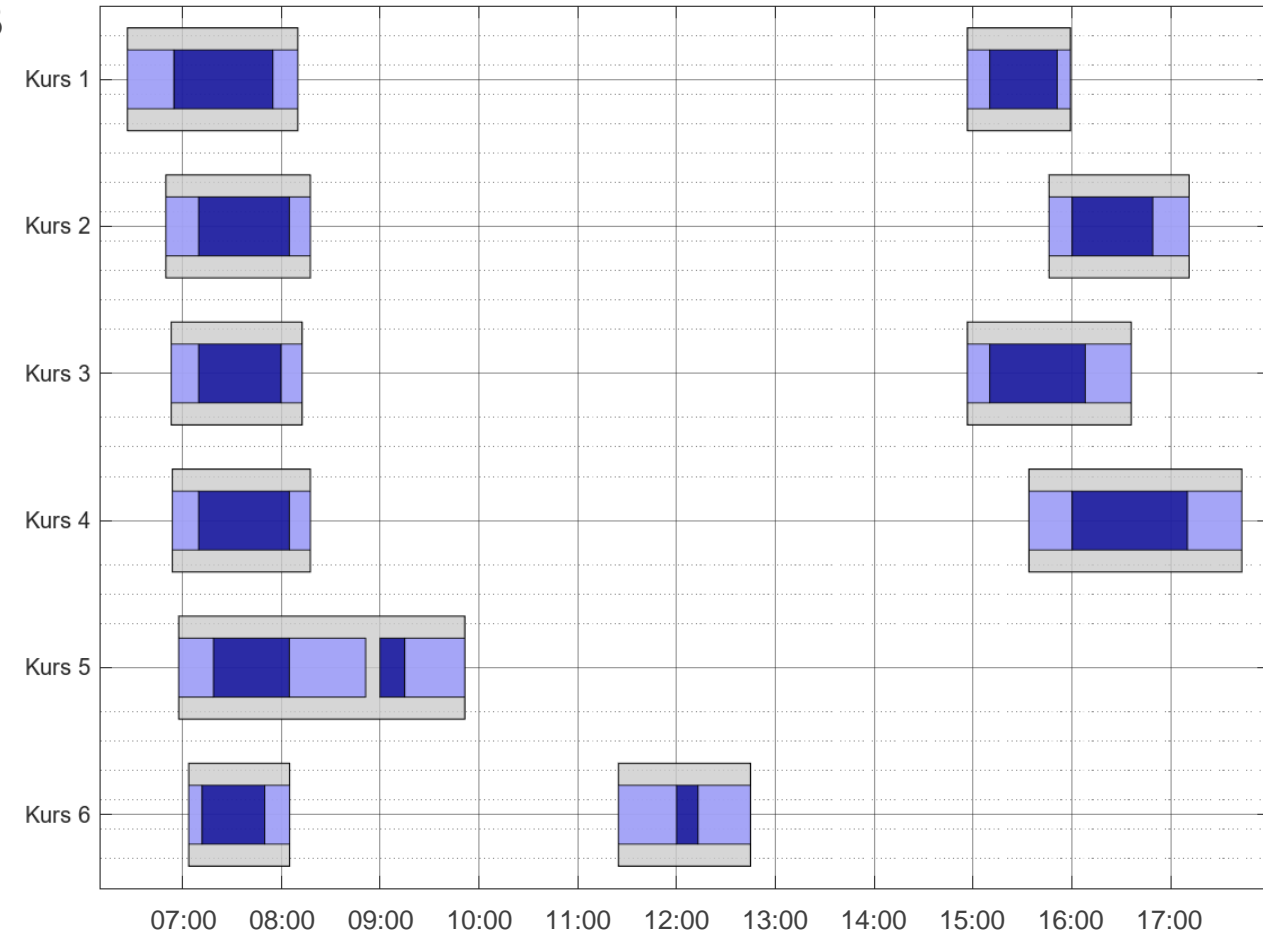


- **Eingangsdaten**
  - Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163, nur Solobusse (Linie, S+B >25 Personen)
  - Batterie-Solobusse mit elektrischer o. Hybridheizung / Batterie 400-575 kWh / Ladung im Depot 120 kW
  - Brennstoffzellenbusse
- Bereits die Fahrzeugkonfiguration mit kleiner Batterie und elektrischer Heizung kommt ohne Fahrzeugmehrbedarf aus

| Linie+S+B+163 (Mittwoch), nur Solobusse (ab 25 Pers.) |                |         |              |                   |                            |                          |
|---|----------------|---------|--------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
|   | Batterie [kWh] | Heizung | Anzahl Busse | Anzahl Ladegeräte | Fahrleistung (gesamt) [km] | Fahrleistung (leer) [km] |
| Dieselbus   | -              | -       | 12           | -                 | 2088                       | 485                      |
| Batteriebus   | 425            | EIHe    | 12           | 3                 | 2296                       | 693                      |
|   | 575            | EIHe    | 12           | 3                 | 2190                       | 587                      |
|   | 400            | HyHe    | 12           | 2                 | 2167                       | 564                      |
|   | 550            | HyHe    | 12           | 2                 | 2103                       | 501                      |
| H <sub>2</sub> -Bus                                   | -              | EIHe    | 12           | -                 | 2131                       | 528                      |

- Eingangsdaten
  - Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
    - Nur Minibusse (Fahrten mit max. 25 Pers.)
  - Dieselbusse
- Umlaufplanung
  - 6 Busse
  - Fahrleistung (gesamt): 475 km
  - Fahrleistung (leer): 262 km

Leerfahrt  
Linienfahrt





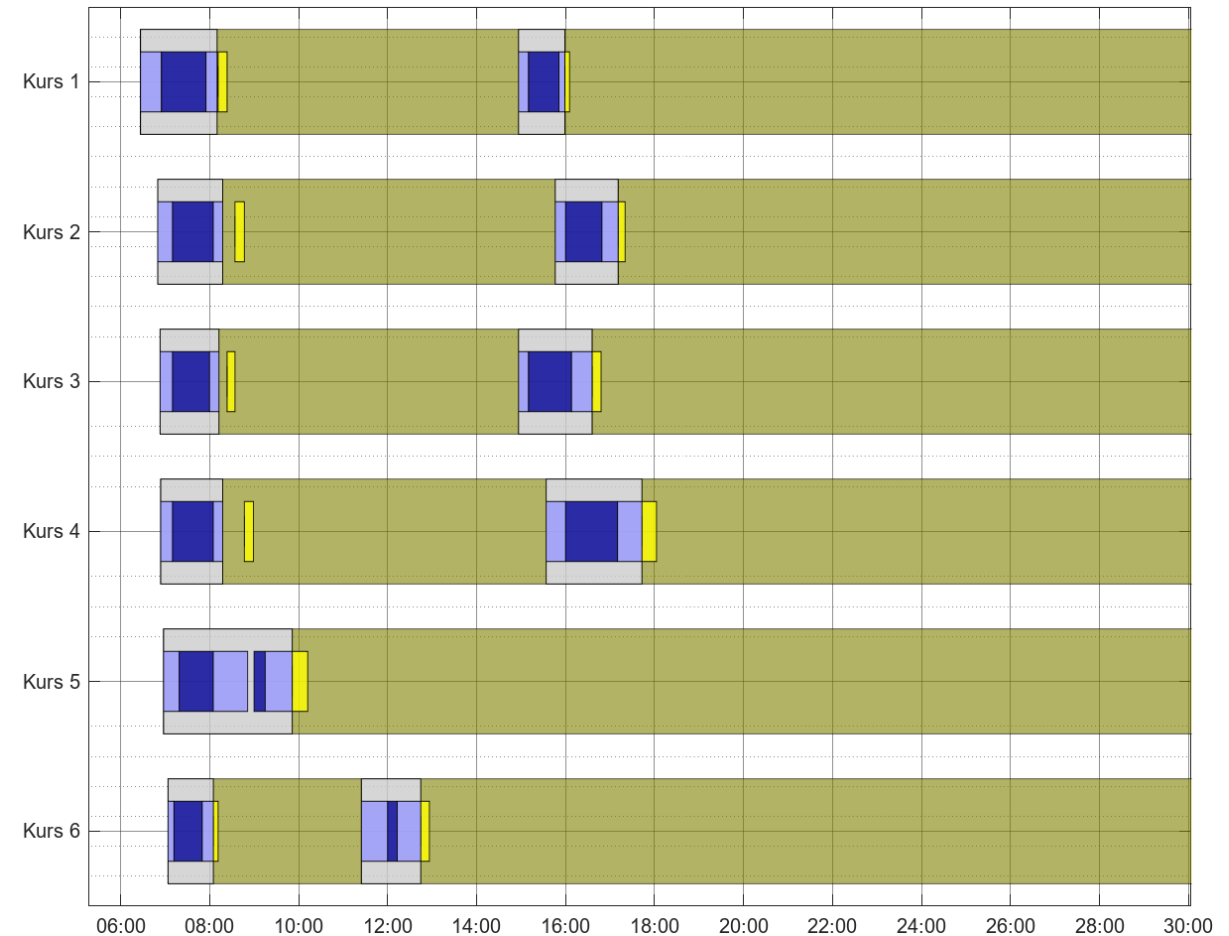
### ■ Eingangsdaten

- Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
  - Nur Minibusse (Fahrten mit max. 25 Personen)
- Batterie-Minibusse mit Hybridheizung
- Batterie 115 kWh, Ladung im Depot 100 kW

### ■ Umlaufplanung

- 6 Busse / 1 Ladegerät
- Fahrleistung (gesamt): 475 km
- Fahrleistung (leer): 262 km

- Linienfahrt
- Leerfahrt
- Ladephase Depot



### ■ Eingangsdaten

- Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163, nur Minibusse (Fahrten mit max. 25 Personen)
- Batterie-Minibusse mit Hybridheizung / Batterie 115 kWh / Ladung im Depot 100 kW
- Brennstoffzellen-Minibusse sind auf dem Markt nicht verfügbar

| Linie+S+B+163 (Mittwoch), nur Minibusse (mit max. 25 Personen) |                |         |              |         |                   |                            |                          |
|--|----------------|---------|--------------|---------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
|  | Batterie [kWh] | Heizung | Anzahl Busse | Umläufe | Anzahl Ladegeräte | Fahrleistung (gesamt) [km] | Fahrleistung (leer) [km] |
| Dieselbus  | -              | -       | 6            | 11      | -                 | 475                        | 262                      |
| Batteriebus  | 115            | HyHe    | 6            | 11      | 1                 | 475                        | 262                      |

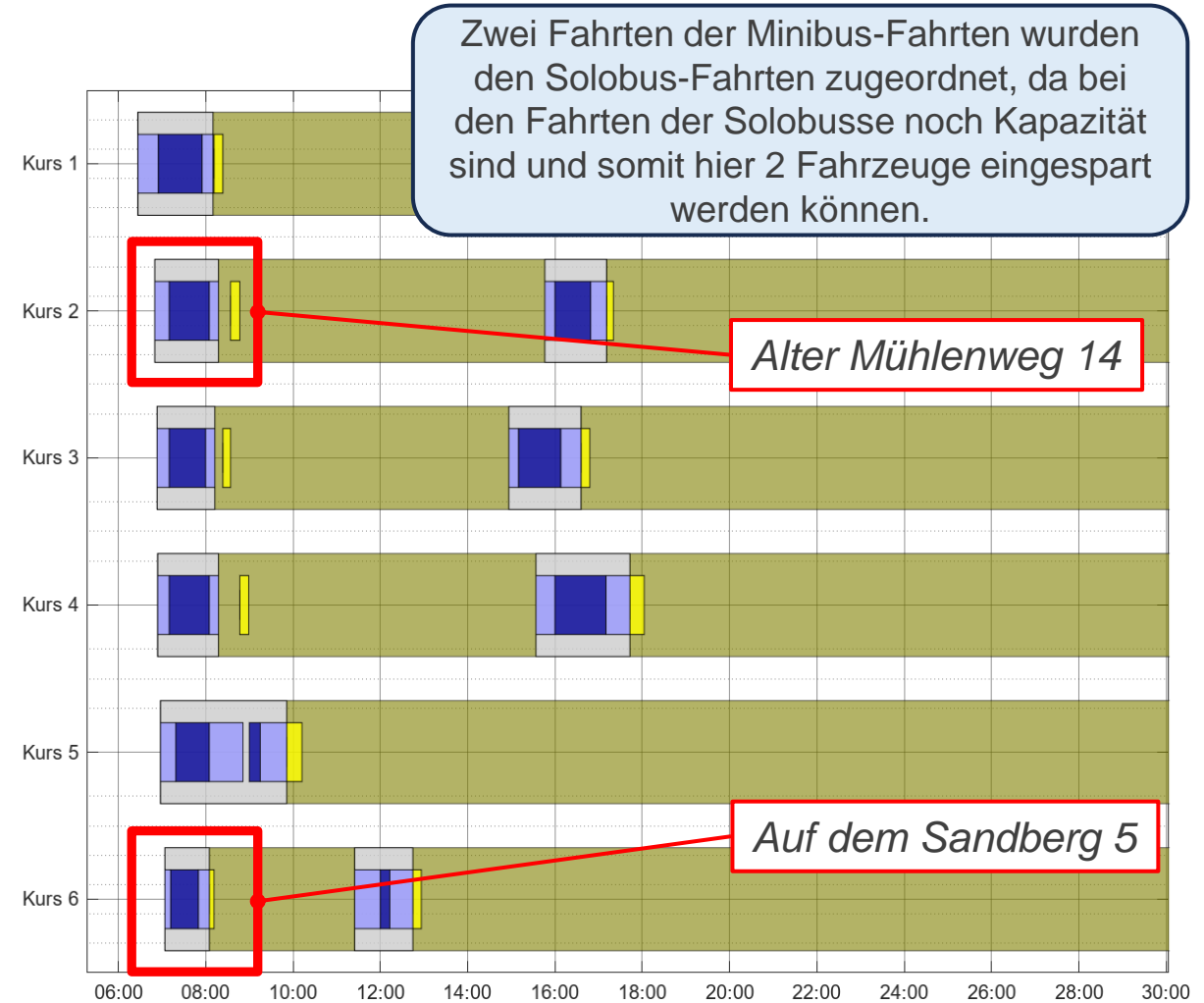
### ■ Eingangsdaten

- Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
  - Nur Minibusse (Fahrten mit max. 25 Personen)
- Batterie-Minibusse mit Hybridheizung
- Batterie 115 kWh, Ladung im Depot 100 kW

### ■ Umlaufplanung

- 6 Busse / 1 Ladegerät
- Fahrleistung (gesamt): 475 km
- Fahrleistung (leer): 262 km

- Linienfahrt
- Leerfahrt
- Ladephase Depot



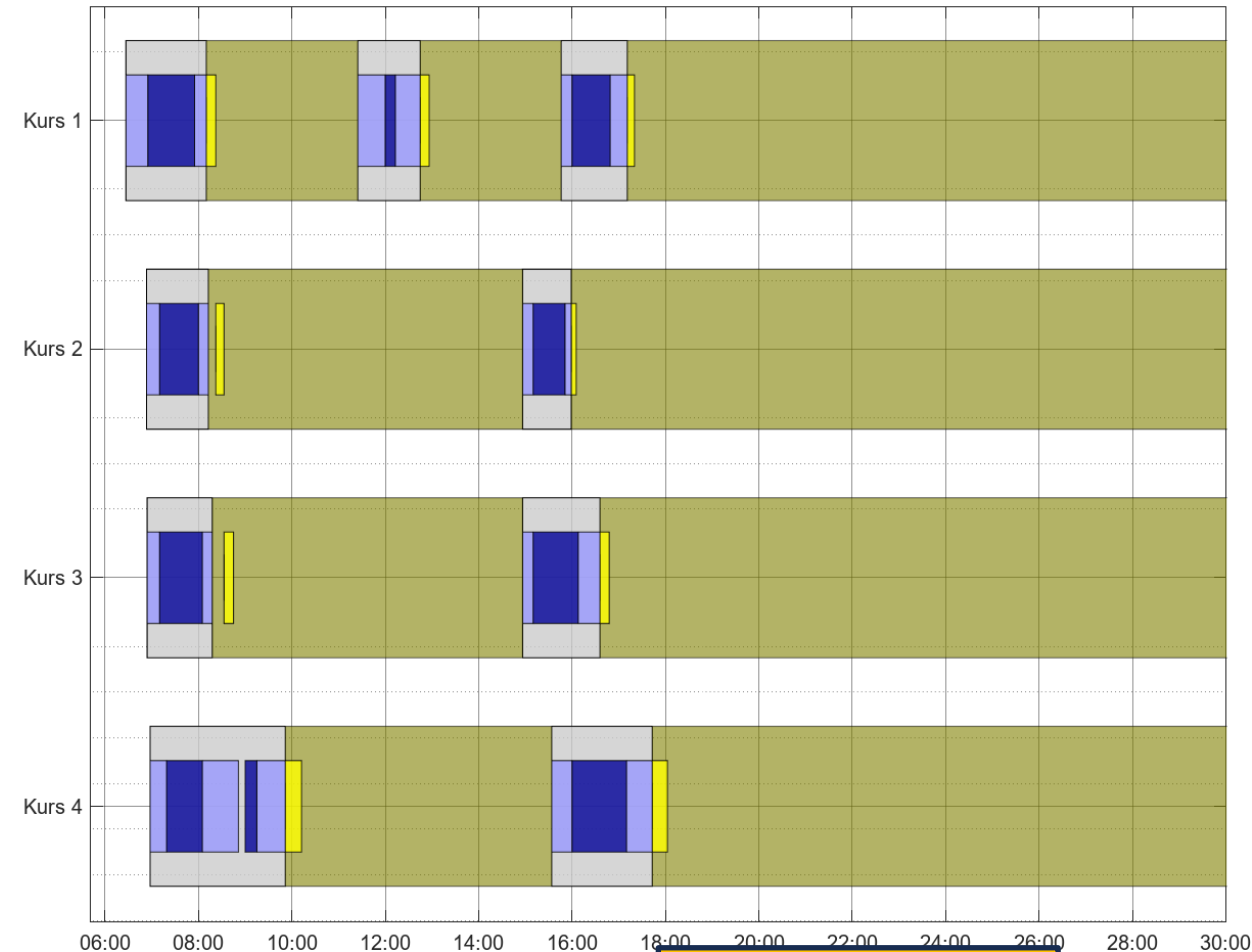
### ■ Eingangsdaten

- Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
  - Nur Minibusse (Fahrten mit max. 25 Personen)
  - Minus 2 Fahrten, die jetzt bei Solobusse sind
- Batterie-Minibusse mit Hybridheizung
- Batterie 115 kWh, Ladung im Depot 100 kW

### ■ Umlaufplanung

- 4 Busse / 1 Ladegerät
- Fahrleistung (gesamt): 413 km
- Fahrleistung (leer): 233 km

- Linienfahrt
- Leerfahrt
- Ladephase Depot



### ■ Eingangsdaten

- Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
  - Nur Solobusse (Linie, S+B >25 Personen)
  - Plus 2 Fahrten der Minibus-Fahrten
- Batterie-Solobusse mit elektrischer Heizung
- Batterie 425 kWh, Ladung im Depot 120 kW

### ■ Umlaufplanung

- 12 Busse / 3 Ladegeräte
- Fahrleistung (gesamt): 2306 km
- Fahrleistung (leer): 670 km

- Linienfahrt
- Leerfahrt
- Ladephase Depot



- Bereits die Fahrzeugkonfiguration der Solobusse mit kleiner Batterie und elektrischer Heizung kommt ohne Fahrzeugmehrbedarf aus

| Linie+S+B+163 (Mittwoch), nur Solobusse (+2 Fahrten der Minibus-Fahrten) |                |         |              |                   |                            |                          |
|--|----------------|---------|--------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
|  | Batterie [kWh] | Heizung | Anzahl Busse | Anzahl Ladegeräte | Fahrleistung (gesamt) [km] | Fahrleistung (leer) [km] |
| Dieselbus  | -              | -       | 12           | -                 | 2150                       | 514                      |
| Batteriebus  | 425            | ElHe    | 12           | 4                 | 2306                       | 670                      |
|  | 575            | ElHe    | 12           | 3                 | 2231                       | 595                      |
|  | 400            | HyHe    | 12           | 2                 | 2211                       | 575                      |
|  | 550            | HyHe    | 12           | 2                 | 2142                       | 506                      |
| H <sub>2</sub> -Bus  | -              | ElHe    | 12           | -                 | 2160                       | 524                      |

| Linie+S+B+163 (Mittwoch), nur Minibusse (mit max. 25 Personen) (-2 Fahrten, die jetzt bei SB sind) |                |         |              |                   |                            |                          |
|--|----------------|---------|--------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
|  | Batterie [kWh] | Heizung | Anzahl Busse | Anzahl Ladegeräte | Fahrleistung (gesamt) [km] | Fahrleistung (leer) [km] |
| Dieselbus  | -              | -       | 4            | 1                 | 413                        | 233                      |
| Batteriebus  | 115            | HyHe    | 4            | 1                 | 413                        | 233                      |

## AP 2 Technische und betriebliche Analyse

- Ergebnisse: Technische Machbarkeitsprüfung
  - Variante 4



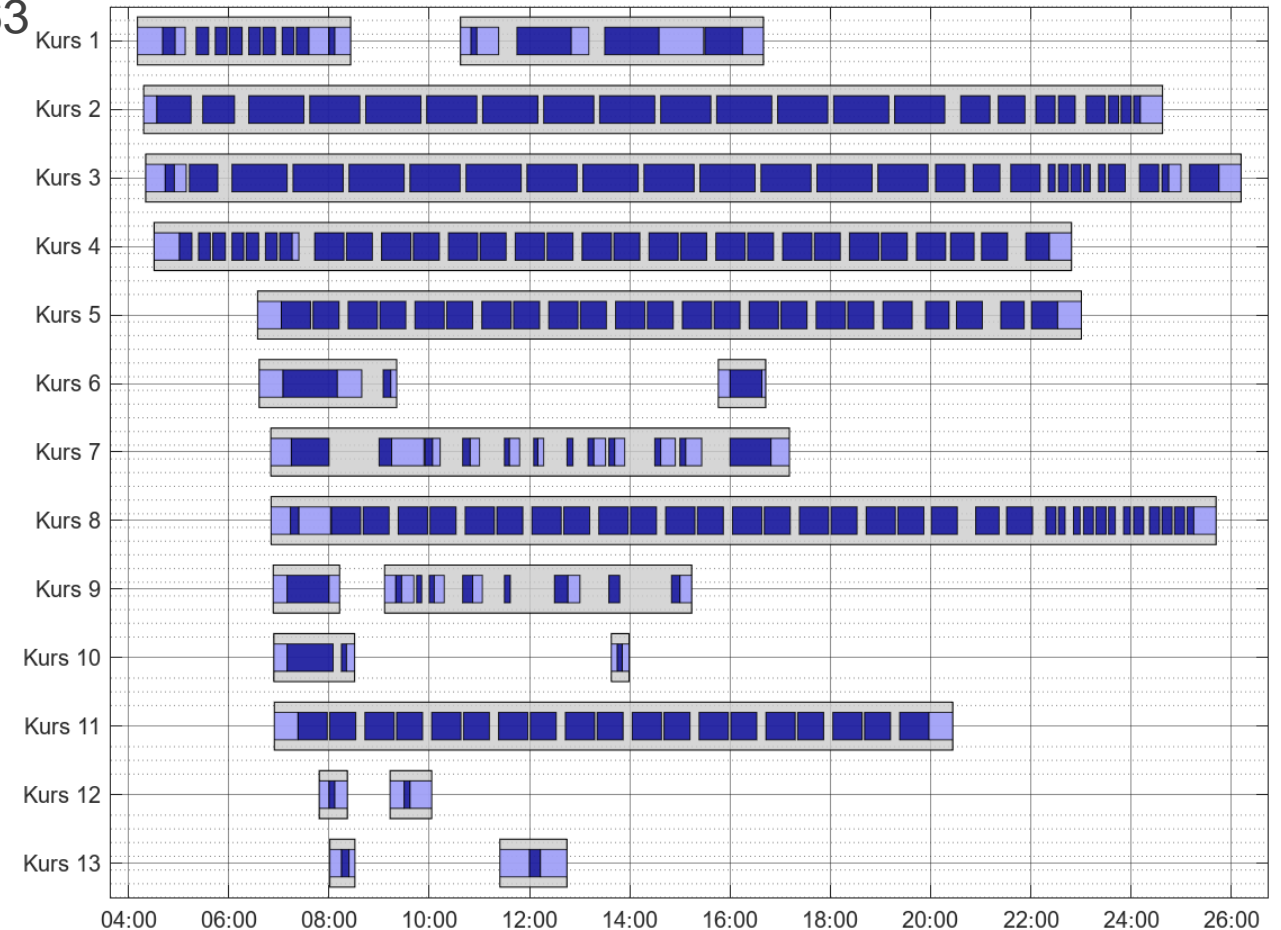
### ■ Eingangsdaten

- Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
  - Nur Solobusse (Linie, S+B >18 Personen)
- Dieselsebusse

