



Ergebnisdarstellung zur Untersuchung

Geeignete Antriebstechnologien im ÖPNV im Zuge der Dekarbonisierungsstrategie des Landkreises Main-Tauber

Inhalt

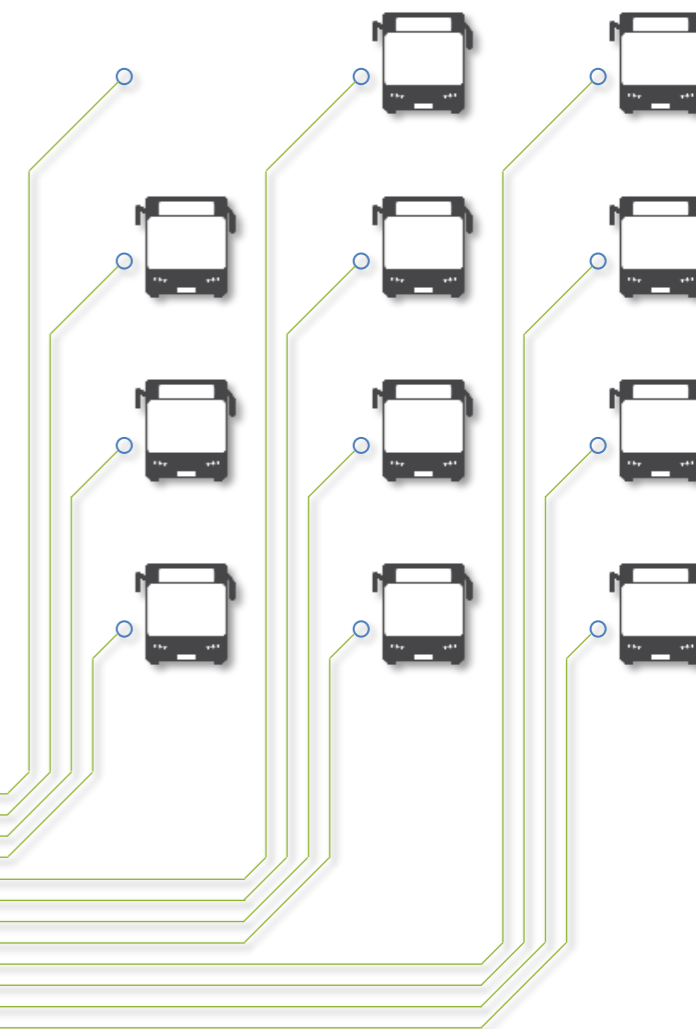
AP 2: Rahmenbedingungen und Grundlagen

AP 3: Bewertung saubere Antriebe

AP 4: Bewertung emissionsfreie Antriebe

AP 5: Kostenübersicht Vorzugstechnologie

AP 6: Handlungsempfehlung




AP 1 (Datenerfassung) ist nicht in der Ergebnisdarstellung aufgeführt

The background image shows a busy street scene. A large orange and blue bus is visible, with a Union Jack flag on its side. In the foreground, several motorcycles are parked or moving, with riders wearing helmets. A large plume of dark exhaust smoke is rising from the ground, partially obscuring the lower part of the scene. A green rounded rectangle is overlaid on the image, containing the text 'Warum Emissionsfrei?'.

**Warum
Emissionsfrei?**

Rechtliche Grundlagen (Auswahl)



Beschaffung	Umweltaspekte	Arbeitssicherheit	Sonstiges
 Clean Vehicles Directive (CVD)	Richtlinie 2008/50/EG (Saubere Luft)	Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)	Erneuerbare Energien Gesetz (EEG)
Vergabeverordnung (VGV)	Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)	DGUV Information 200-005	
	EURO-Abgasnorm (EG-Verordnung Nr. 715/2007)	Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)	
	Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV)		

Clean Vehicles Directive für ÖPNV-Busse

Anwendungsbereich

- Verträge über Kauf, Leasing, Miete, Ratenkauf durch öffentliche Auftraggeber oder Aufgabenträger (Berücksichtigung der Vergaberichtlinien 2014/24/EU und 2014/25/EU)
- Öffentliche Dienstleistungsaufträge nach VO 1370/2007
- PKW / leichte Nutzfahrzeuge / Kleinbusse: M1, M2, N1
- Schwere Nutzfahrzeuge: N2, N3
- Busse (ohne Reisebusse): M3, nur Klasse I und A → Standardlinienbus