### ■ Umlaufplanung

- 13 Busse
- Fahrleistung (gesamt): 2257 km
- Fahrleistung (leer): 571 km

■ Leerfahrt  
■ Linienfahrt





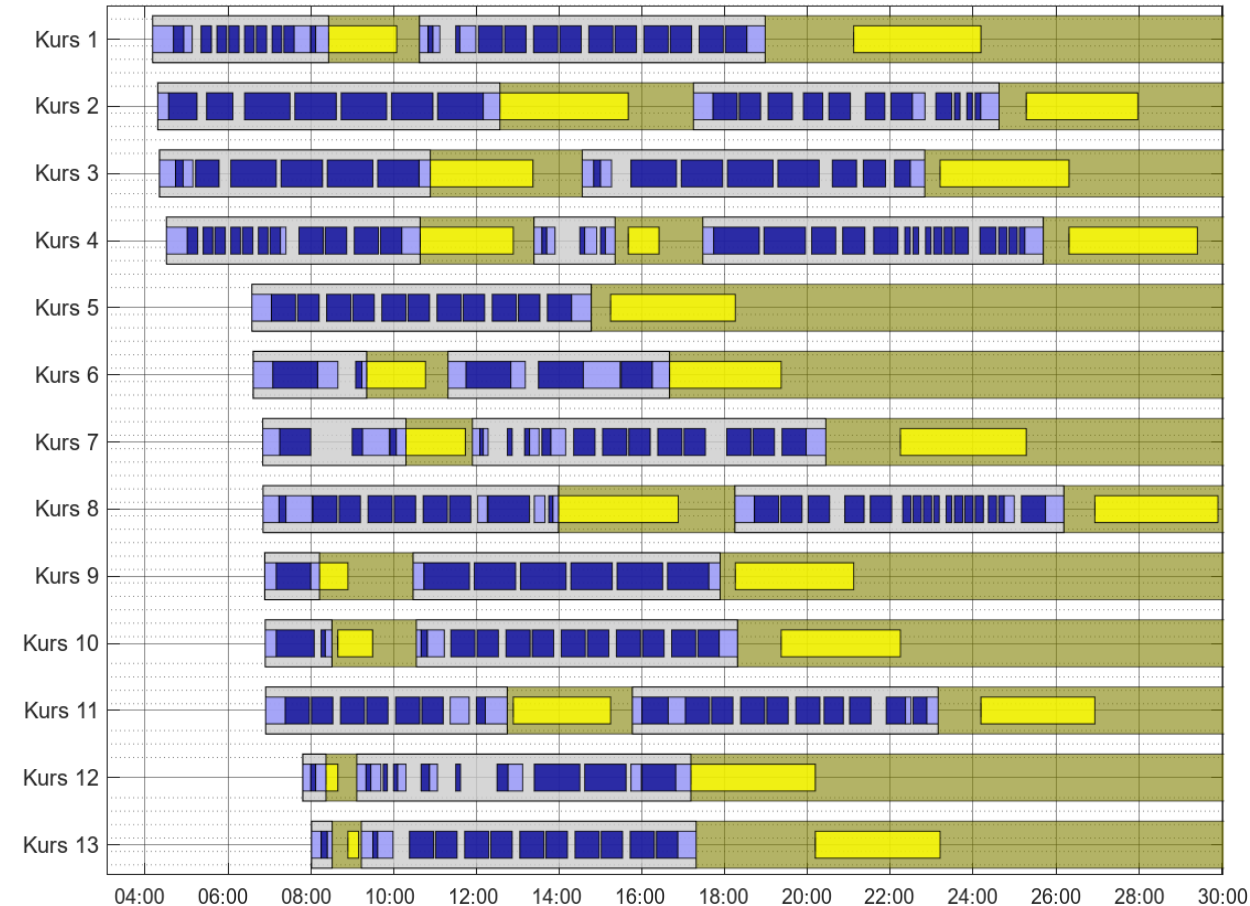
### ■ Eingangsdaten

- Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
  - Nur Solobusse (Linie, S+B >18 Personen)
- Batterie-Solobusse mit elektrischer Heizung
- Batterie 425 kWh, Ladung im Depot 120 kW

### ■ Umlaufplanung

- 13 Busse / 3 Ladegeräte
- Fahrleistung (gesamt): 2439 km
- Fahrleistung (leer): 753 km



- Linienfahrt
- Leerfahrt
- Ladephase Depot

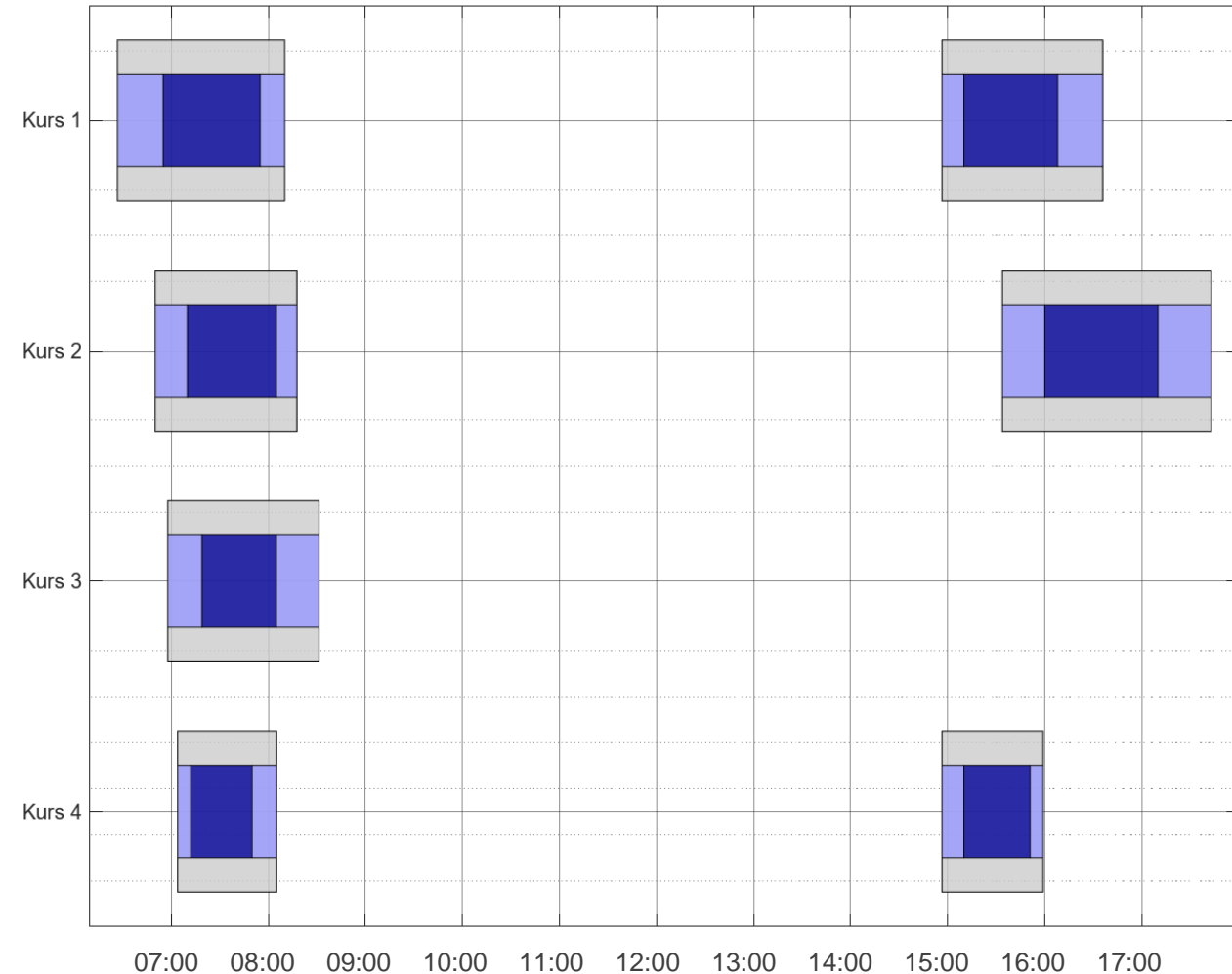


- **Eingangsdaten**
  - Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163, nur Solobusse (Linie, S+B >18 Personen)
  - Batterie-Solobusse mit elektrischer o. Hybridheizung / Batterie 400-575 kWh / Ladung im Depot 120 kW
  - Brennstoffzellenbusse
- Bereits die Fahrzeugkonfiguration mit kleiner Batterie und elektrischer Heizung kommt ohne Fahrzeugmehrbedarf aus

| Linie+S+B+163 (Mittwoch), nur Solobusse (ab 18 Pers.) |                |         |              |                   |                            |                          |
|---|----------------|---------|--------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
|   | Batterie [kWh] | Heizung | Anzahl Busse | Anzahl Ladegeräte | Fahrleistung (gesamt) [km] | Fahrleistung (leer) [km] |
| Dieselbus   | -              | -       | 13           |                   | 2257                       | 571                      |
| Batteriebus   | 425            | EIHe    | 13           | 3                 | 2439                       | 753                      |
|   | 575            | EIHe    | 13           | 3                 | 2344                       | 658                      |
|   | 400            | HyHe    | 13           | 2                 | 2324                       | 638                      |
|   | 550            | HyHe    | 13           | 2                 | 2249                       | 563                      |
| H <sub>2</sub> -Bus                                   | -              | EIHe    | 13           |                   | 2266                       | 580                      |

- **Eingangsdaten**
  - Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
    - Nur Minibusse (Fahrten mit max. 18 Pers.)
  - Dieselbusse
- **Umlaufplanung**
  - 4 Busse
  - Fahrleistung (gesamt): 282 km
  - Fahrleistung (leer): 153 km

 Leerfahrt  
 Linienfahrt



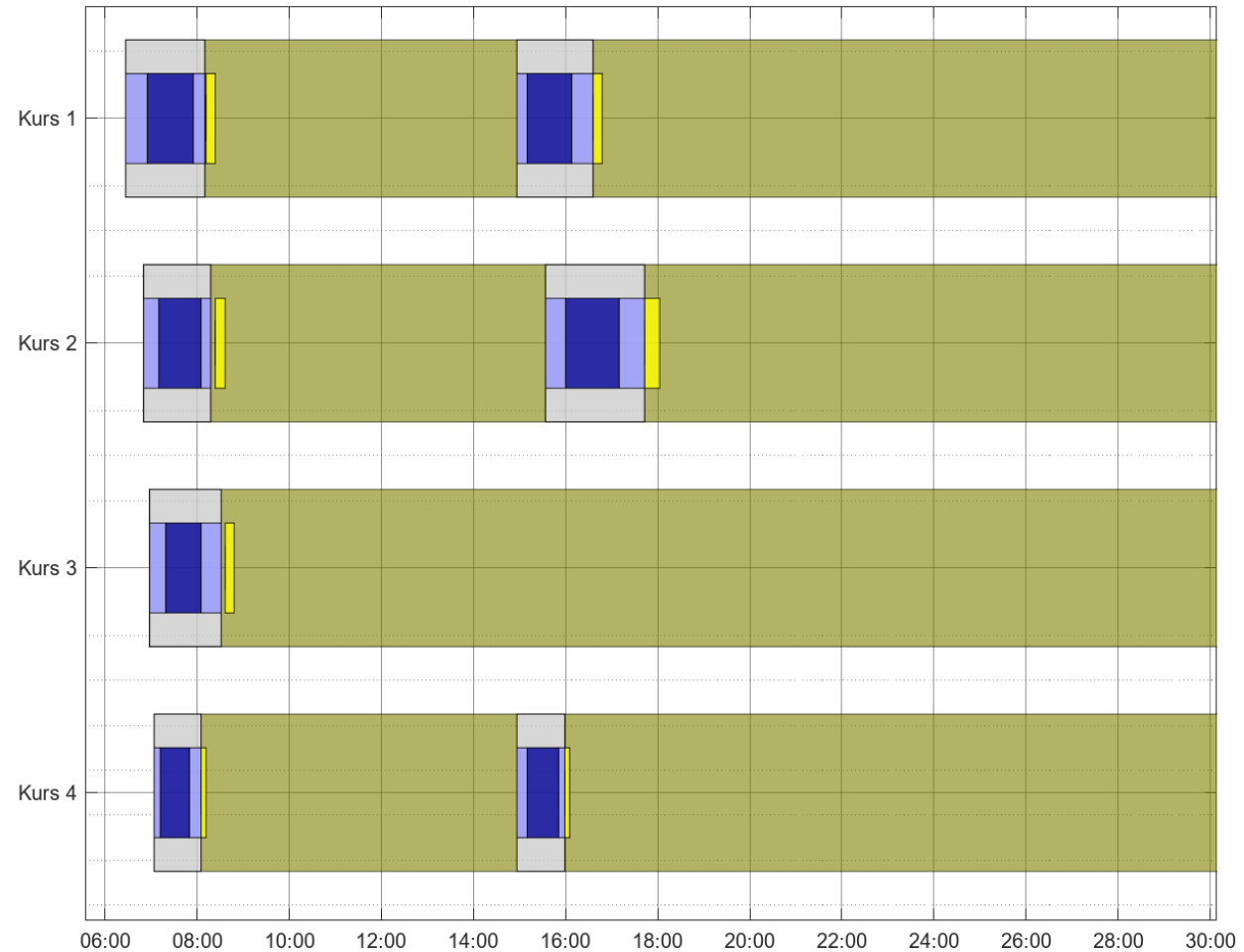
### ■ Eingangsdaten

- Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
  - Nur Minibusse (Fahrten mit max. 18 Pers.)
- Batterie-Minibusse mit Hybridheizung
- Batterie 115 kWh, Ladung im Depot 100 kW

### ■ Umlaufplanung

- 4 Busse / 1 Ladegerät
- Fahrleistung (gesamt): 282 km
- Fahrleistung (leer): 153 km

- Linienfahrt
- Leerfahrt
- Ladephase Depot



### ■ Eingangsdaten

- Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163, nur Minibusse (Fahrten mit max. 18 Personen)
- Batterie-Minibusse mit Hybridheizung / Batterie 115 kWh / Ladung im Depot 100 kW
- Brennstoffzellen-Minibusse sind auf dem Markt nicht verfügbar

| Linie+S+B+163 (Mittwoch), Minibusse (mit max. 18 Personen) |                |         |              |         |                   |                            |                          |
|--|----------------|---------|--------------|---------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
|  | Batterie [kWh] | Heizung | Anzahl Busse | Umläufe | Anzahl Ladegeräte | Fahrleistung (gesamt) [km] | Fahrleistung (leer) [km] |
| Dieselbus  | -              | -       | 4            | 7       | -                 | 282                        | 153                      |
| Batteriebus  | 115            | HyHe    | 4            | 7       | 1                 | 282                        | 153                      |

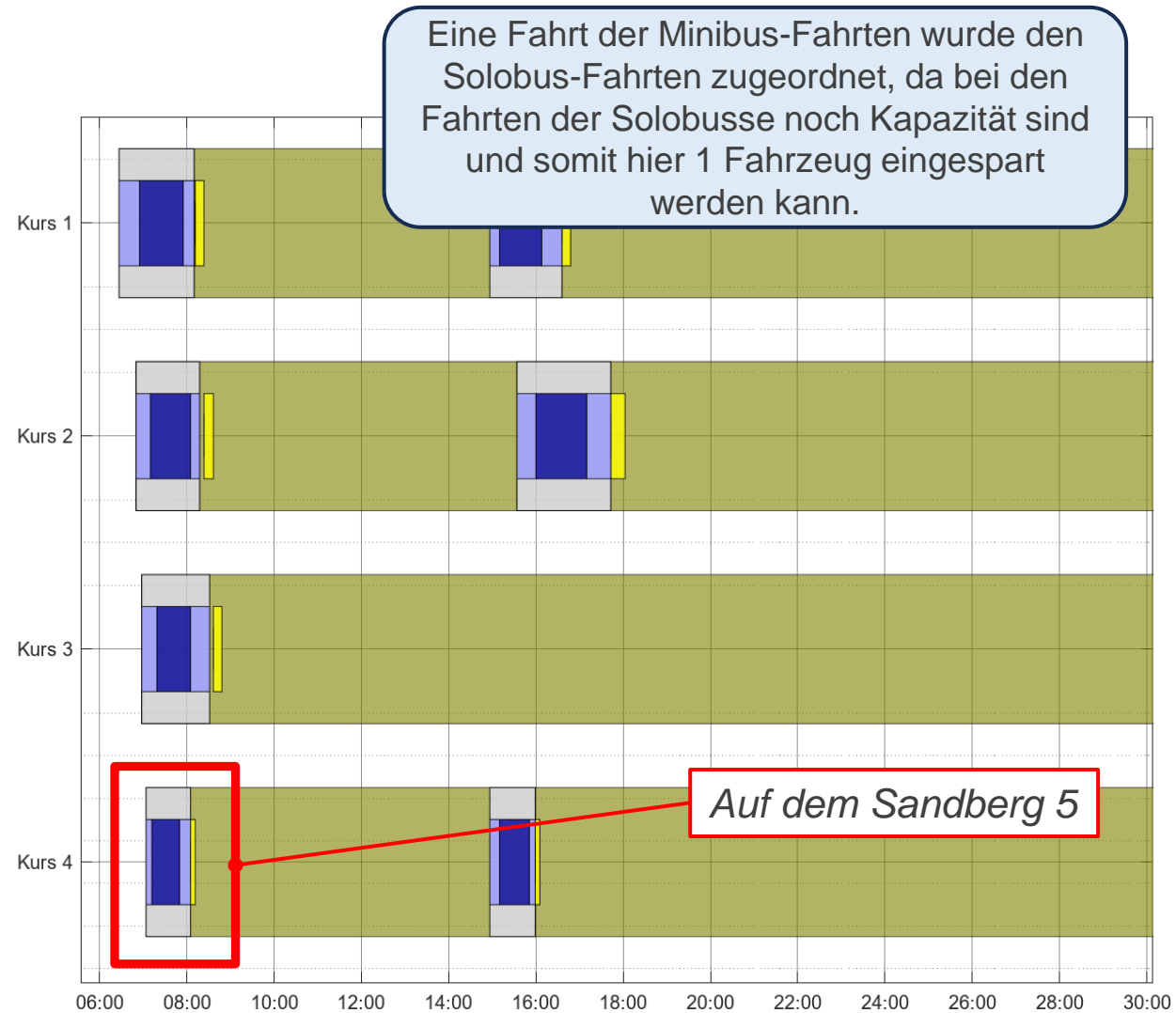
### ■ Eingangsdaten

- Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
  - Nur Minibusse (Fahrten mit max. 18 Pers.)
- Batterie-Minibusse mit Hybridheizung
- Batterie 115 kWh, Ladung im Depot 100 kW

### ■ Umlaufplanung

- 4 Busse / 1 Ladegerät
- Fahrleistung (gesamt): 282 km
- Fahrleistung (leer): 153 km

- Linienfahrt
- Leerfahrt
- Ladephase Depot



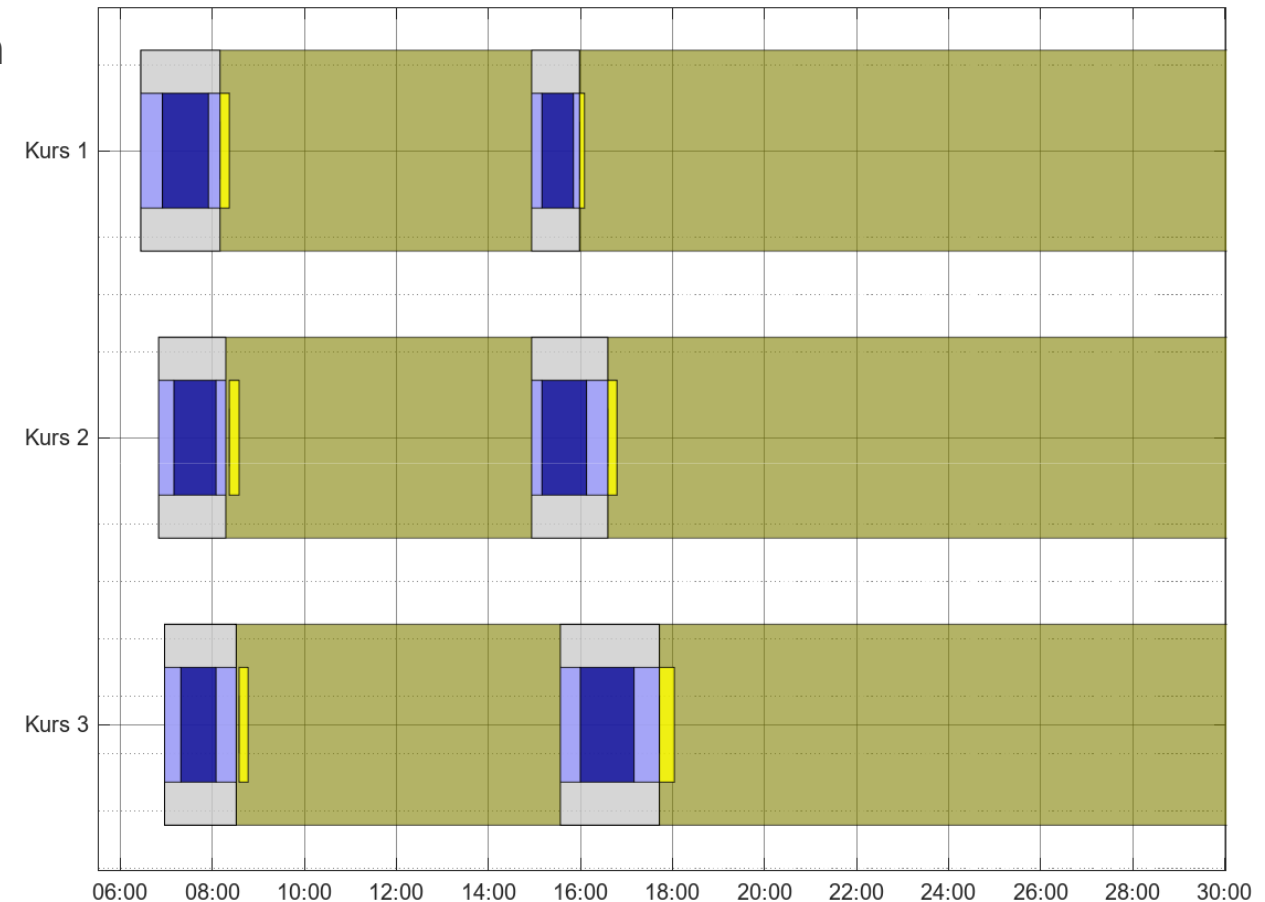
### ■ Eingangsdaten

- Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
  - Nur Minibusse (Fahrten mit max. 18 Personen)
  - Minus 1 Fahrt, die jetzt bei Solobussen ist
- Batterie-Minibusse mit Hybridheizung
- Batterie 115 kWh, Ladung im Depot 100 kW

### ■ Umlaufplanung

- 3 Busse / 1 Ladegerät
- Fahrleistung (gesamt): 267 km
- Fahrleistung (leer): 144 km

- Linienfahrt
- Leerfahrt
- Ladephase Depot



# AP 2 Technische und betriebliche Analyse

## Umlaufplanung Linie+S+B+163, Solobus (> 18 Pers.)




Var. 4

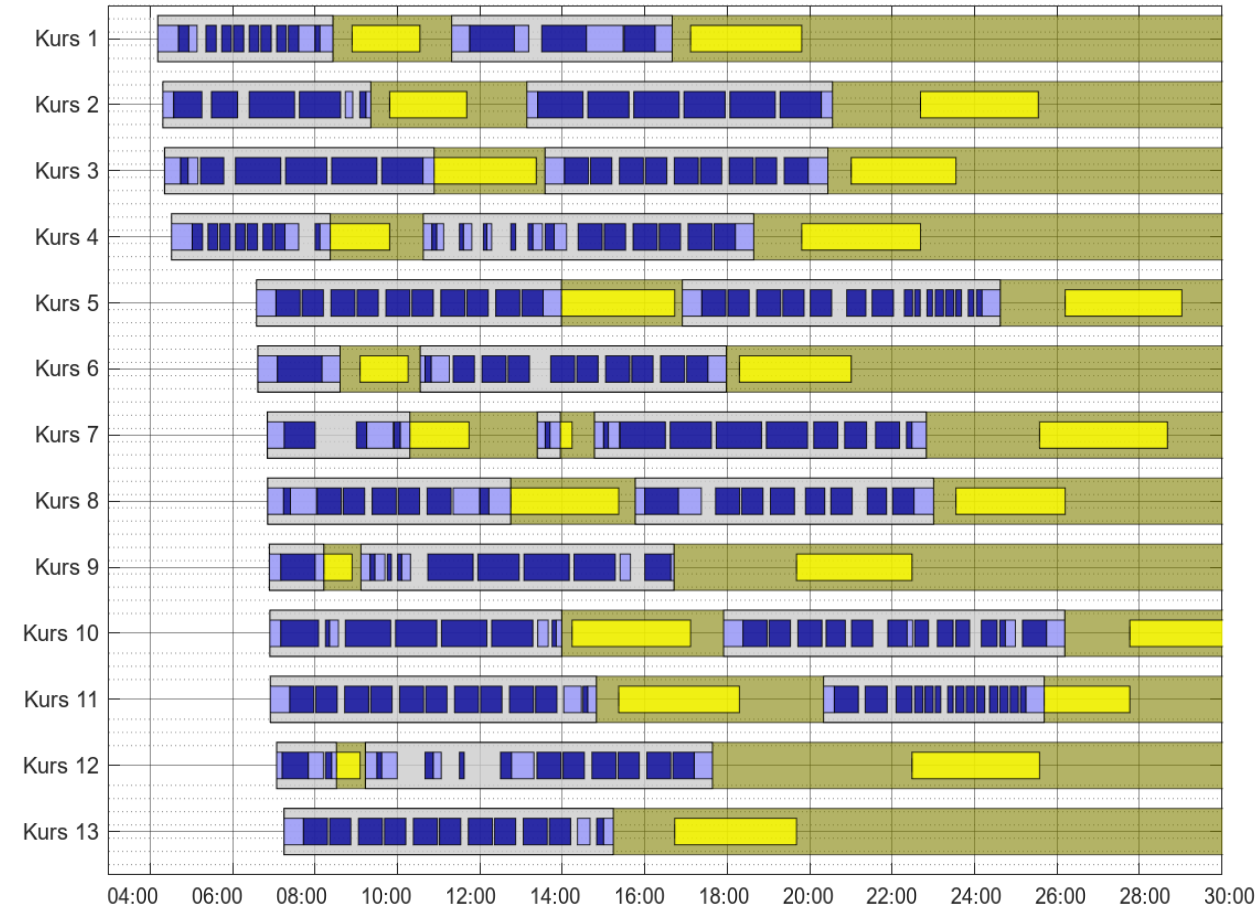
### ■ Eingangsdaten

- Plandaten Linie 140, 147, S+B (Mittwoch) + 163
  - Nur Solobusse (Linie, S+B >18 Personen)
  - Plus 1 Fahrt der Minibus-Fahrten
- Batterie-Solobusse mit elektrischer Heizung
- Batterie 425 kWh, Ladung im Depot 120 kW

### ■ Umlaufplanung

- 13 Busse / 3 Ladegeräte
- Fahrleistung (gesamt): 2460 km
- Fahrleistung (leer): 768 km

-  Linienfahrt
-  Leerfahrt
-  Ladephase Depot





- Bereits die Fahrzeugkonfiguration der Solobusse mit kleiner Batterie und elektrischer Heizung kommt ohne Fahrzeugmehrbedarf aus

| Linie+S+B+163 (Mittwoch), nur Solobusse (+1 Fahrten der Minibus-Fahrten) |                |         |              |         |                   |                            |                          |
|--|----------------|---------|--------------|---------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
|  | Batterie [kWh] | Heizung | Anzahl Busse | Umläufe | Anzahl Ladegeräte | Fahrleistung (gesamt) [km] | Fahrleistung (leer) [km] |
| Dieselbus  | -              | -       | 13           | 19      | -                 | 2270                       | 578                      |
| Batteriebus  | 425            | EIHe    | 13           | 26      | 3                 | 2460                       | 768                      |
|  | 575            | EIHe    | 13           | 20      | 3                 | 2352                       | 660                      |
|  | 400            | HyHe    | 13           | 20      | 2                 | 2309                       | 617                      |
|  | 550            | HyHe    | 13           | 19      | 2                 | 2270                       | 578                      |
| H <sub>2</sub> -Bus  | -              | EIHe    | 13           | 19      | -                 | 2294                       | 602                      |

| Linie+S+B+163 (Mittwoch), nur Minibusse (mit max. 18 Personen) (-1 Fahrt, die jetzt bei SB ist) |                |         |              |         |                   |                            |                          |
|---|----------------|---------|--------------|---------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
|   | Batterie [kWh] | Heizung | Anzahl Busse | Umläufe | Anzahl Ladegeräte | Fahrleistung (gesamt) [km] | Fahrleistung (leer) [km] |
| Dieselbus   | -              | -       | 3            | 6       | -                 | 267                        | 144                      |
| Batteriebus   | 115            | HyHe    | 3            | 6       | 1                 | 267                        | 144                      |

## AP 2 Technische und betriebliche Analyse

- Ergebnisse: Technische Machbarkeitsprüfung
  - Ergebnisse der Varianten



- Ergebnisse der Umlaufplanung der Varianten 1 bis 4
  - Variante 1: Anzahl ist abhängig von der gewählten Fahrzeugkonfiguration (Antrieb, Batterie, Heizung)
  - Variante 2-4: auch mit der Fahrzeugkonfiguration mit kleiner Batterie und elektrischer Heizung ähnliche Kenndaten wie im Dieselbetrieb (Anzahl, Fahrkilometer)
  - Variante 2-4: geringste Anzahl an Bussen und Ladegeräten

| Variante      | Linienverkehr  | Schüler- u. Bäderverkehr + 163        | Anzahl Busse (Bat. / H <sub>2</sub> ) | Ladegeräte |
|---------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|
| <b>Var. 1</b> | <b>Einzeln</b> , alles mit Solobussen  | <b>Einzeln</b> , alles mit Solobussen | 17-19 Solobusse                       | 4-5*       |
| <b>Var. 2</b> | <b>Verschnitten</b> , alles mit Solobussen   |                                       | 16 Solobusse                          | 3          |
| <b>Var. 3</b> | <b>Verschnitten</b><br>- Fahrten mit > 25 Personen, mit Solobussen<br>- Fahrten mit ≤ 25 Personen, mit Minibussen<br><u>- 2 Fahrten der Minibusse werden von Solobussen übernommen</u> |                                       | 12 Solobusse + 4 Minibusse            | 3-5*       |
| <b>Var. 4</b> | <b>Verschnitten</b><br>- Fahrten mit > 18 Personen, mit Solobussen<br>- Fahrten mit ≤ 18 Personen, mit Minibussen<br><u>- 1 Fahrt der Minibusse wird von einem Solobus übernommen</u>  |                                       | 13 Solobusse + 3 Minibusse            | 3-4        |

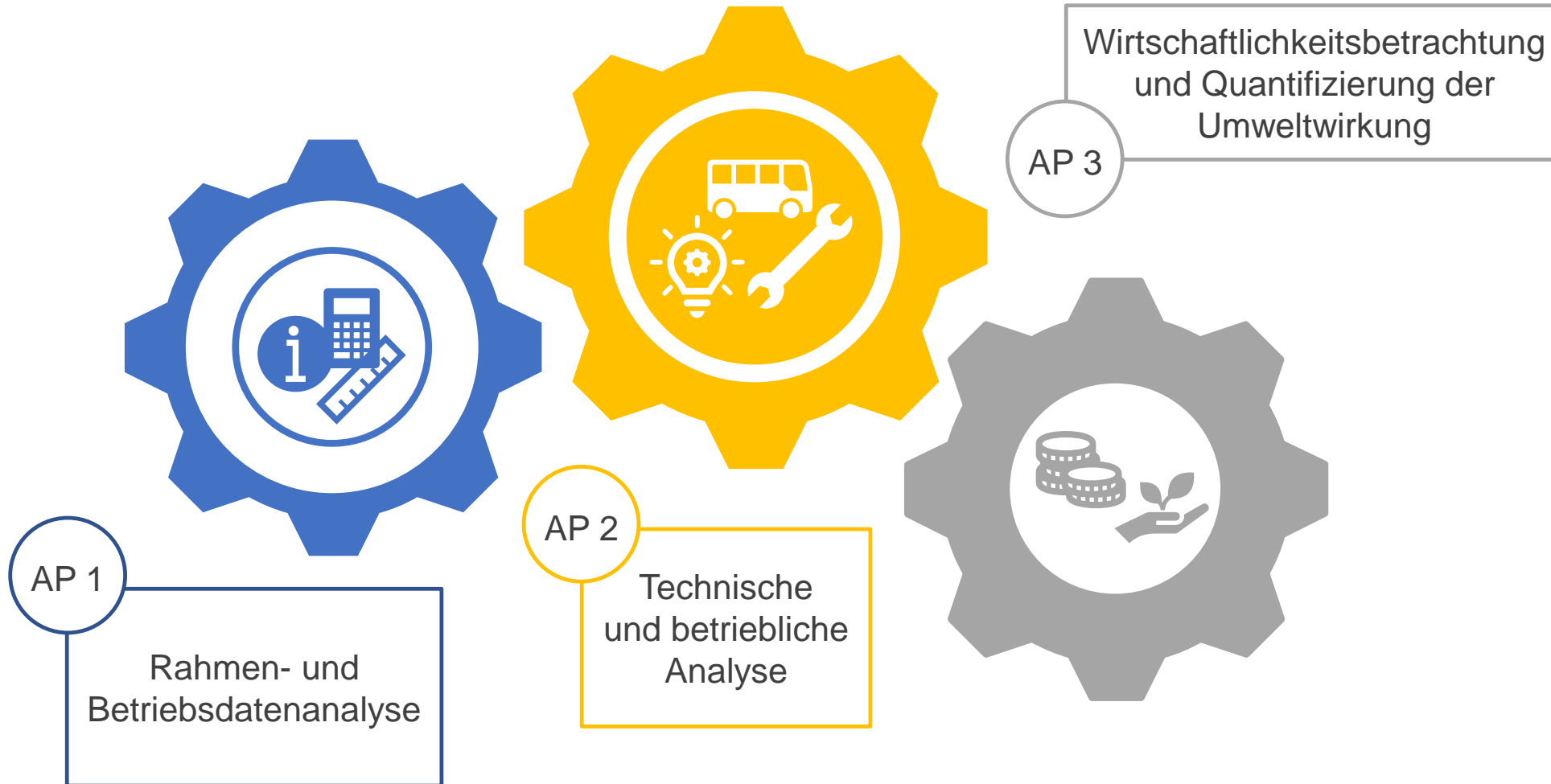
\* Durch Synergien und Schieben der Ladefenster sind 4 Ladegeräte ausreichend.

- Werden die Fahrleistungen „Linienverkehr“ und „Schüler- u. Bäderverkehr + 163“ getrennt betrachtet (Variante 1), ergibt sich, je nach Fahrzeugkonfiguration, ein Fahrzeugmehrbedarf von 1 bis 3 Fahrzeugen gegenüber dem Dieselbetrieb (16 Busse). Dieser Fahrzeugmehrbedarf ergibt sich aus den hohen Fahrleistungen des Linienverkehrs.
- Werden die Fahrleistungen „Linienverkehr“ und „Schüler- u. Bäderverkehr + 163“ verschnitten (Variante 2 bis 4),...
  - ... ist auch mit der kleinsten Fahrzeugkonfiguration kein Mehrbedarf gegenüber dem Dieselbetrieb (16 Busse) nötig.
  - ... sind unabhängig der Konfiguration die Kenndaten wie Fahrkilometer etc. vergleichbar mit dem Dieselbetrieb.
  - Einzelne Fahrten des Schüler- und Bäderverkehrs können, abhängig der Anzahl an Fahrgästen, ohne Fahrzeugmehrbedarf, auch mit Minibussen statt mit Solobussen erbracht werden (Varianten 3 für Fahrten bis max. 25 Fahrgästen und Variante 4 mit max. 18 Fahrgästen).

- Abhängig der Fahrzeugkonfiguration werden 3 bis 4 Standardladegeräte für die Ladung der Batteriebusse benötigt. Eine Reserve ist dabei noch nicht enthalten.
  - Die Ladegeräte können auf je 2 Ladepunkte verschaltet werden.
  - Bei der benötigten Anzahl an Fahrzeugen (mind. 16 Busse) würden 4 x 2 Ladepunkte dazu führen, dass Fahrzeuge rangiert werden müssen. Mehr Ladegeräte und Ladepunkte können Abhilfe schaffen.
  - Es wird empfohlen für jeden Bus einen Ladepunkt zu schaffen
    - bei 16 Bussen und Ladepunkte entspricht dieses 8 Ladegeräten
  
- Die Untersuchungen bilden nur den Fahrplanbedarf ab und enthalten keine Reservefahrzeuge.

# AP 3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Quantifizierung der Umweltwirkung





Wirtschaftlichkeitsbetrachtung  
und Quantifizierung der  
Umweltwirkung

AP 3



- In der technischen und betrieblichen Analyse im AP 2 wurden Einsatzkonzepte für jede technische Konfiguration erstellt und die betrieblichen Auswirkungen quantifiziert. Im Rahmen von AP 3 wurde basierend auf diesen Ergebnissen zuerst eine detaillierte Total Cost of Ownership-Rechnung (TCO) durchgeführt. Dabei wurden die Kosten sowohl für Anfangsinvestitionen als auch für Betriebskosten detailliert aufgeschlüsselt, was den klaren Unterschied zur Kostenstruktur der Dieselbusse verdeutlichte.
- Des Weiteren wurde eine umfassende Quantifizierung der Umweltauswirkungen vorgenommen, bei der nicht nur die Emissionen während des Betriebs, sondern auch die Emissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette berücksichtigt wurden, einschließlich der Bereitstellung der Energieträger und der Batterieherstellung.
- Im Folgenden wird zuerst auf die Methodik der TCO-Rechnung und ihre Ergebnisse eingegangen. Anschließend werden die Methodik der Quantifizierung der Umweltauswirkungen und ihre Ergebnisse erläutert.

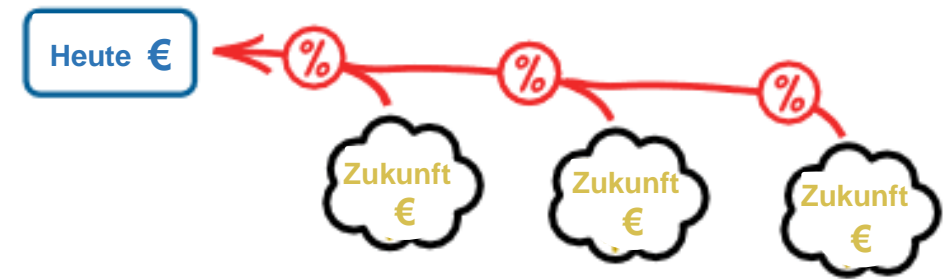


## AP 3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Quantifizierung der Umweltwirkung

- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
- Quantifizierung der Umweltwirkung



- Total Cost of Ownership (TCO) → Betrachtung von Anfangsinvestitionen und laufenden Kosten
  - Umfassender Vergleich der Wirtschaftlichkeit der Elektrobuskonzepte und der Diesel-Referenz durch die Berechnung des Barwerts und der Annuitäten
- Aufschlüsselung der Kosten nach Gefäßgrößen und Kostenpositionen
- Abgestimmter Betrachtungszeitraum über 10 Jahre für alle Fahrzeugkonzepte
- Kenndaten wurden mit der Piccolonia abgesprochen (übermittelten Abfrage-Tabelle) und in die TCO-Rechnung übernommen




### ■ Rüstzeiten

- Piccolonia: „Ausfahrt Frühdienst 15 Minuten Abfahrtskontrolle“ und
- Piccolonia: „Einfahrt Spätdienst 30 Minuten Tanken, Ablösezeiten“
- In der TCO-Rechnung werden daher zusätzlich zu der bei der Umlaufplanung ermittelten Fahrerzeit folgendes angesetzt:

- Abfahrtskontrolle für alle Busse: 15 min
- Dieselbusse Tanken, Ablösezeit: 30 min
- E-Bus Ablösezeit, Rangierzeit: 15 min
- H<sub>2</sub>-Busse Tanken, Ablösezeit: 60 min (Ablösung + 2x Weg zur Tankstelle + Tanken)

15 min kürzer als beim Diesel, da auf die Fahrt zum Tanken verzichtet wird (Zeitannahmen von Hr. Klein bestätigt)

- Für jede Variante wurden 8 Ladegeräte angesetzt

- Weitere Kenndaten für die TCO-Rechnung wurden in einer Abfrage per Excel-Tabelle mit der Piccolonia besprochen und übernommen
- Die finalen Werten sind in der beigefügten Excel-Tabelle hinterlegt
  - Datei: 2024-11-22\_\_an\_Piccolonia\_\_TCO-Parameter.xlsx 



### Zusätzliche Fahrerkosten (gegenüber Dieselbus-Referenz):

- Fahrerzeit für zusätzliche Leerfahrten



### Energie:

- Diesel (inkl. Steuern und Abgaben)
- Strom (inkl. Steuern, Abgaben und Netznutzung)
- Wasserstoff (inkl. Steuern und Abgaben)



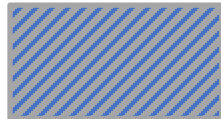
### Ladeinfrastruktur:

- Ladegeräte (Investment mit Lebensdauer + Wartung)
- Baukostenzuschuss und Anschlusskostenbeitrag (Einmal-Ausgaben)
- Bauliche Maßnahmen (Einmal-Ausgaben)
- Pauschale Projektkosten



### Fahrzeuginstandhaltung

- Kosten pro km: Instandhaltung, Wartung, Inspektion, Öl, etc.
- Werkstattertüchtigung



### Batterie- oder Brennstoffzellensystem

- Anschaffungs- und Wiederbeschaffungskosten abhängig von Lebensdauer



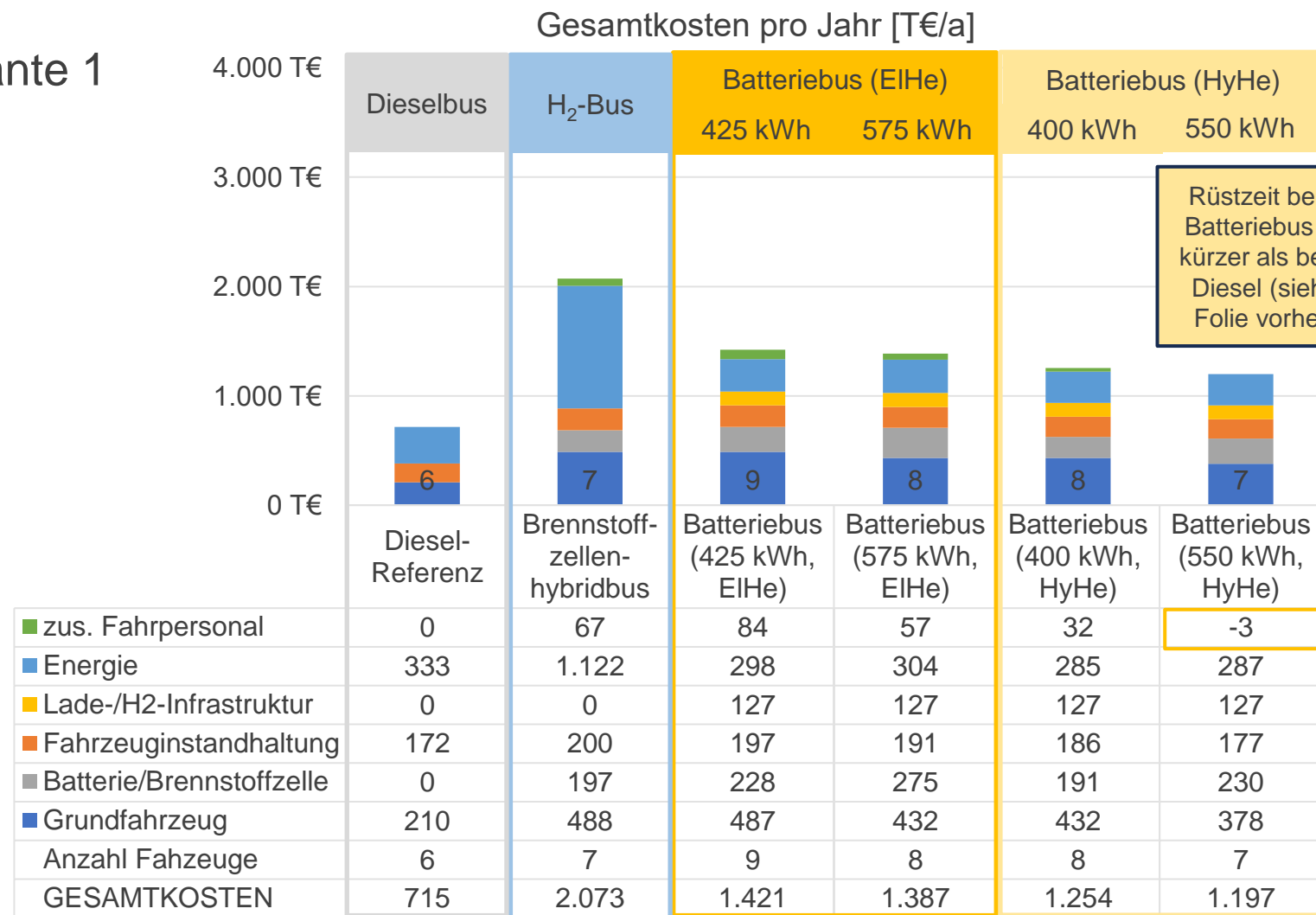
### Fahrzeuge

- Fahrzeuge (Investment mit Lebensdauer; inkl. Motor, Koppelsystem)
- ohne Batteriesystem

### ■ Gesamtkosten pro Jahr für Variante 1

Linienverkehr

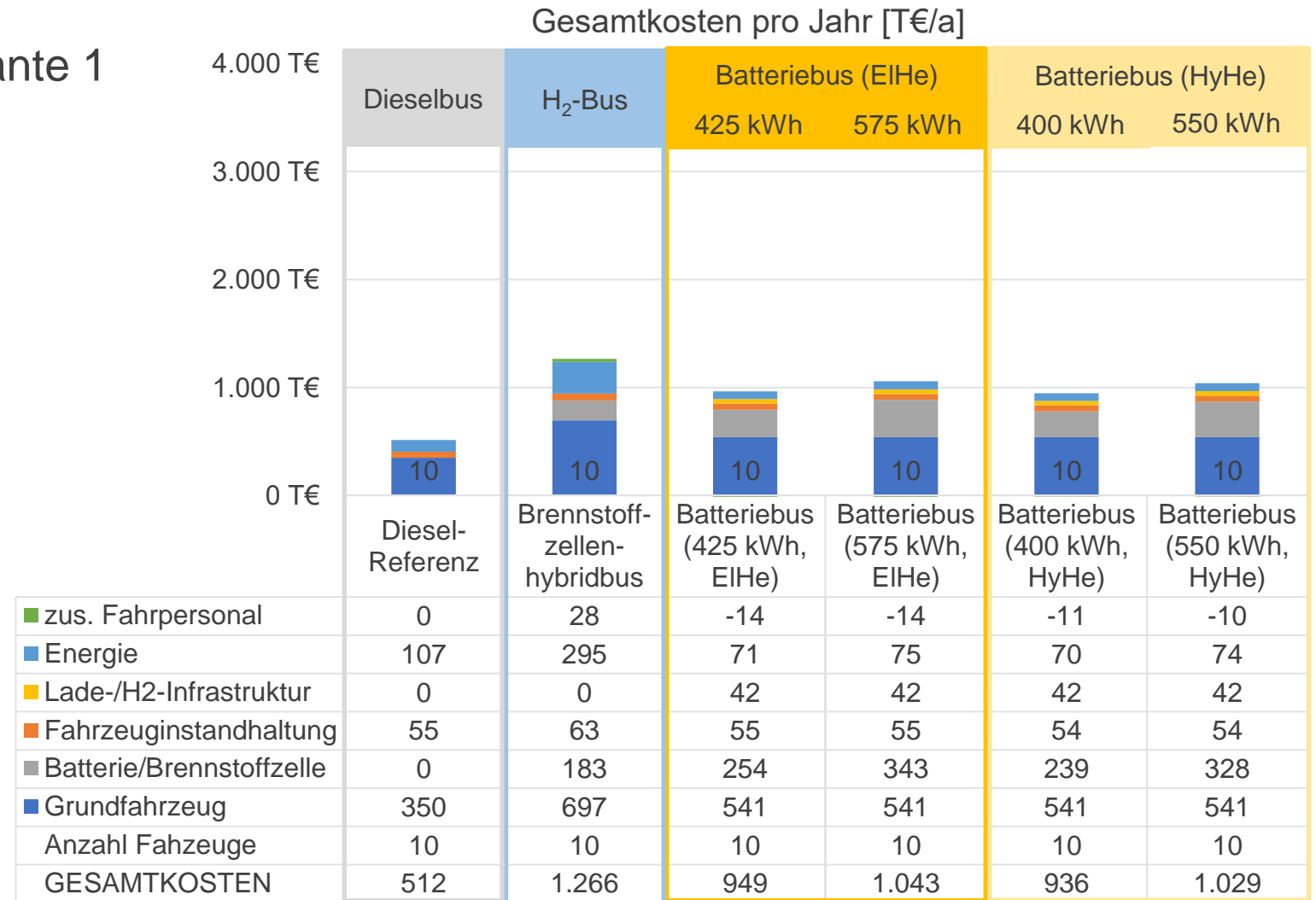
Nutzkilometer pro Jahr: 444.565 km



### ■ Gesamtkosten pro Jahr für Variante 1

Schüler- und Bäderverkehr + 163

Nutzkilometer pro Jahr: 67.510 km



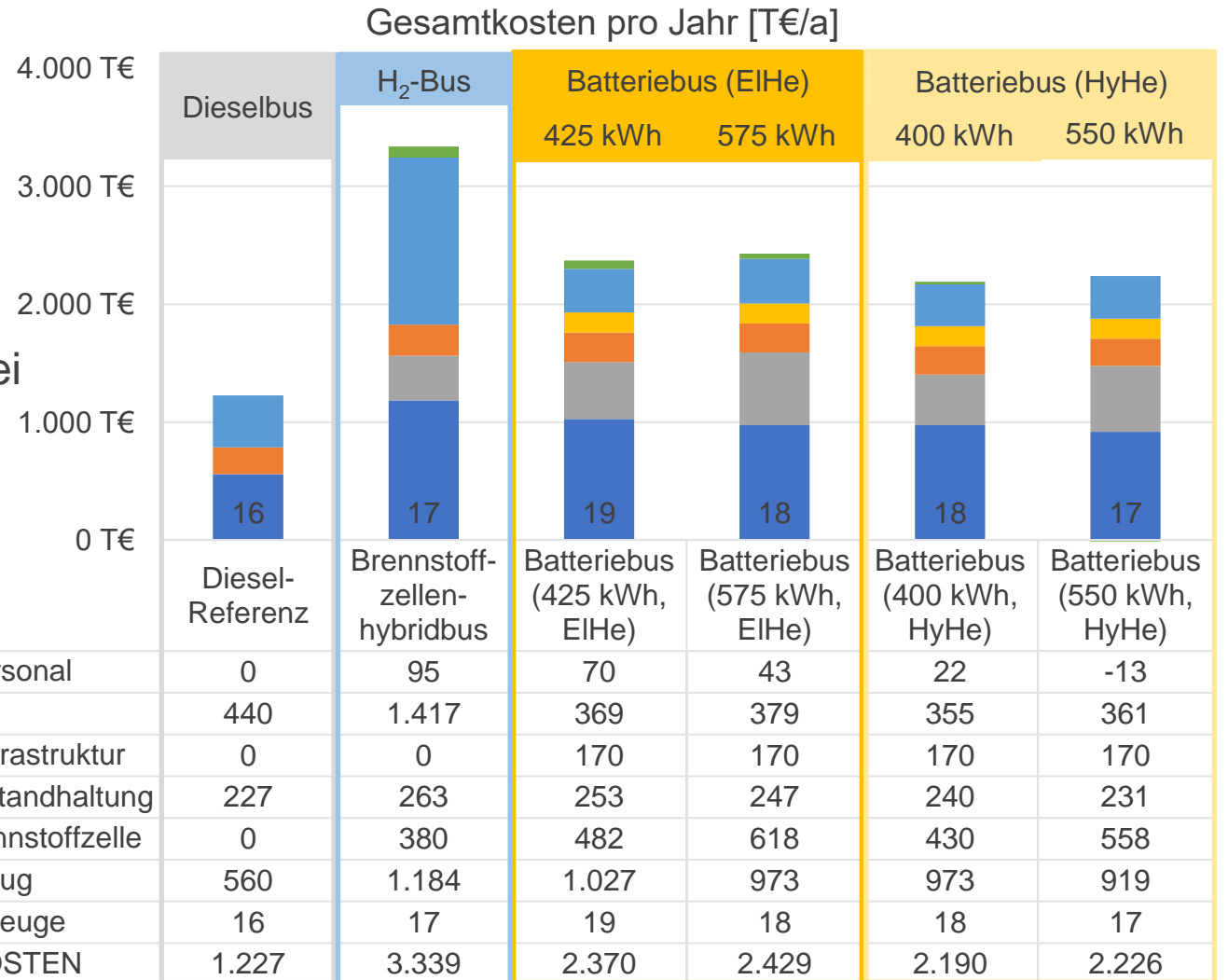
- **Gesamtkosten pro Jahr für Variante 1, Summe**
  - Der Einsatz von Batteriebussen ist 950 bis 1.200 T€ teurer als mit Dieseln
  - Die Gesamtkosten der Brennstoffzellenhybridbussen sind fast 3-mal so hoch wie bei Dieseln

Linienverkehr

Schüler- und Bäderverkehr + 163

Nutzkilometer pro Jahr: 512.076 km

Aufgrund der hohen Gesamtkosten der Busse mit Brennstoffzellen werden diese nicht weiter verfolgt.

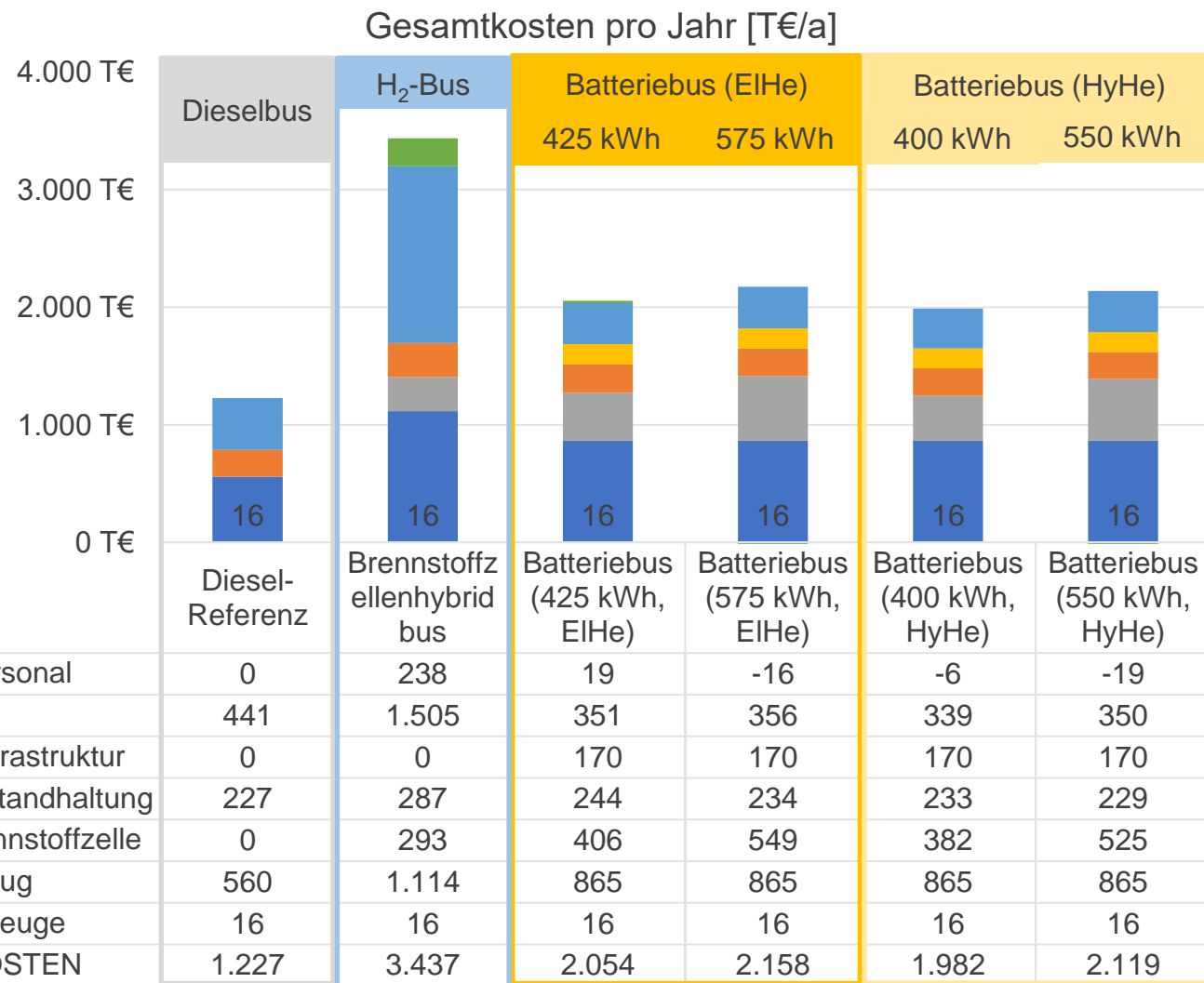




- Gesamtkosten pro Jahr für Variante 2, Linie und Schüler- und Bäderverkehr + 163, verschnitten
  - Der Einsatz von Batteriebussen ist ca. 750 bis 930 T€ teurer als mit Dieselbussen
  - Die Kosten für den Einsatz von Batteriebussen profitieren durch die Verschneidung (-150 bis -270 T€)

Linienvverkehr +  
Schüler- und  
Bäderverkehr + 163

Nutzkilometer pro Jahr: 512.076 km

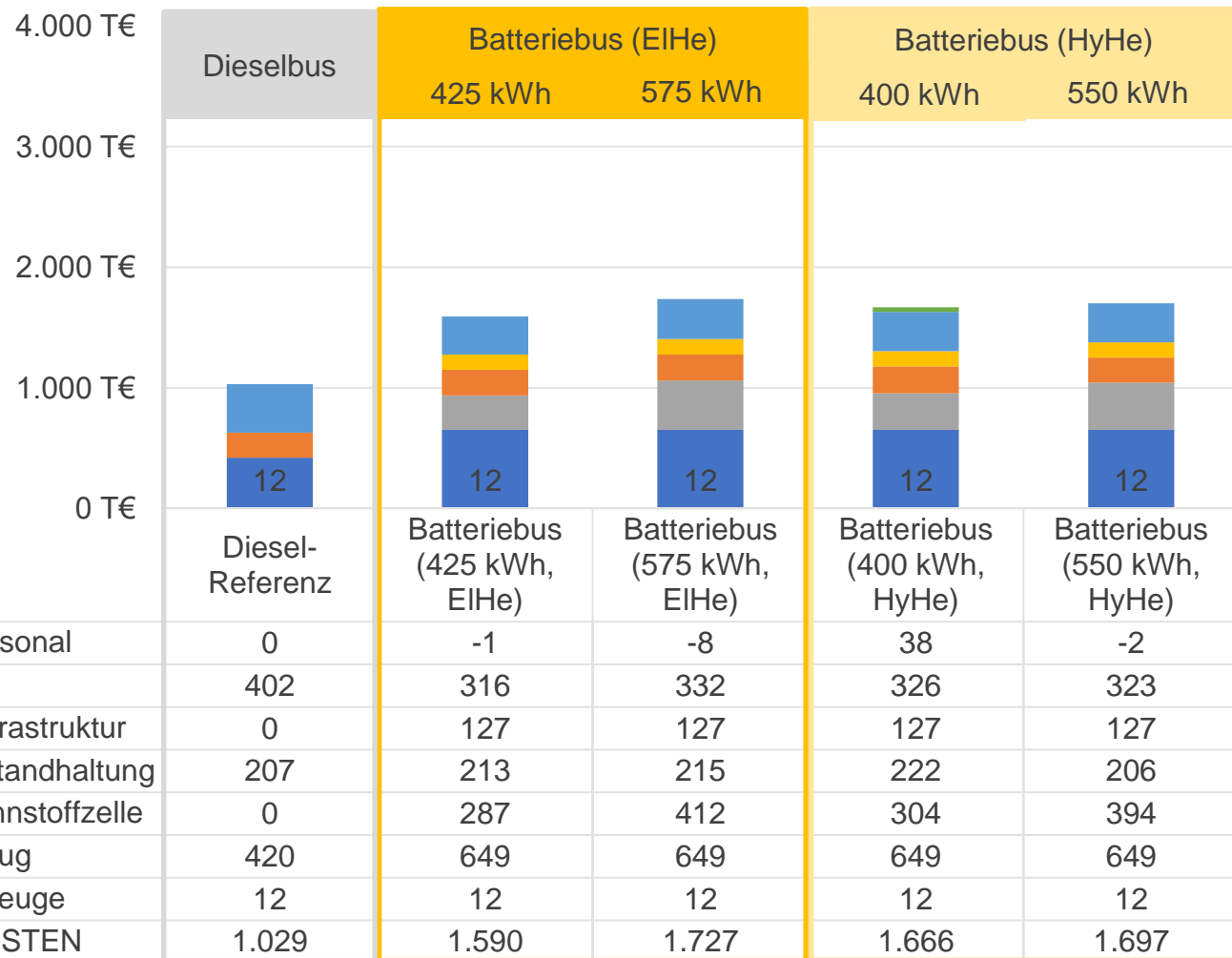


- Vergleich der Kosten für Variante 3, Linienverkehr und Schüler- und Bäderverkehr verschnitten, aufgeteilt in Solo- und Minibusfahrten (Grenze bei 25 Personen), Verschiebung von 2 Fahrten der Minibusse zu den Solobussen

Solobusse

Nutzkilometer pro Jahr: 461.448 km

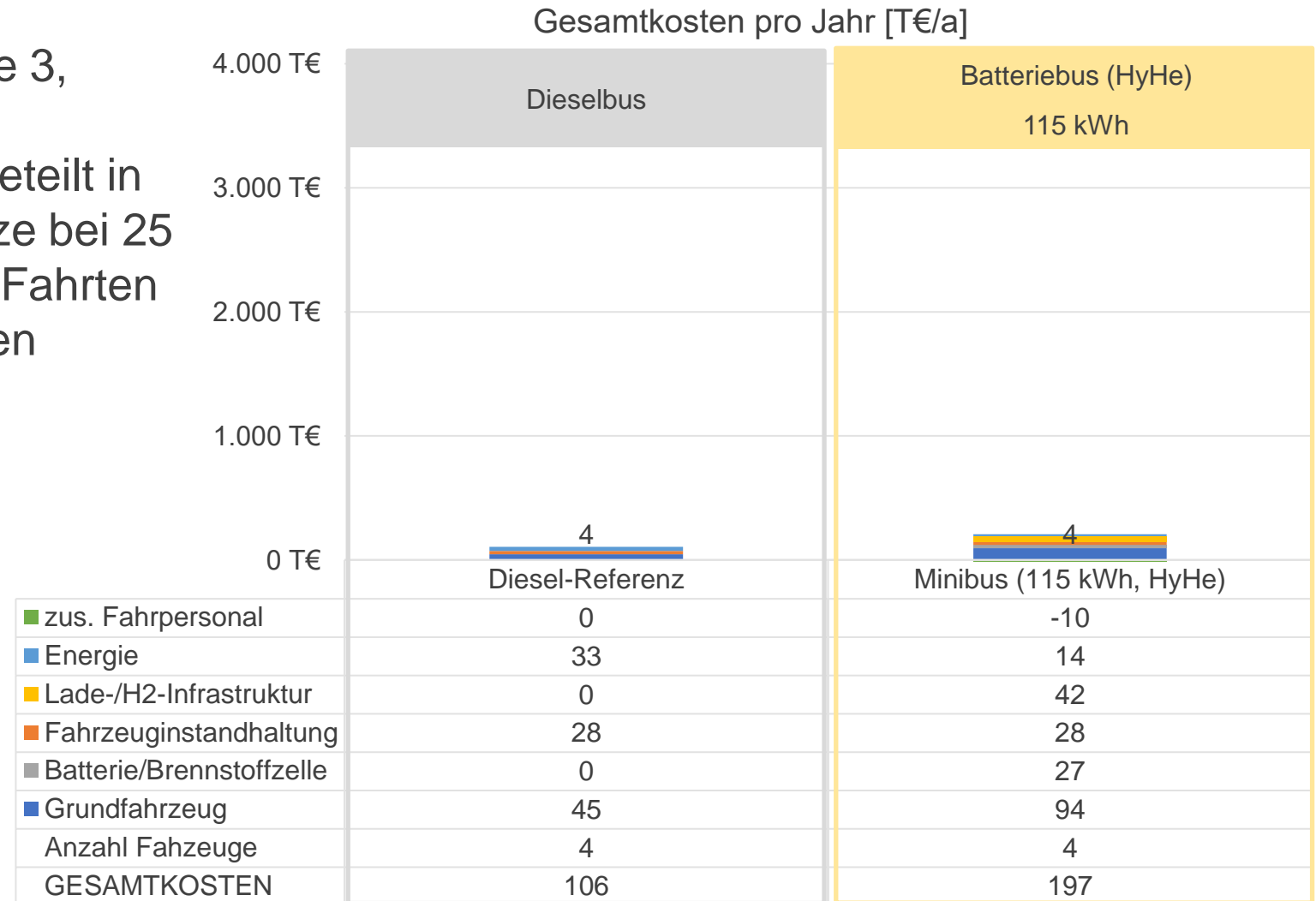
Gesamtkosten pro Jahr [T€/a]



- Vergleich der Kosten für Variante 3, Linienverkehr und Schüler- und Bäderverkehr verschnitten, aufgeteilt in Solo- und Minibusfahrten (Grenze bei 25 Personen), Verschiebung von 2 Fahrten der Minibusse zu den Solobussen

Minibusse

Nutzkilometer pro Jahr: 50.627 km

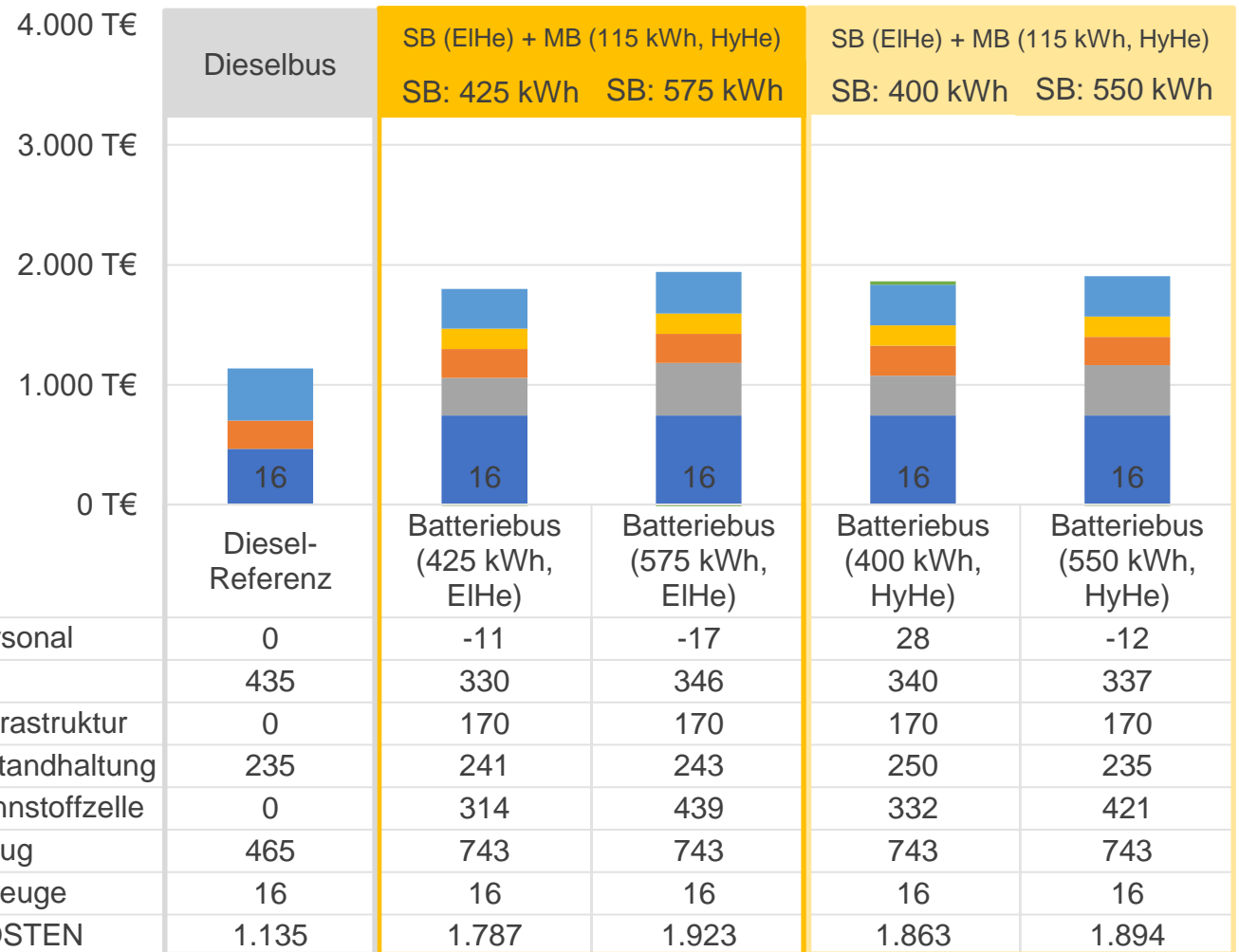


- Vergleich der Kosten für Variante 3, Linienverkehr und Schüler- und Bäderverkehr verschnitten, aufgeteilt in Solo- und Minibusfahrten (Grenze bei 25 Personen), Verschiebung von 2 Fahrten der Minibusse zu den Solobussen, Summe

Solobusse (SB) u. Minibusse (MB)

Nutzkilometer pro Jahr: 512.076 km

Gesamtkosten pro Jahr [T€/a]

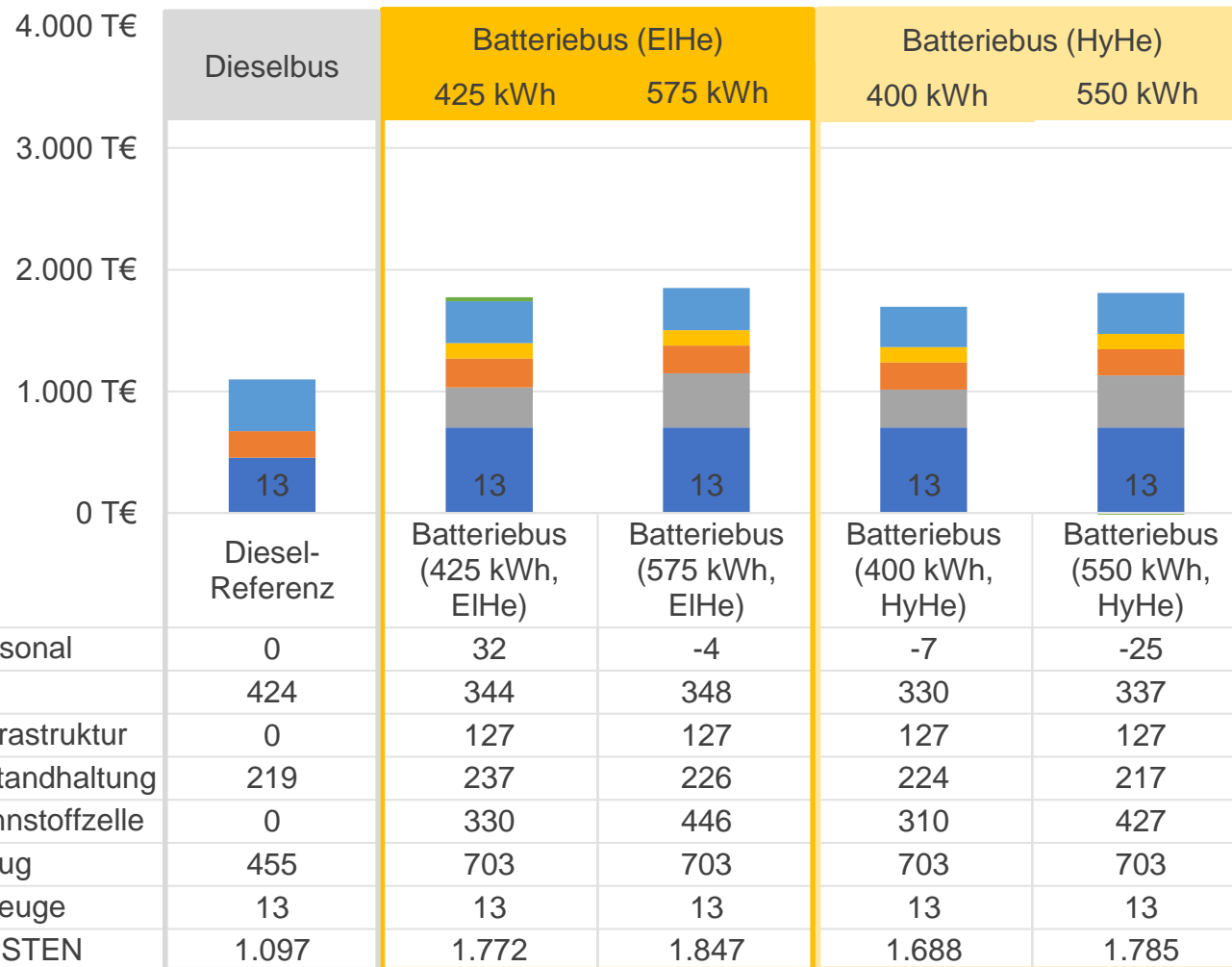


- Vergleich der Kosten für Variante 4, Linienverkehr und Schüler- und Bäderverkehr verschnitten, aufgeteilt in Solo- und Minibusfahrten (Grenze bei 18 Personen), Verschiebung von 1 Fahrt der Minibusse zu den Solobussen

Solobusse

Nutzkilometer pro Jahr: 477.243 km

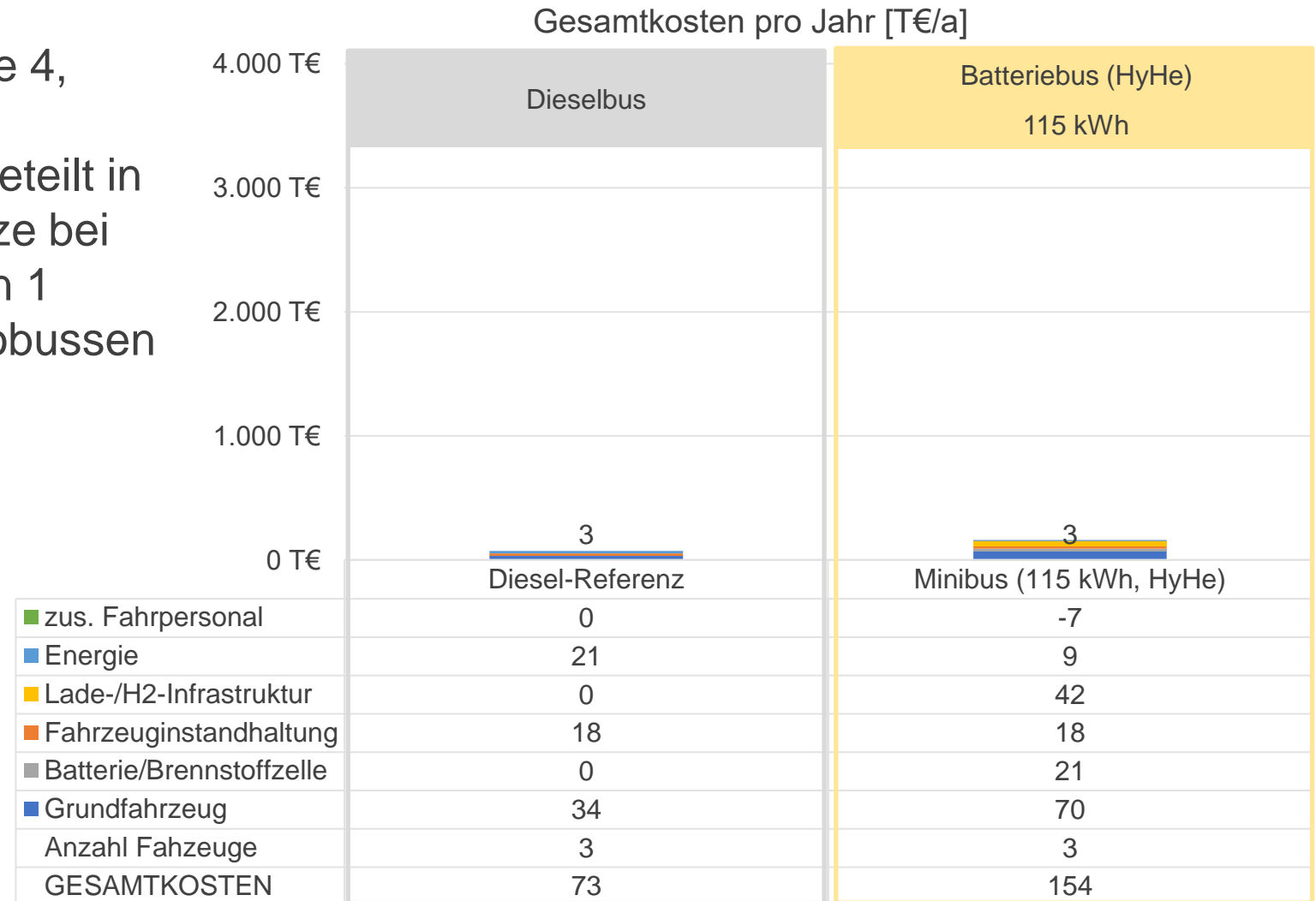
Gesamtkosten pro Jahr [T€/a]



- Vergleich der Kosten für Variante 4, Linienverkehr und Schüler- und Bäderverkehr verschnitten, aufgeteilt in Solo- und Minibusfahrten (Grenze bei 18 Personen), Verschiebung von 1 Fahrt der Minibusse zu den Solobussen

Minibusse

Nutzkilometer pro Jahr: 34.833 km

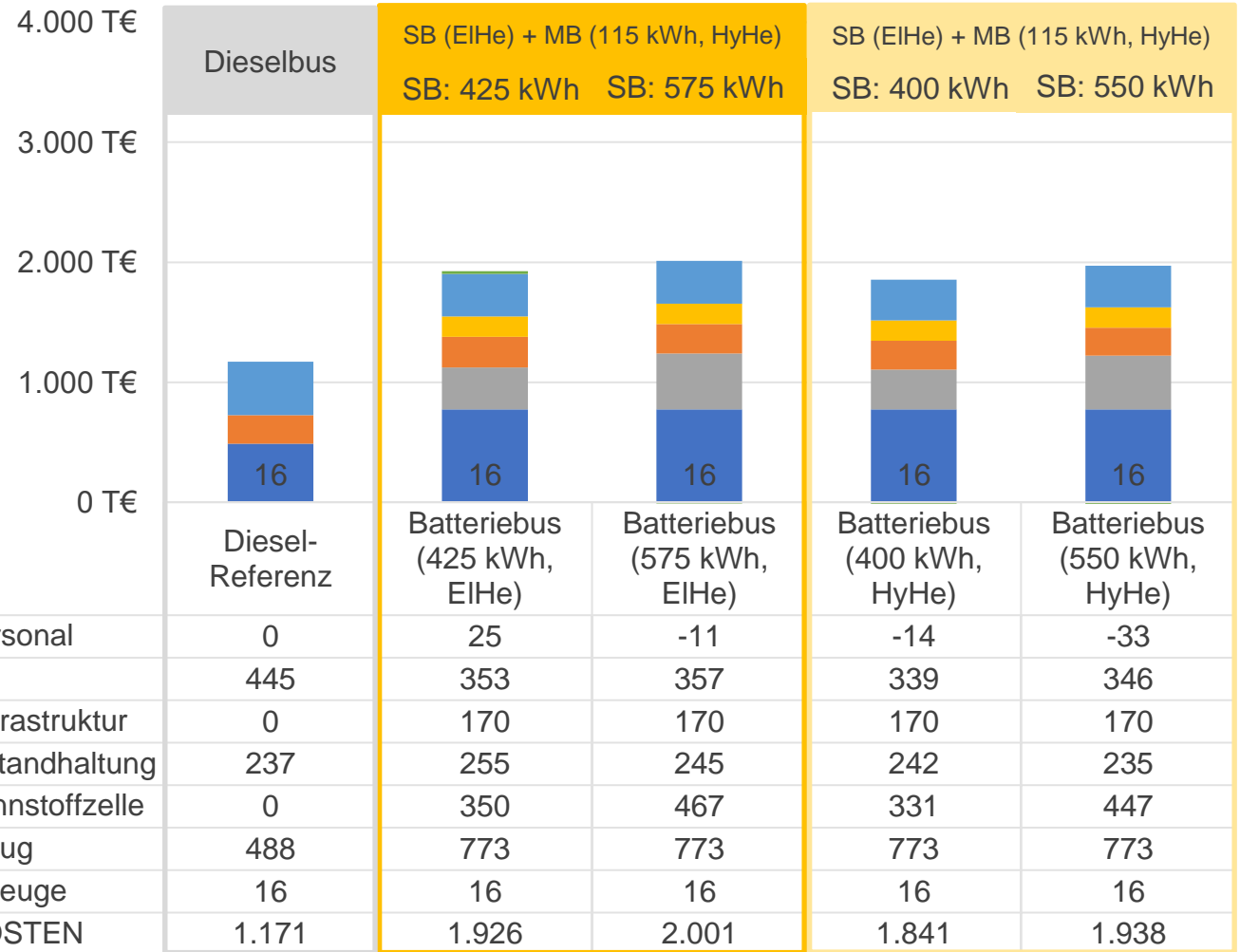


- Vergleich der Kosten für Variante 4, Linienverkehr und Schüler- und Bäderverkehr verschnitten, aufgeteilt in Solo- und Minibusfahrten (Grenze bei 18 Personen), Verschiebung von 1 Fahrt der Minibusse zu den Solobussen, Summe

Solobusse (SB) u. Minibusse (MB)

Nutzkilometer pro Jahr: 512.076 km

Gesamtkosten pro Jahr [T€/a]



- Gesamtkosten pro Jahr der Varianten 1 bis 4
  - Verschneidung der Fahrleistungen senkt Kosten
  - Einsatz von Minibussen führt zu weiteren Kostenreduktion
  - Kleinere Batteriekapazität ist günstiger, jedoch ist die größere nicht viel teurer und bietet mehr Flexibilität

| Variante      | Linienverkehr   | Schüler- u. Bäderverkehr<br>+ 163 | Anzahl<br>Busse<br>(Bat. / H <sub>2</sub> ) | Kosten<br>Dieselbusse<br>[T€/a] | Kosten<br>Batteriebusse<br>[T€/a] | Faktor Diesel-<br>zu Batteriebus |
|---------------|---|-----------------------------------|---|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| <b>Var. 1</b> | Einzeln, alles mit Solobussen   | Einzeln, alles mit Solobussen     | 17-19<br>Solobusse                          | 1.227                           | 2.190 - 2.429                     | 1,78 - 1,98                      |
| <b>Var. 2</b> | Verschnitten, alles mit Solobussen  |                                   | 16 Solobusse                                | 1.227                           | 1.982 - 2.158                     | 1,62 - 1,76                      |
| <b>Var. 3</b> | <b>Verschnitten</b><br>- Fahrten mit >25 Personen, mit Solobussen<br>- Fahrten mit ≤25 Personen, mit Minibussen<br>- 2 Fahrten der Minibusse werden von Solobussen übernommen |                                   | 12 Solobusse<br>4 Minibusse                 | 1.135                           | 1.787 - 1.923                     | 1,57 - 1,7                       |
| <b>Var. 4</b> | <b>Verschnitten</b><br>- Fahrten mit >18 Personen, mit Solobussen<br>- Fahrten mit ≤18 Personen, mit Minibussen<br>- 1 Fahrt der Minibusse wird von einem Solobus übernommen  |                                   | 13 Solobusse<br>3 Minibusse                 | 1.171                           | 1.841 - 2.001                     | 1,57 - 1,71                      |



- Ein Verschneiden der Fahrleistungen von „Linienverkehr“ und „Schüler- u. Bäderverkehr + 163“ senkt die Kosten im Betrieb mit alternativen Antrieben.
- Werden auf Fahrten mit wenigen Personen (bis zu 18 oder 25 Personen im Schüler- und Bäderverkehr) Minibusse eingesetzt, können die Kosten noch weiter gesenkt werden.
- In Varianten 2 und 4 ist die Kombination aus Minibus mit 115 kWh und Hybridheizung sowie Solobus mit moderater Batterie (400 kWh) und Hybridheizung am wirtschaftlichsten.
- In der Variante 3 ist die Kombination aus Minibus mit 115 kWh und Hybridheizung und Solobus mit moderaterer Batterie (425 kWh) und elektrischer Heizung am wirtschaftlichsten.

- Die Varianten mit größerer Batterie haben höhere jährliche Gesamtkosten:
  - Max. 7,7% in Var 2-4 (7,7% in Variante 3 mit Solobus EIHe von 425 kWh auf 575 kWh)
- Diesen Mehrkosten gegenüber stehen die Vorteile,
  - auf zukünftige Fahrleistungsänderungen besser vorbereitet zu sein, und
  - die Fahrzeuge über die ÖPNV-Fahrleistung hinaus mehr und flexibler einsetzen zu können (z.B. etwaige Auftragsfahrten / Aufträge von privat).
- Auch bei Verwendung von Brennstoff-Zusatzheizungen (HyHe) kann der allergrößte Teil der Emissionen reduziert werden (gegenüber Dieselmotorenbetrieb). Den zusätzlichen Emissionseinsparungen, die elektrische Heizungen (EIHe) bringen, stehen gegenüber:
  - jährliche Mehrkosten bei EIHe: max. 9,1% in Variante 1 und max. 4,6% in Variante 2-4 (in Variante 3 mit moderater Batterie ist EIHe sogar günstiger)
  - flexiblere Einsatzmöglichkeiten bei HyHe durch die größeren Reichweiten
- Die Untersuchungen bilden nur den Fahrplanbedarf ab und enthalten keine Reservefahrzeuge.

## AP 3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Quantifizierung der Umweltwirkung

- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
- Quantifizierung der Umweltwirkung



- Global wirksame Emissionen: CO<sub>2</sub>
  - Lokal emittierte CO<sub>2</sub>-Emissionen
  - CO<sub>2</sub>-Emissionen der Batterieherstellung
  - CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energieträgerbereitstellung
  - (Herstellung/Entsorgung von Fahrzeugen, Werkzeug, etc. i.d.R. vernachlässigt)
  
- Lokal wirksame Emissionen: Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Feinstaub (PM)
  - Nur lokal (=während der Fahrt) emittierte Emissionen relevant
  - Feinstaub-Emissionen durch Bremsabrieb und Aufwirbelung von Straßenstaub werden vernachlässigt
    - werden i.d.R. nicht betrachtet (schwer zu quantifizieren und zu vermeiden)
    - Elektrobus hätte leichte Vorteile durch geringeren Bremsverschleiß (regeneratives Bremsen)
    - haben i.d.R. größere Partikelgrößen (geringere Lungengängigkeit)

- Emissionen des Betriebs der Elektrobusse:
  - Klimaneutraler Ökostrom mit 0 gCO<sub>2</sub>e/kWh
- Emissionen der (Ersatz-)Batterieherstellung mitberücksichtigt
  - 106 kg CO<sub>2</sub>e / kWh
- Emissionen der Brennstoffzellenherstellung mitberücksichtigt
  - 30,5 kg CO<sub>2</sub>e / kWh
- Emissionen der Dieselreferenz
  - CO<sub>2</sub>e-Emissionen basieren auf durchschnittlichem Dieserverbrauch von Bussen
  - NO<sub>x</sub>- und PM-Emissionen basieren auf Euro VI Emissionsfaktoren aus HBEFA 4.2 [„Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ - Stand 2021]

|         | Durchschn. Dieserverbrauch [Liter/100km] | CO <sub>2</sub> e [kg/km] | NO <sub>x</sub> [g/km] | PM [g/km] |
|---------|--|---------------------------|------------------------|-----------|
| MINIBUS | 15,6                                     | 0,49                      | 0,08                   | 0,0015    |
| SOLOBUS | 36,5                                     | 1,15                      | 0,18                   | 0,0035    |

# AP 3 Quantifizierung der Umweltwirkung

## Emissionswerte: Variante 1, Linienverkehr

Var. 1



### Vergleich der Emissionen für Variante 1, Linienverkehr

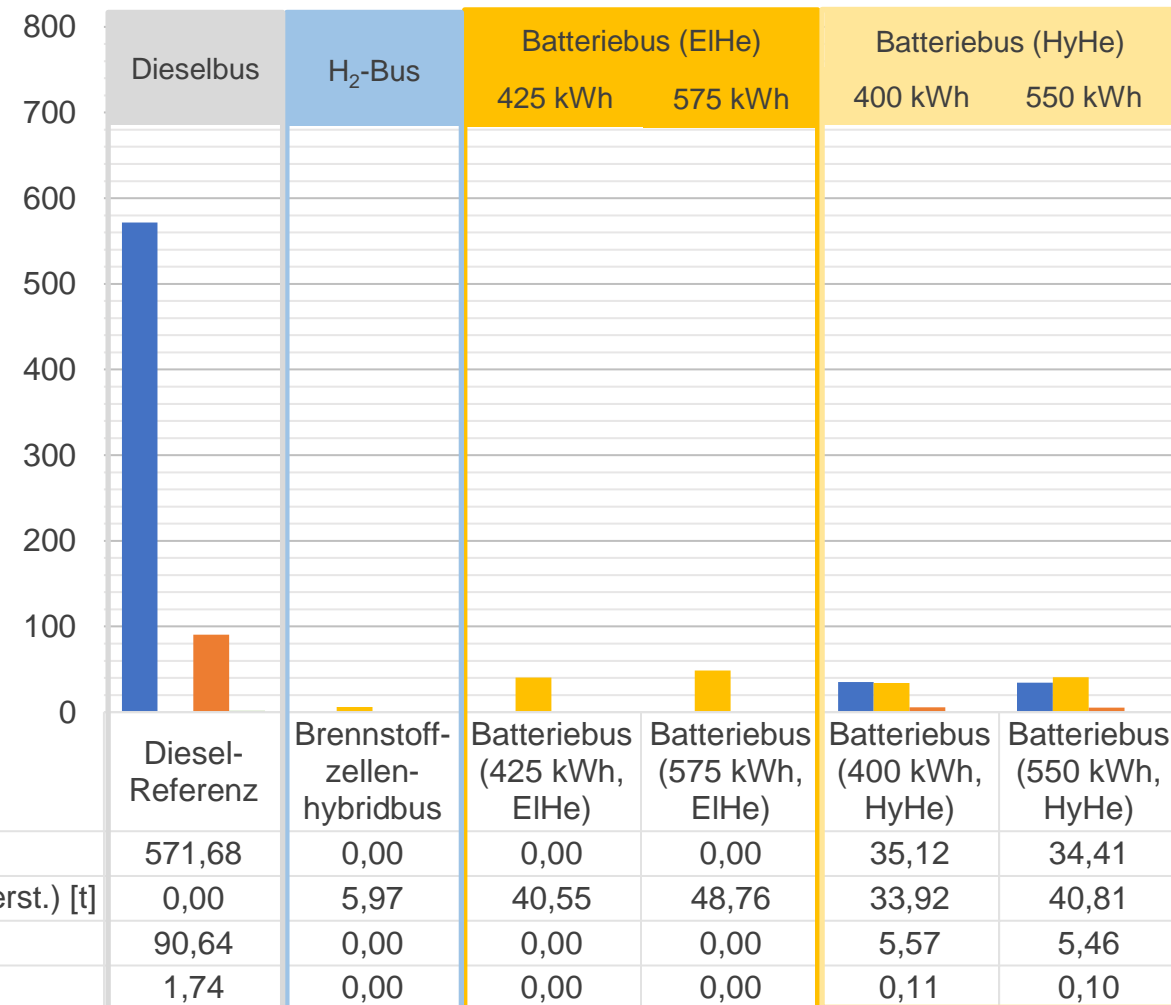
Ca. 90 % Einsparung der CO<sub>2</sub>e-Emissionen gegenüber der Diesel-Referenz bei allen Buskonzepten mit alternative Antrieben

Keine lokalen NO<sub>x</sub>- und PM-Emissionen bei Batteriebuskonzepten mit vollelektrischer Heizung

Solobusse

Nutzkilometer pro Jahr: 444.565 km

Emissionen (jährlich)



|   | Diesel-Referenz | Brennstoffzellen-hybridbus | Batteriebus (425 kWh, EIHe) | Batteriebus (575 kWh, EIHe) | Batteriebus (400 kWh, HyHe) | Batteriebus (550 kWh, HyHe) |
|---|-----------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| CO <sub>2</sub> (Betrieb) [t]             | 571,68          | 0,00                       | 0,00                        | 0,00                        | 35,12                       | 34,41                       |
| CO <sub>2</sub> (Batterie-/BZ-Herst.) [t] | 0,00            | 5,97                       | 40,55                       | 48,76                       | 33,92                       | 40,81                       |
| NO <sub>x</sub> (Betrieb) [kg]            | 90,64           | 0,00                       | 0,00                        | 0,00                        | 5,57                        | 5,46                        |
| PM (Betrieb) [kg]                         | 1,74            | 0,00                       | 0,00                        | 0,00                        | 0,11                        | 0,10                        |

# AP 3 Quantifizierung der Umweltwirkung

## Emissionswerte: Variante 1

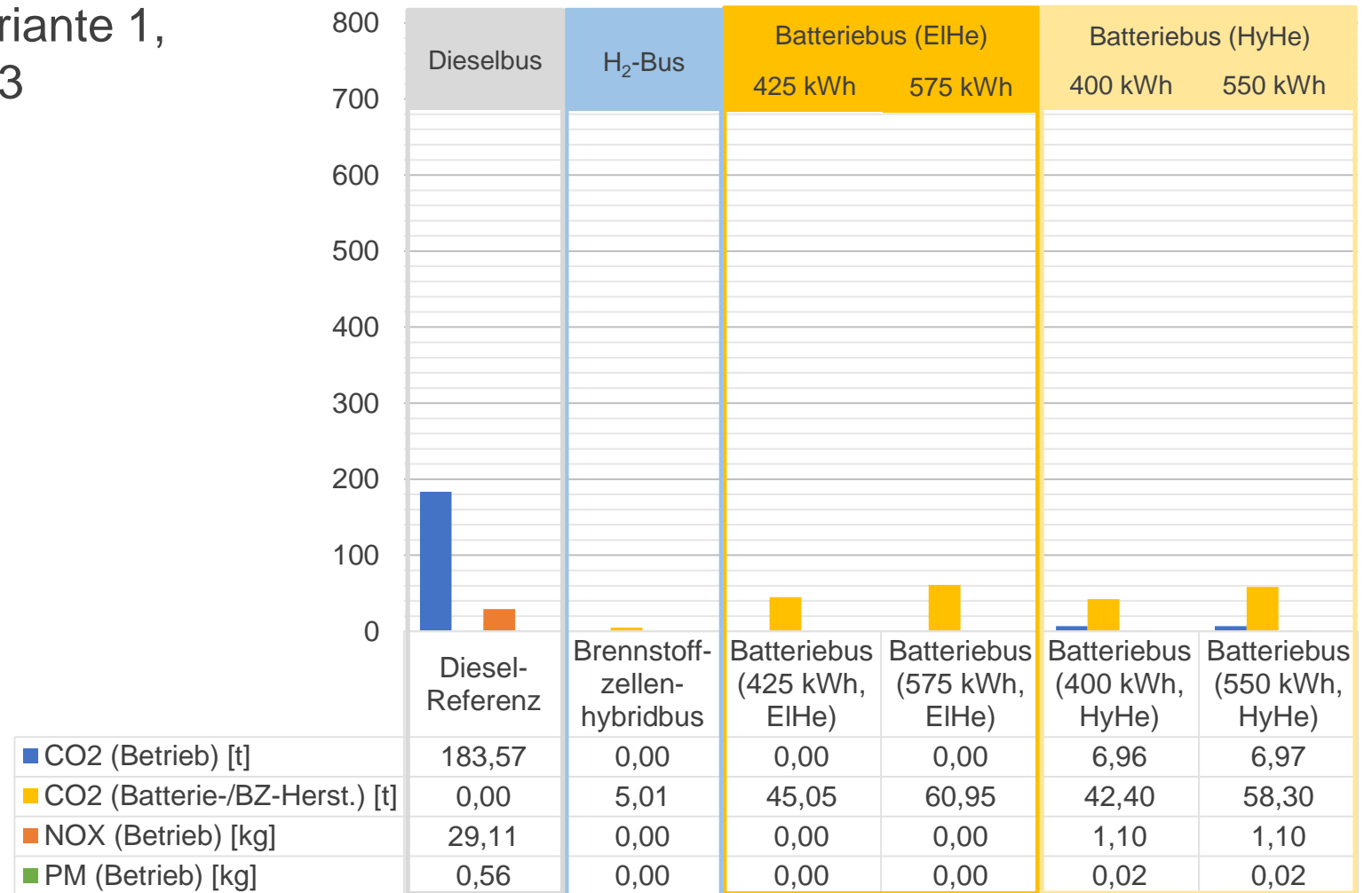
Var. 1

- Vergleich der Emissionen für Variante 1, Schüler- und Bäderverkehr + 163

Solobusse

Nutzkilometer pro Jahr: 67.510 km

Emissionen (jährlich)



# AP 3 Quantifizierung der Umweltwirkung

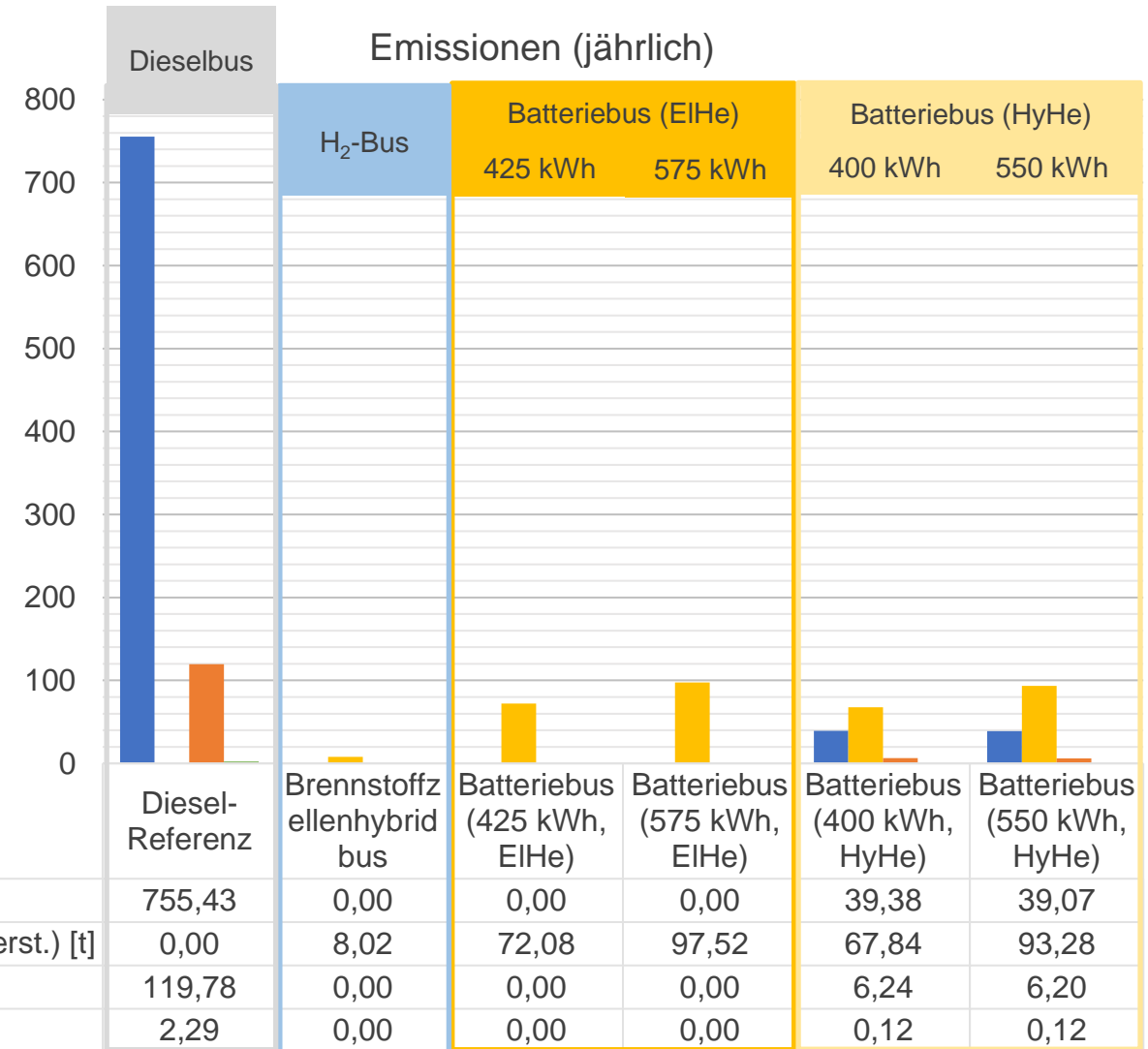
## Emissionswerte: Variante 2

Var. 2

- Vergleich der Emissionen für Variante 2, Linie und Schüler- und Bäderverkehr + 163

Solobusse

Nutzkilometer pro Jahr: 512.076 km



|   |        |      |       |       |       |       |
|---|--------|------|-------|-------|-------|-------|
| ■ CO <sub>2</sub> (Betrieb) [t]             | 755,43 | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 39,38 | 39,07 |
| ■ CO <sub>2</sub> (Batterie-/BZ-Herst.) [t] | 0,00   | 8,02 | 72,08 | 97,52 | 67,84 | 93,28 |
| ■ NO <sub>X</sub> (Betrieb) [kg]            | 119,78 | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 6,24  | 6,20  |
| ■ PM (Betrieb) [kg]                         | 2,29   | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,12  | 0,12  |



# AP 3 Quantifizierung der Umweltwirkung

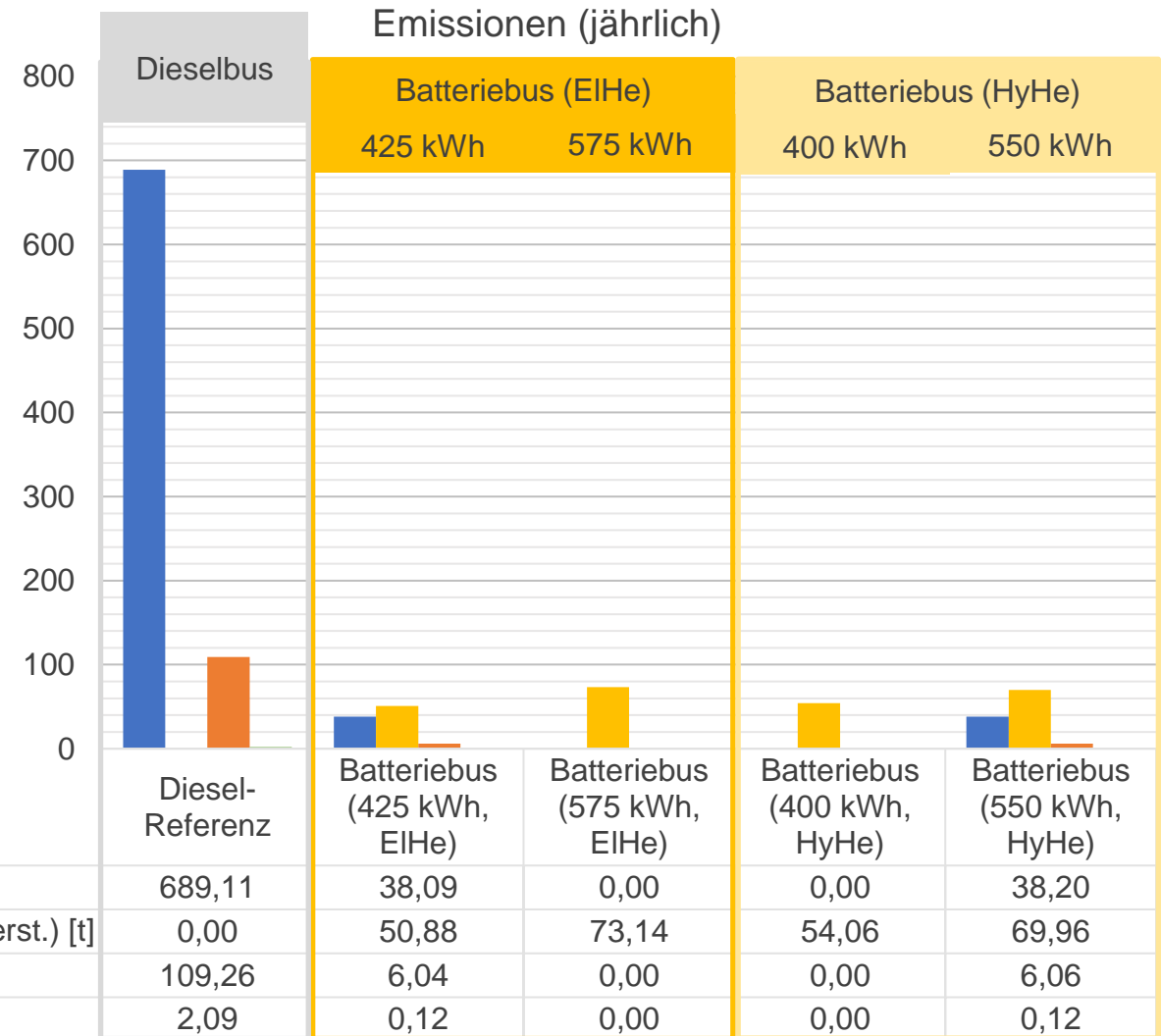
## Emissionswerte: Variante 3, Solobusse

Var. 3

- Vergleich der Emissionen für Variante 3, Linienverkehr und Schüler- und Bäderverkehr verschnitten, aufgeteilt in Solo- und Minibusfahrten (Grenze bei 25 Personen), Verschiebung von 2 Fahrten der Minibusse zu den Solobussen

Solobusse

Nutzkilometer pro Jahr: 461.448 km



|                                 |        |       |       |       |       |
|---------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| ■ CO2 (Betrieb) [t]             | 689,11 | 38,09 | 0,00  | 0,00  | 38,20 |
| ■ CO2 (Batterie-/BZ-Herst.) [t] | 0,00   | 50,88 | 73,14 | 54,06 | 69,96 |
| ■ NOX (Betrieb) [kg]            | 109,26 | 6,04  | 0,00  | 0,00  | 6,06  |
| ■ PM (Betrieb) [kg]             | 2,09   | 0,12  | 0,00  | 0,00  | 0,12  |

# AP 3 Quantifizierung der Umweltwirkung

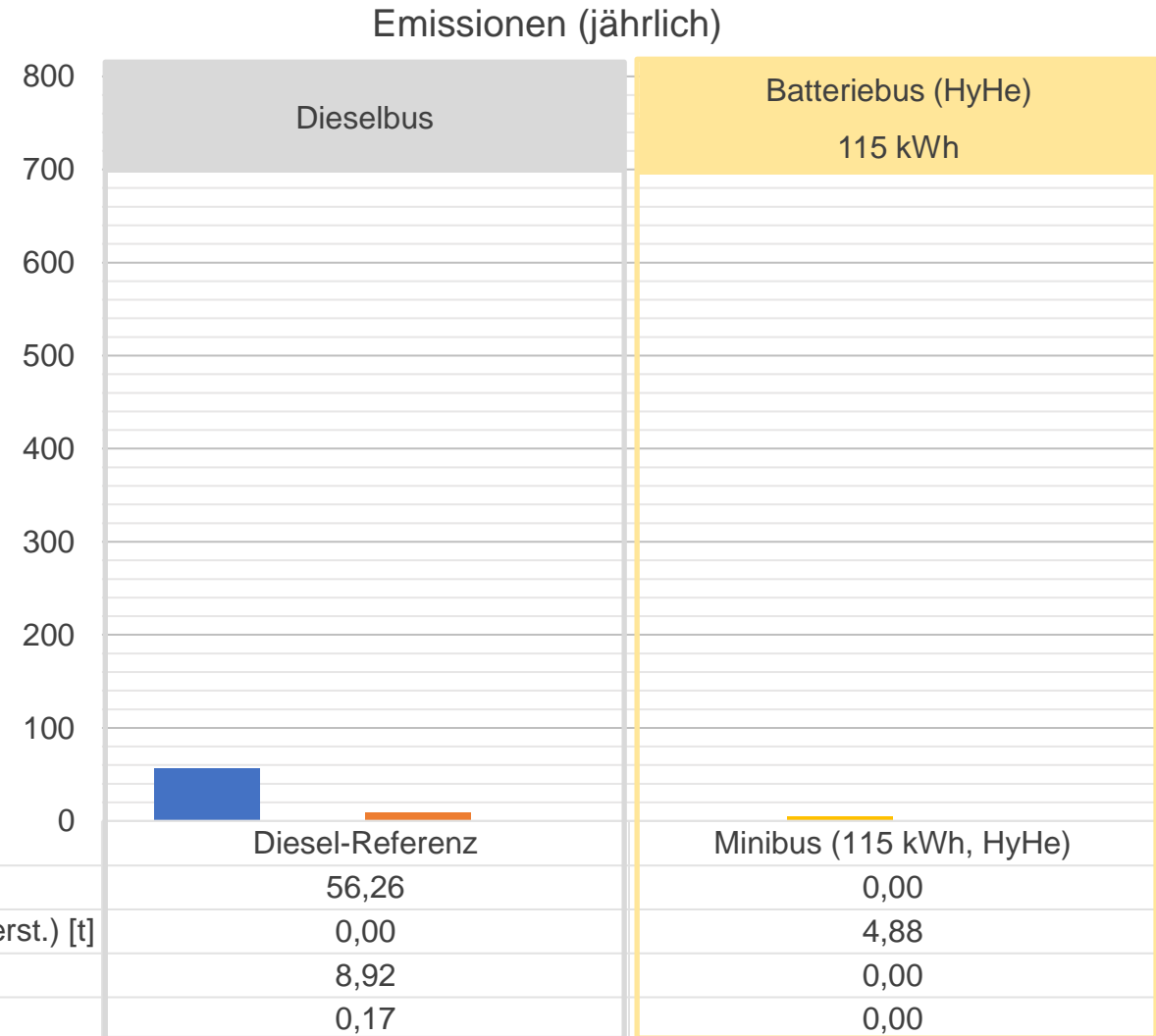
## Emissionswerte: Variante 3, Minibusse

Var. 3

- Vergleich der Emissionen für Variante 3, Linienverkehr und Schüler- und Bäderverkehr verschnitten, aufgeteilt in Solo- und Minibusfahrten (Grenze bei 25 Personen), Verschiebung von 2 Fahrten der Minibusse zu den Solobussen

Minibusse

Nutzkilometer pro Jahr: 50.627 km



|                                 | Diesel-Referenz | Minibus (115 kWh, HyHe) |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------|
| ■ CO2 (Betrieb) [t]             | 56,26           | 0,00                    |
| ■ CO2 (Batterie-/BZ-Herst.) [t] | 0,00            | 4,88                    |
| ■ NOX (Betrieb) [kg]            | 8,92            | 0,00                    |
| ■ PM (Betrieb) [kg]             | 0,17            | 0,00                    |

# AP 3 Quantifizierung der Umweltwirkung

## Emissionswerte: Variante 4, Solobusse

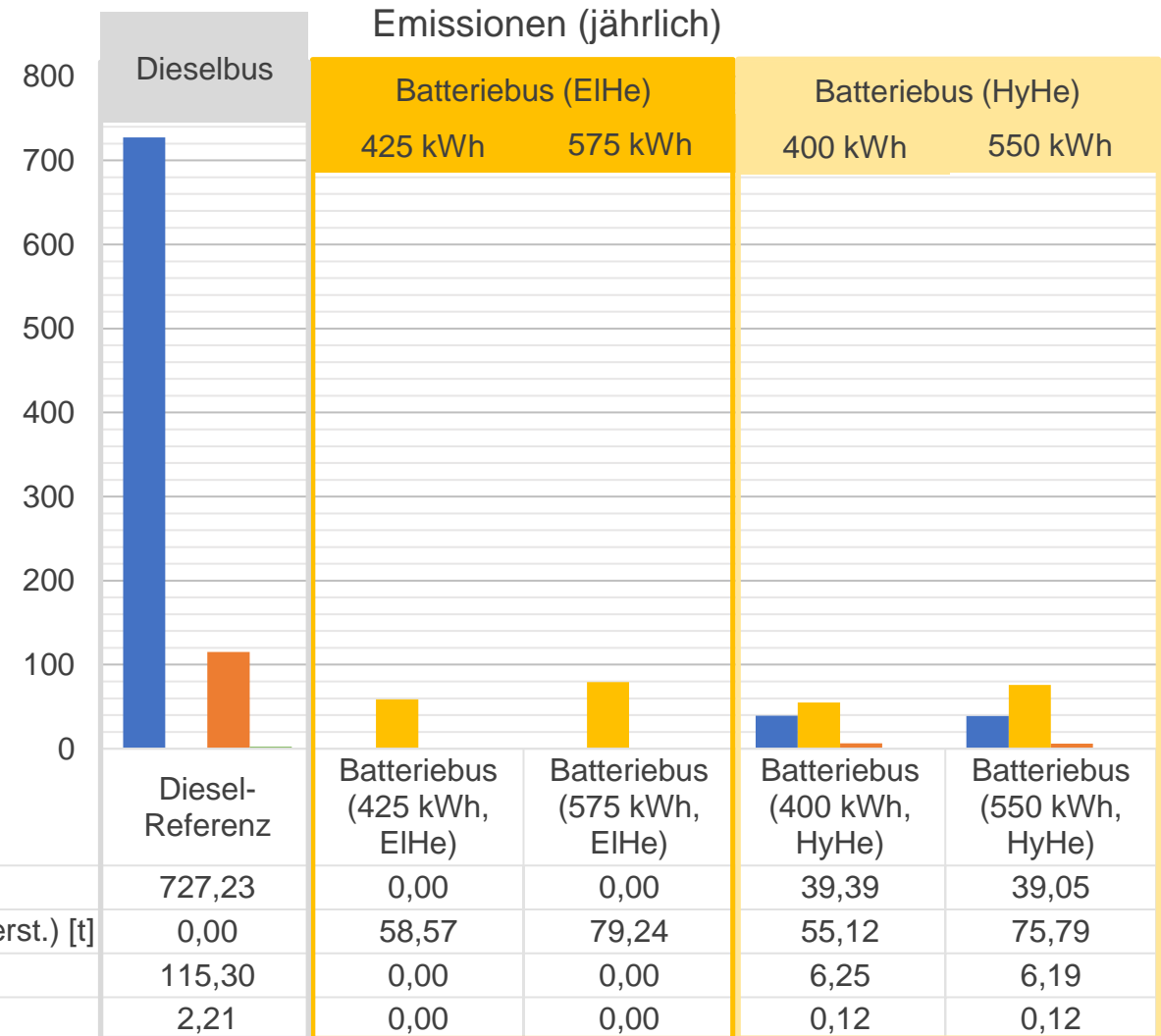
Var. 4



- Vergleich der Emissionen für Variante 4, Linienverkehr und Schüler- und Bäderverkehr verschnitten, aufgeteilt in Solo- und Minibusfahrten (Grenze bei 18 Personen), Verschiebung von 1 Fahrt der Minibusse zu den Solobussen

Solobusse

Nutzkilometer pro Jahr: 477.243 km



|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| ■ CO2 (Betrieb) [t]             | 727,23 |
| ■ CO2 (Batterie-/BZ-Herst.) [t] | 0,00   |
| ■ NOX (Betrieb) [kg]            | 115,30 |
| ■ PM (Betrieb) [kg]             | 2,21   |

# AP 3 Quantifizierung der Umweltwirkung

## Emissionswerte: Variante 4, Minibusse

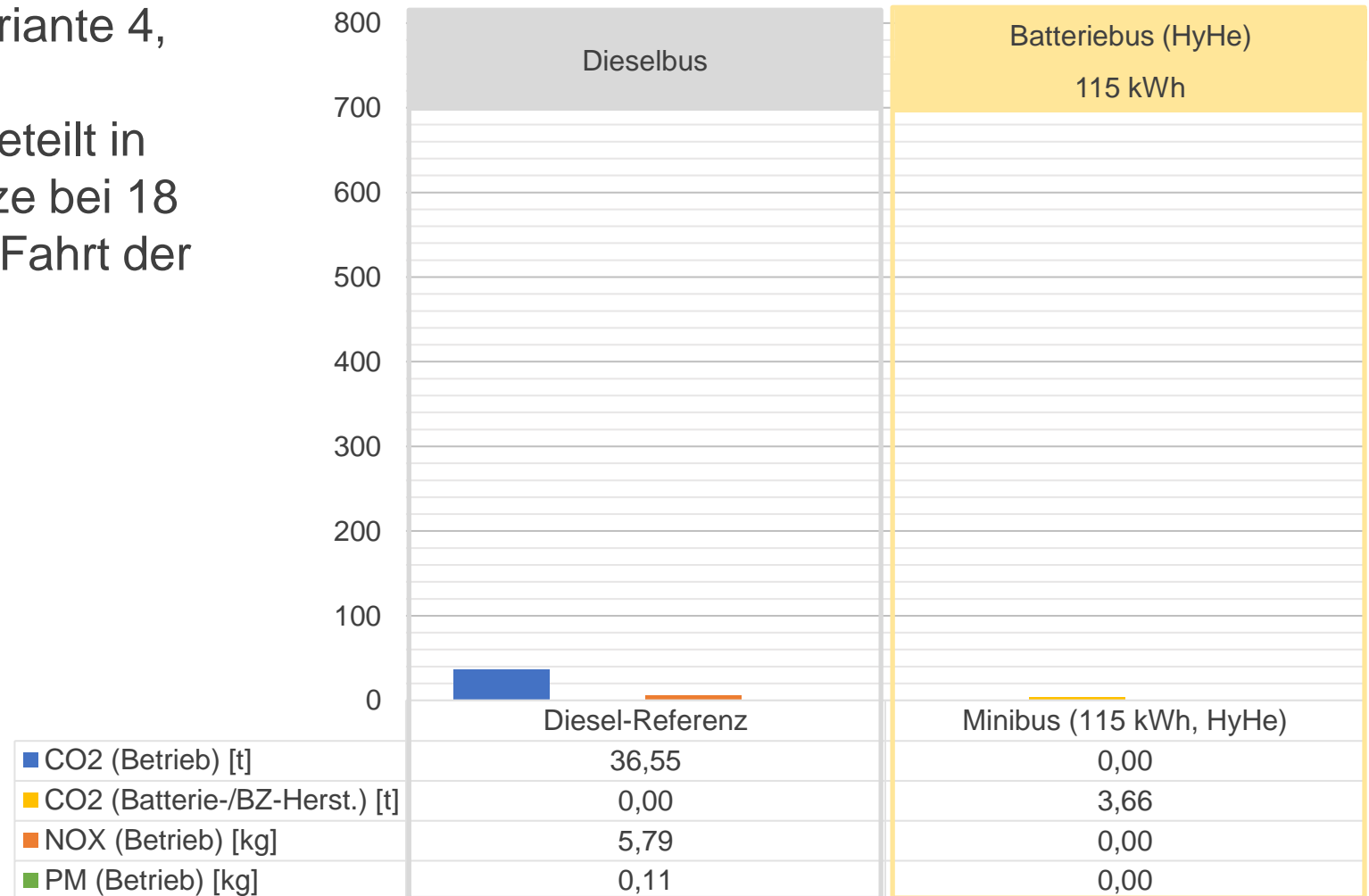
Var. 4

- Vergleich der Emissionen für Variante 4, Linienverkehr und Schüler- und Bäderverkehr verschnitten, aufgeteilt in Solo- und Minibusfahrten (Grenze bei 18 Personen), Verschiebung von 1 Fahrt der Minibusse zu den Solobussen

Minibusse

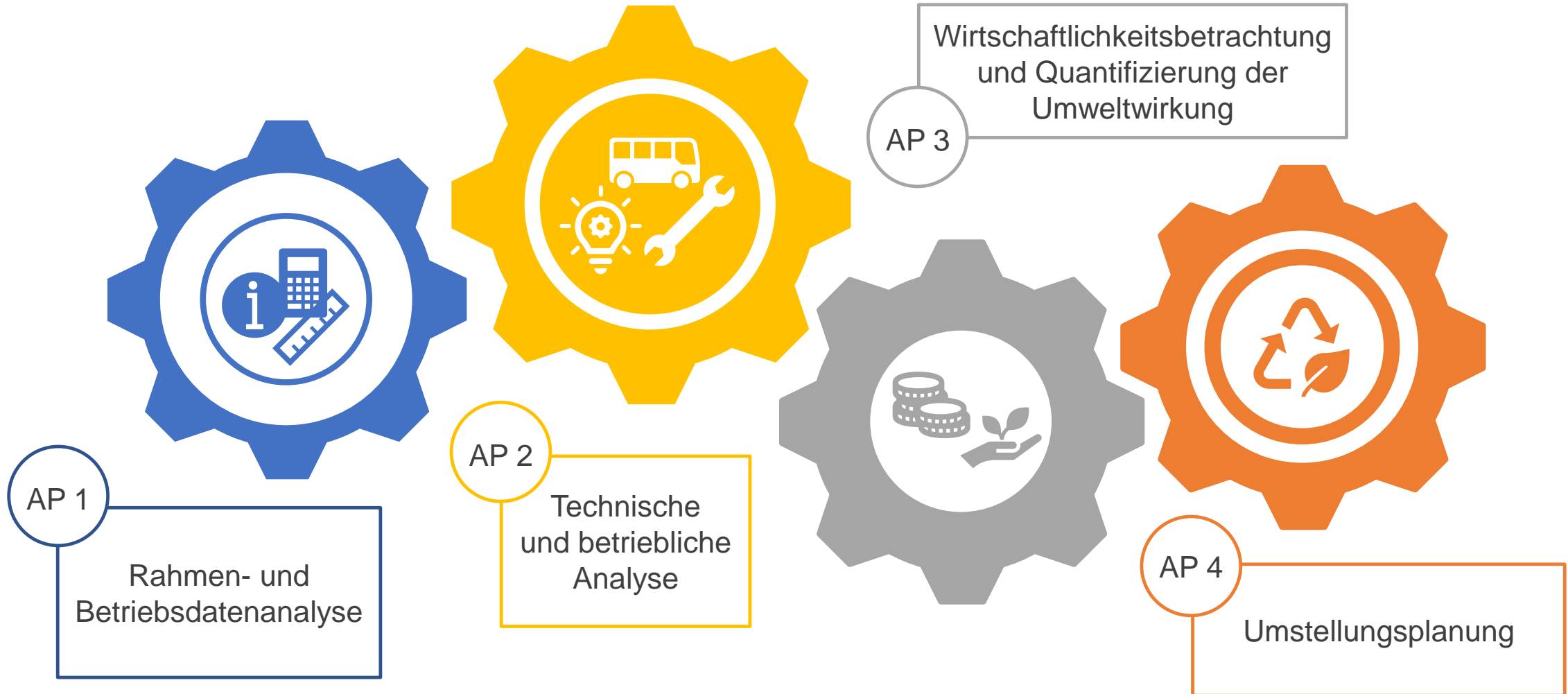
Nutzkilometer pro Jahr: 34.833 km

Emissionen (jährlich)



# AP 4 Umstellungsplanung







- In den vorherigen Arbeitspaketen wurden die betrieblichen, ökonomischen und ökologischen Konsequenzen der einzelnen Fahrzeugkonzepte der Batteriebusse eingehend analysiert und verglichen. In diesem Arbeitspaket wurde basierend auf diesen Erkenntnissen eine Technologieempfehlung mit einem konkreten Betriebskonzept und Fahrzeugkonfigurationen ausgesprochen.
- Ausgehend von den Ergebnissen der detaillierten Analyse aktueller Randbedingungen im AP 1 wurde anschließend ein Zeitplan für die Realisierung des Vorhabens erstellt.
- Mit den Randbedingungen der Piccolonia für den Betriebshof in AP 1 wurden Konzepte zum Ausbau der Ladeinfrastruktur und Abstellung der Fahrzeuge auf dem Gelände erstellt.

## AP 4 Umstellungsplanung

- Technologieempfehlung
- Umstellungsplanung Fahrzeugflotte
- Umstellungsplanung Betriebshof
- Beispielhafter Zeitplan





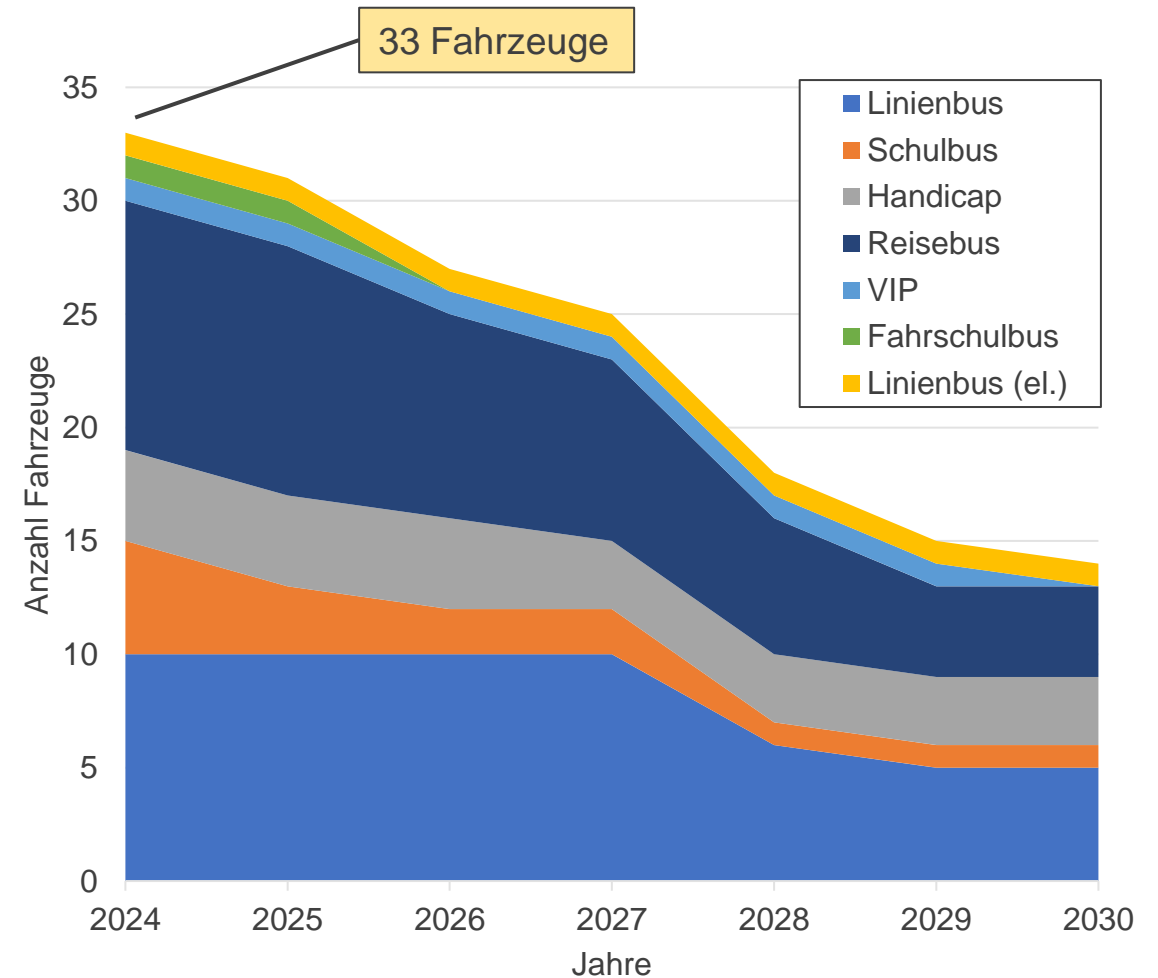
- Die Varianten 2 bis 4 führen zu keinem Mehrbedarf an Fahrzeugen gegenüber dem Dieselbetrieb. Die geringsten Gesamtkosten ergeben sich beim Einsatz von Minibussen in den Variante 3 und 4. Da die Marktverfügbarkeit von Minibussen mit mind. 18 Plätzen höher ist als mit 25 Plätzen, wird Variante 4 empfohlen.
- Empfehlung für Solobusse: Busse mit ca. 575 kWh Batteriekapazität und elektrischer Heizung
  - Größere Batterien bieten höhere Reichweiten und damit mehr Möglichkeiten, in Zukunft zusätzliche Fahrleistungen zu übernehmen. Die elektrische Heizung verursacht die geringsten Emissionen. Die Gesamtkosten für beides sind um ca. 8 % höher als bei einer moderaten Batterie und Hybridheizung (Brennstoff-Zuheizer an kalten Tagen).
- Empfehlung für Minibusse: Busse mit ca. 115 kWh Batteriekapazität und Hybridheizung
  - Die Hybridheizung bietet eine größere Reichweite als eine elektrische Heizung. Sie bietet mehr Möglichkeiten, auch außerhalb des ÖPNV-Betriebs Fahrleistungen zu übernehmen
- Die Depotladung mit Standardladegeräten und Steckerladung ist ausreichend. Es werden mindestens 4 Ladegeräte benötigt („Best Case“).
- Es wird empfohlen, auf je 2 Busse ein Ladegerät zu installieren.

## AP 4 Umstellungsplanung

- Technologieempfehlung
- Umstellungsplanung Fahrzeugflotte
- Umstellungsplanung Betriebshof
- Beispielhafter Zeitplan



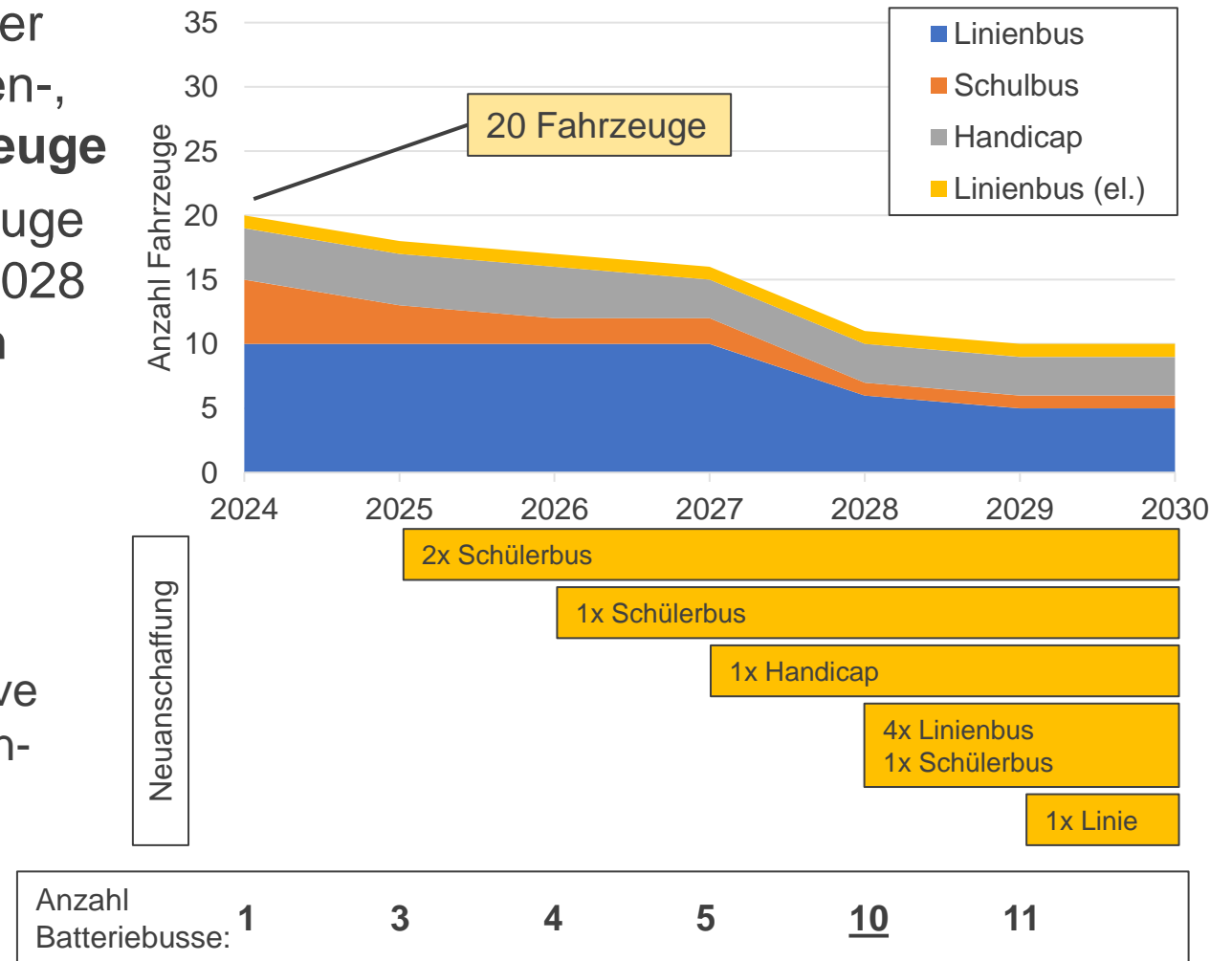
- Übersicht Fahrzeugflotte mit jeweiliger Ausstattung (Fahrzeugliste der Piccolonia) und Ausscheiden 10 Jahre nach Zulassung
  - Quelle: „Fahrzeugliste Piccolonia Januar 2024.pdf“
  - Annahme: 10 Jahre nach Zulassung scheiden Fahrzeuge aus der Flotte aus
  - In einer Liste vom Januar 2024 sind 35 Fahrzeuge aufgeführt, in dieser sind 2 Busse, die schon länger als 10 Jahre zugelassen sind.



# Umstellungsplanung Fahrzeugflotte

## Zulassung und Ausscheidung in Fahrzeugflotte

- Betrachtet werden rechts nur Busse in der Fahrzeugliste mit der „Ausstattung“ Linien-, Schul- und Handicapbusse → **20 Fahrzeuge**
- Rechts in Grafik: ausscheidende Fahrzeuge werden durch Batteriebusse ersetzt → 2028 wäre die Hälfte der Fahrzeuge elektrisch
  - Ladeinfrastruktur wäre nötig
  - 2-3 Ladegeräte erstmal ausreichend
- Ergebnis in AP 2 Umlaufplanung war ...
  - 16 Fahrzeuge (Var. 2-4), plus einer Reserve von 10 % ergeben 18 Fahrzeuge für Linien- und Schüler- und Bäderverkehr
  - Eine Reduzierung der aktuellen Anzahl ist denkbar (rechts nicht berücksichtigt)



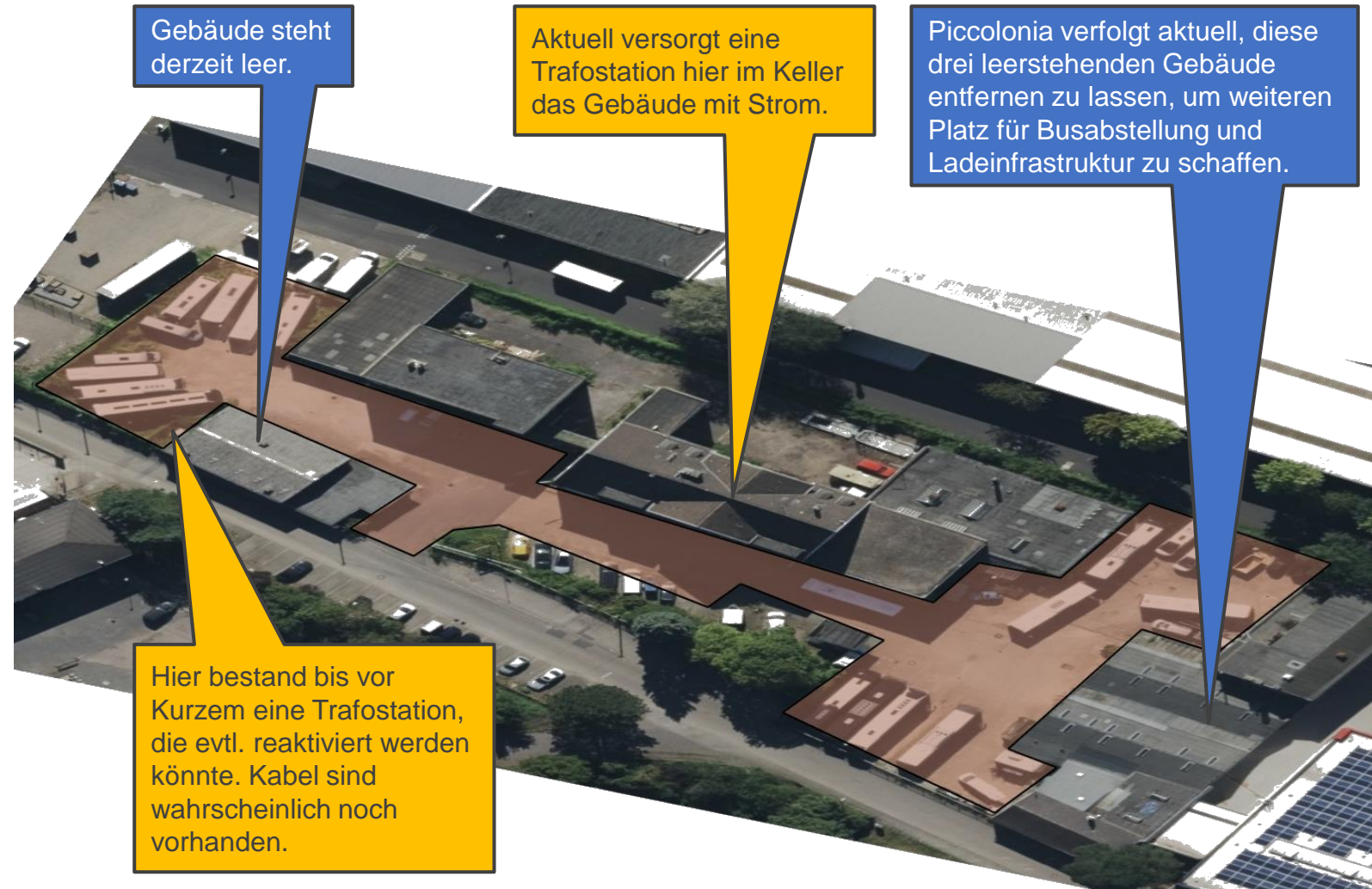
## AP 4 Umstellungsplanung

- Technologieempfehlung
- Umstellungsplanung Fahrzeugflotte
- Umstellungsplanung Betriebshof
- Beispielhafter Zeitplan

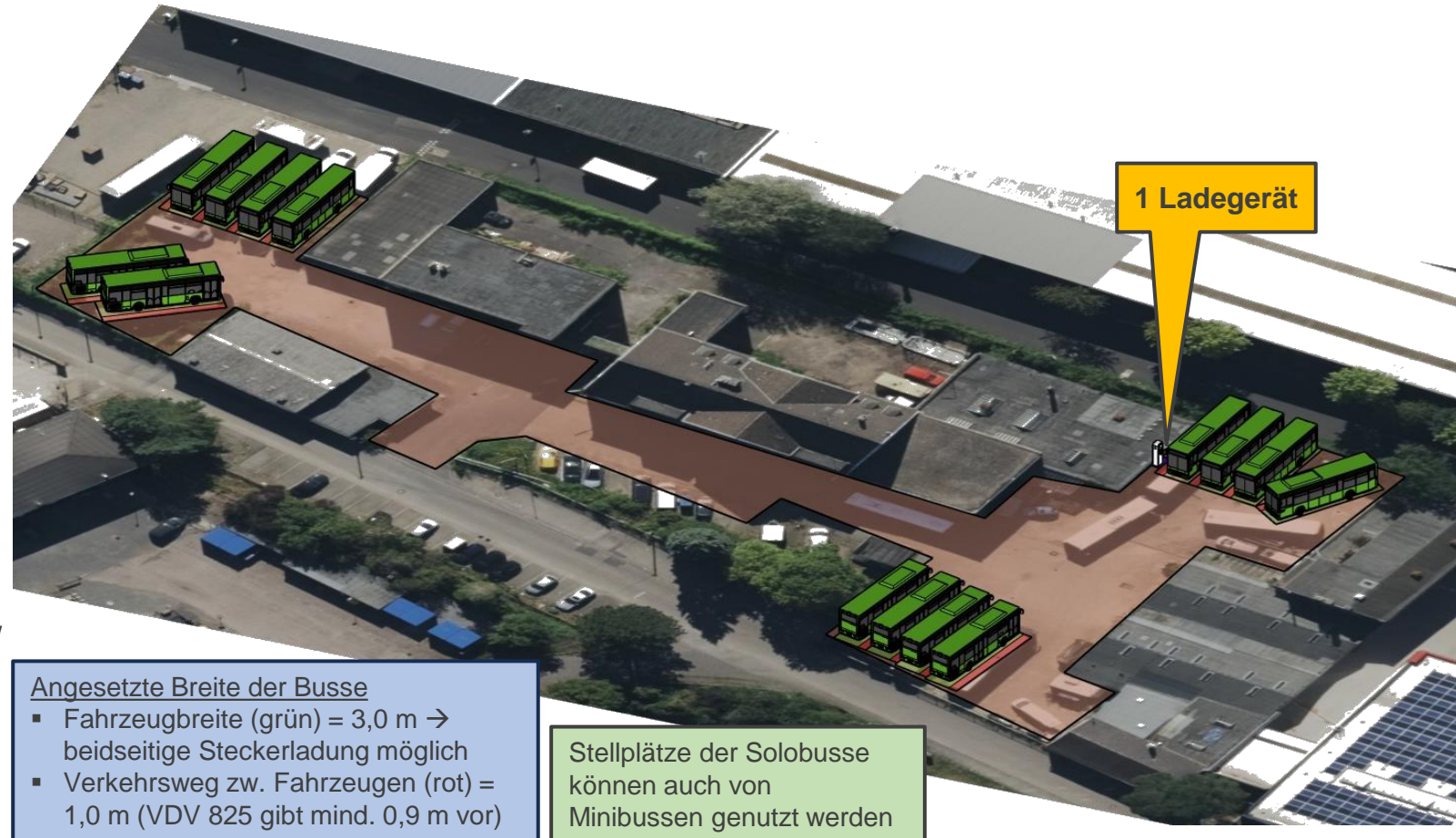


- Abmessungen aus Luftbild des Betriebshofs
- Netzanschluss aktuell: 200 kW
  - Akt. Verbrauch max. 50 kW
  - max. 1 Ladegerät (150 kW) zurüstbar
  - Ertüchtigung notwendig für weitere Flottenelektrifizierung

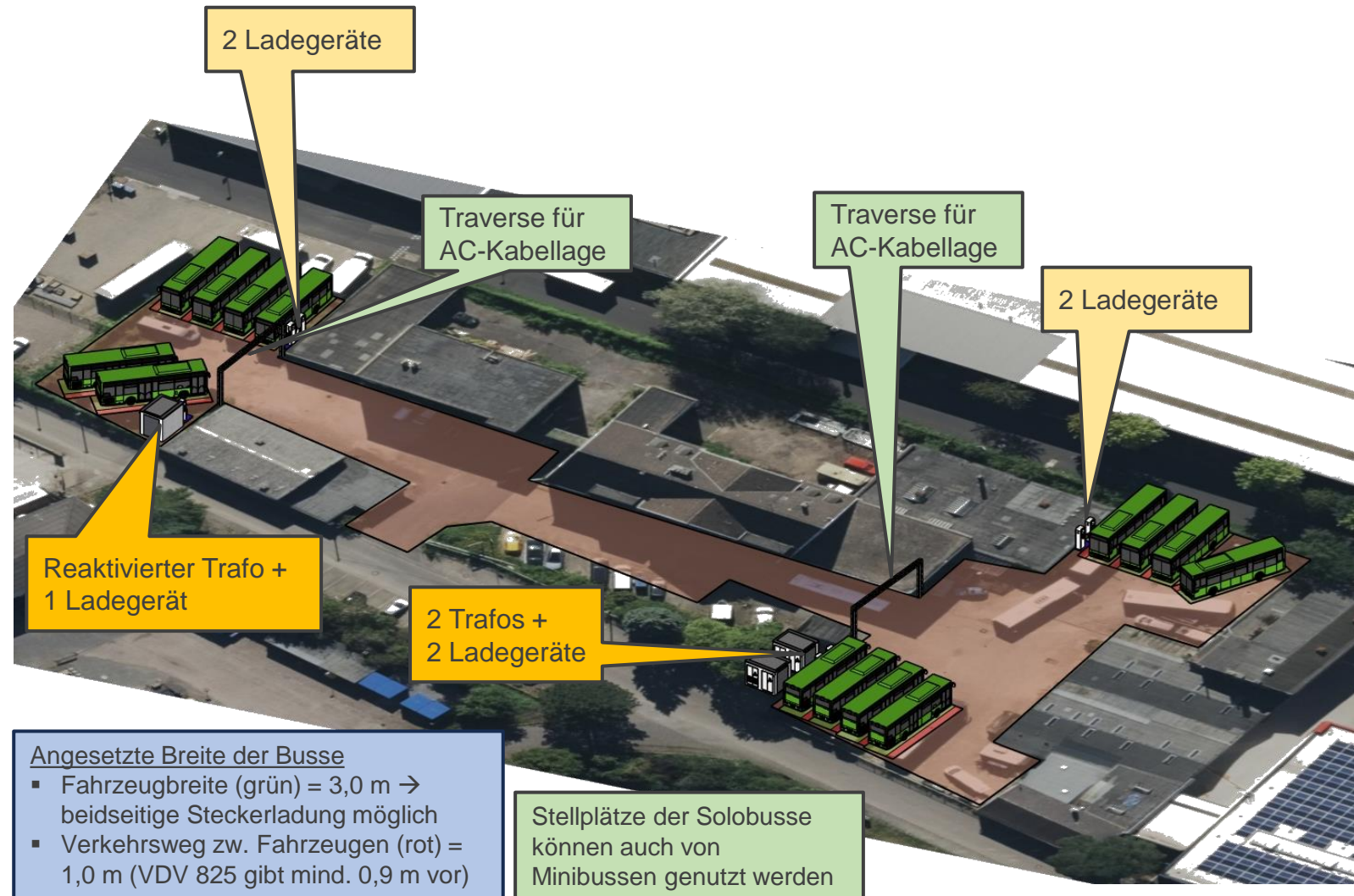
**Update im Termin am 22.08.2024:**  
Piccolonia verfolgt den Umbau des Betriebshofs. Es gibt Pläne von SNL für eine Neugestaltung.



- **Derzeit umsetzbar**
  - 1 Ladegerät nah am Gebäude (dann keine Erdarbeiten nötig), verschalten auf 2 Ladepunkte
    - Bessere Positionierung wäre zw. Bussen für einen besseren Anschluss dieser
  - 14 Stellplätze für Solobusse eingezeichnet
- **Ertüchtigung Netzanschluss**
  - 4 Ladegeräte (+ ?) → 600 kW
  - Netzanschluss mit 800-1000 kW
  - 2 Trafos á 600 kW



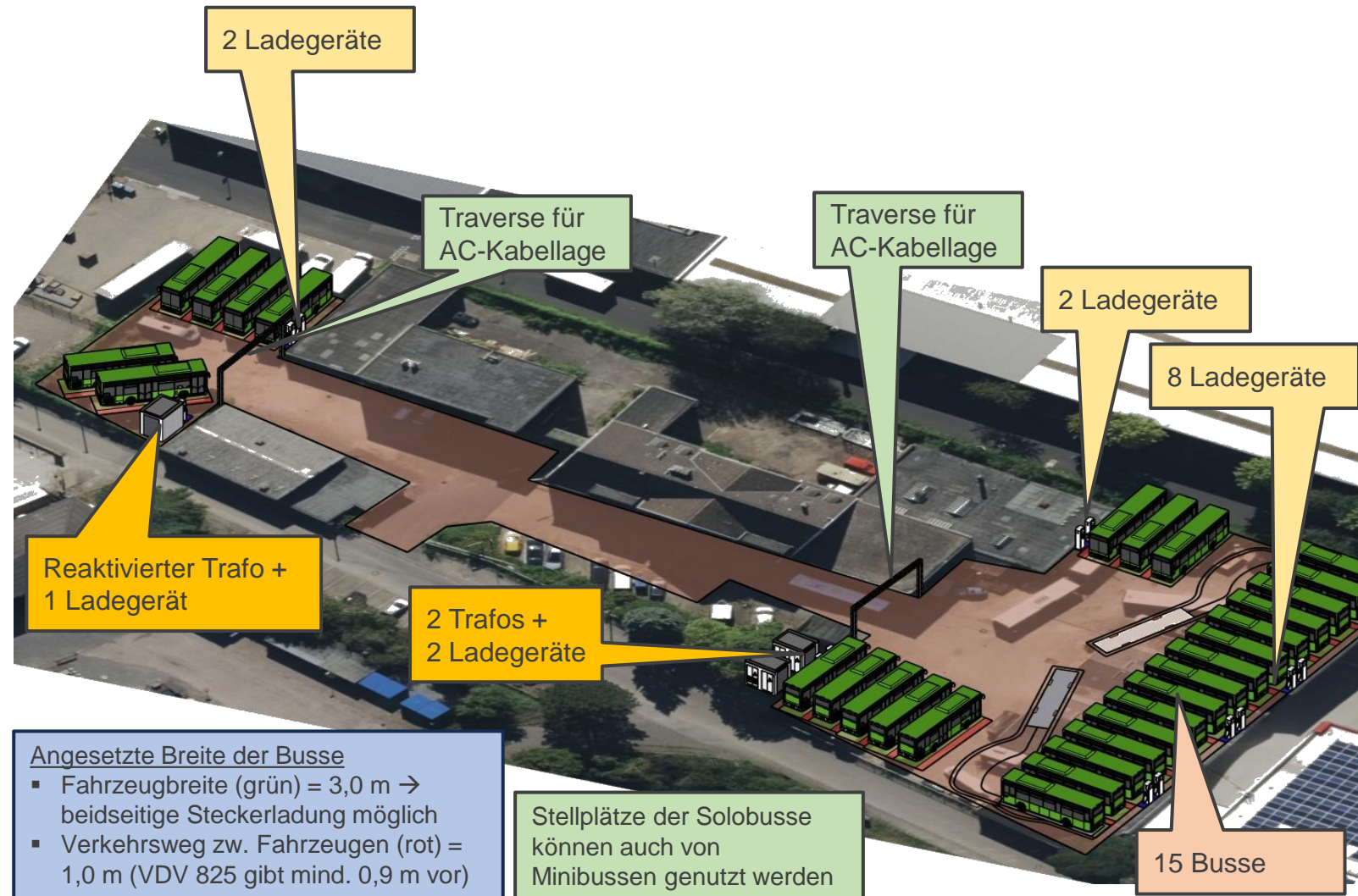
- Ideen und Möglichkeiten
  - Reaktivierung Trafo / Neubau Trafohaus
  - 4 Orte für Ladegeräte (je 2x)
  - AC-Kabellage über Traversen
  - 14 Stellplätze für Busse eingezeichnet



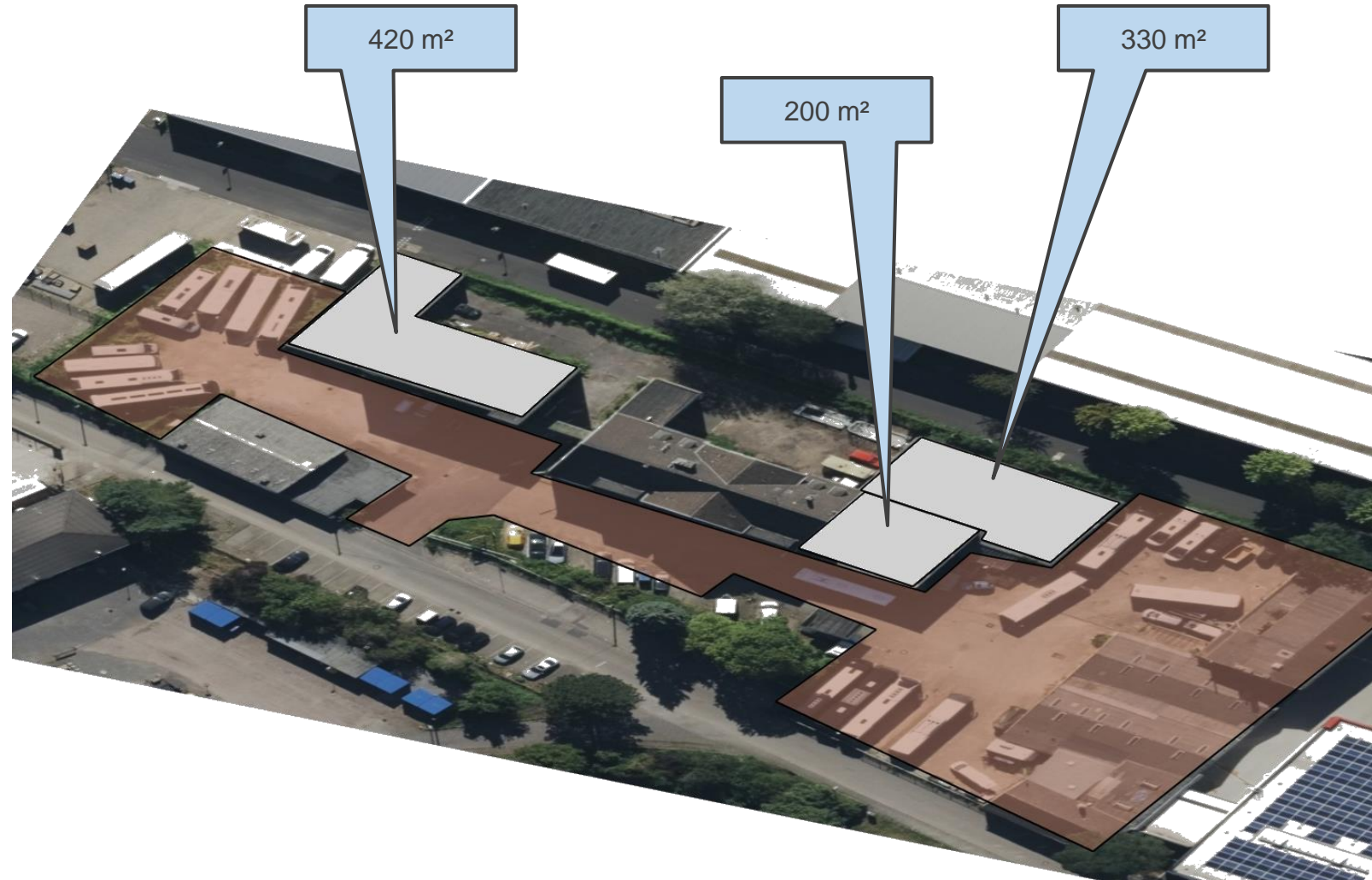


# Umstellungsplanung Betriebshof Betriebshof Piccolonia, Erweiterung Stellfläche

- Erweiterung der Stellfläche bei Entfernung von 3 Gebäuden
  - 29 Stellplätze für Busse
  - Vorkonditionierung der Busse im Betriebshof



- Flachdächer der Gebäude bieten Möglichkeit für PV
  - kann die elektrische Ladung der Busse unterstützen



## AP 4 Umstellungsplanung

- Technologieempfehlung
- Umstellungsplanung Fahrzeugflotte
- Umstellungsplanung Betriebshof
- Beispielhafter Zeitplan



# AP 4 Umstellungskonzept

## Grober beispielhafter Zeitplan

| Tätigkeit   | Jahr 1 |    |    |    | Jahr 2 |    |    |    | Jahr 3 |    |    |    | Jahr 4 |    |    |    |
|---|--------|----|----|----|--------|----|----|----|--------|----|----|----|--------|----|----|----|
|   | Q1     | Q2 | Q3 | Q4 | Q1     | Q2 | Q3 | Q4 | Q1     | Q2 | Q3 | Q4 | Q1     | Q2 | Q3 | Q4 |
| 1 Überblick über das Thema, Zusammentragen der Herausforderungen                  | █      |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |
| 2 Technologievergleich und Konzeptentwicklung (inkl. Entscheidung)                |        | █  | █  | █  |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |
| 3 Fördermittelakquise für Busse, LIS, etc. (Warten auf Förderungsbewilligung)     |        |    |    |    | ★1     |    | ★2 |    |        |    |    |    |        |    |    |    |
| 4 Beantragung und Herrichtung Netzanschluss                                       |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |
| 5 Erstellung Lastenheft Busse u. LIS, sonst. Vergabeunterlagen (interne Freigabe) |        |    |    |    |        | █  | █  |    |        |    |    |    |        |    |    |    |
| 6 Ausschreibung und Vergabe von Bussen und Infrastruktur                          |        |    |    |    |        |    |    |    | ★3     |    |    |    |        |    |    |    |
| 7 Lieferzeit der Busse  |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |
| 8 Umbau der Ladeorte und Errichtung von Ladeinfrastruktur (inkl. Planung)         |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |
| 9 ggf. Betriebshofumbau (inkl. Planung)   |        |    |    | █  | █      | █  | █  | █  | █      | █  | █  | █  | █      | █  | █  | █  |
| 10 Ertüchtigung der Werkstatt   |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |
| 11 Fahrerauswahl und Fahrerschulungen - zusammen mit Hersteller                   |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |
| 12 Schulungen Werkstattpersonal (z.B. Hochvoltschulungen und mit Herstellern)     |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |
| 13 Integration der Busse und LIS in Prozesse und IT (inkl. Planung)               |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |
| 14 Inbetriebnahme Betriebshofs- und Lademanagement (inkl. Beschaffung)            |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |
| 15 Erprobung der Busse im Liniendienst  |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    | ★5 |
| 16 Kommunikation und Außendarstellung (ggü. Politik, Öffentlichkeit, Anwohnern)   |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |        |    |    |    |

**Beispiel**

- ★1 Deadline Fördermittelantrag
- ★2 Eingang Förderbewilligung
- ★3 Auslösung Bestellung bei Hersteller
- ★4 Auslieferung der ersten Fahrzeuge, Beginn Erprobung
- ★5 Alle Fahrzeuge ausgeliefert, Aufnahme Liniendienst

# Machbarkeitsstudie: Alternative Antriebe für Piccolonia Bus-Reisen

Abschlussbericht

22.11.2024

Philipp Sinhuber, Alexander Funke | eBusplan GmbH