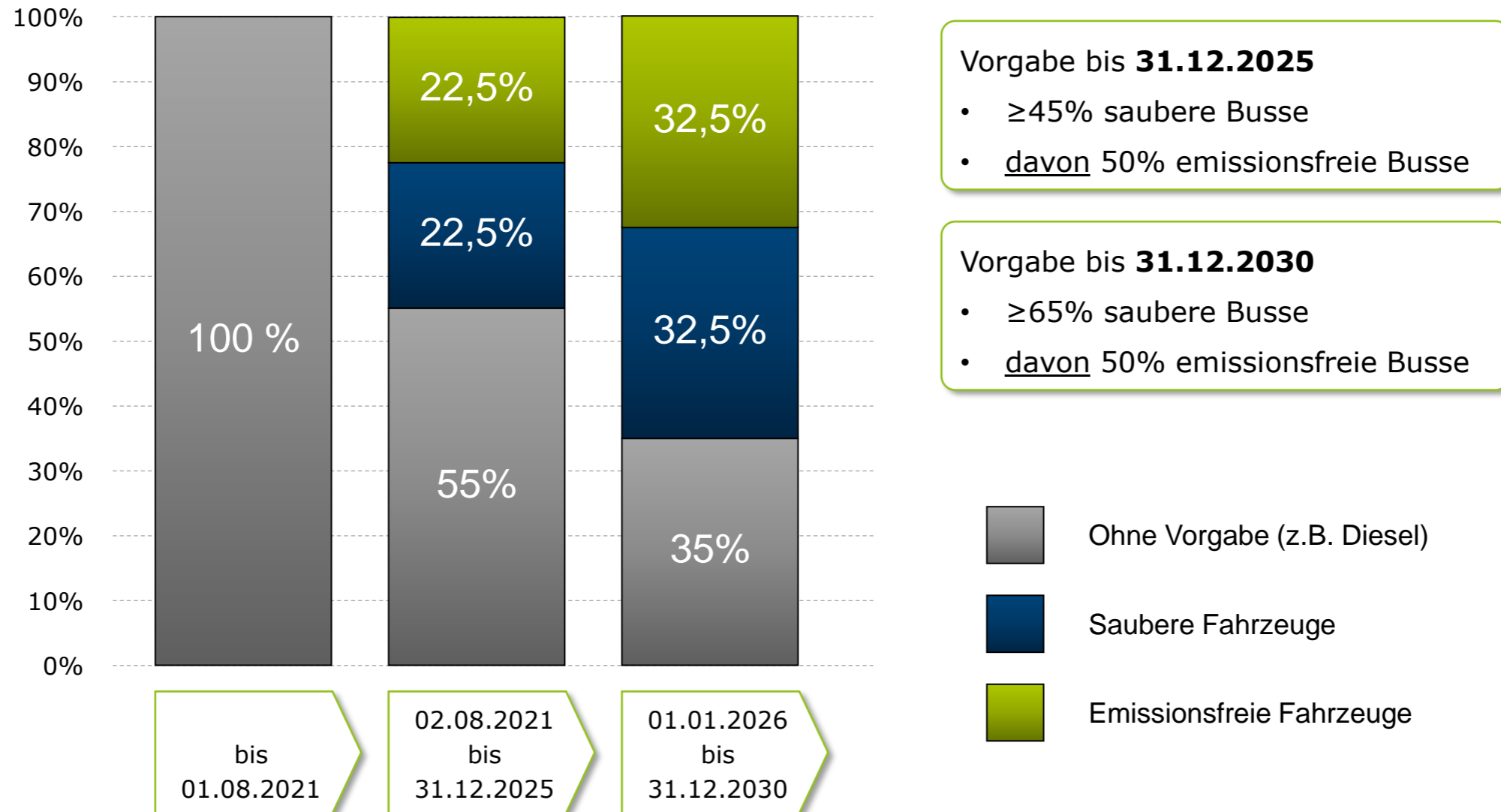
Nationale Umsetzung

- Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG) [Mai 2021]
- Gesetze auf Bundesländer-Ebene [jetzt umzusetzen]



- Gültig (bundesweit) seit 02.08.2021
 - Gültig für nach Stichtag aufgerufene Wettbewerbe / Beschaffungen
- Bundesweit verpflichtend definierte Beschaffungsquoten für öffentliche Aufträge
 - Beschaffungsquoten für „saubere“ und „emissionsfreie“ Busse
 - Bezogen auf alle in der jeweiligen Referenzperiode beschafften Fahrzeuge (Zeitpunkt der Auftragsvergabe)
- Definiert in Referenzperioden
 - 02.08.2021 bis 31.12.2025
 - 01.01.2026 bis 31.12.2030

CVD Quoten für ÖPNV-Busse



CVD Definitionen

Definition saubere Fahrzeuge:

- Fahrzeuge mit „alternativen Kraftstoffen“ nach RIL 2014/94/EU

Artikel 2 Nr. 1 und Nr. 2:

- [...] Kraftstoffe oder Energiequellen, die zumindest teilweise als Ersatz für Erdöl als Energieträger für den Verkehrssektor dienen und die zur Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen*

Inkl. Plugin-Hybrid-Busse mit Dieselantrieb, wenn elektrisch geladen wird

Elektrizität

Wasserstoff

Biokraftstoffe*¹*²

Synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe*²

Erdgas inkl. Biomethan, CNG, LNG

LPG

- Ausnahme: Kraftstoffe, die aus Rohstoffen mit Risiko hoher Landnutzungsänderungen erzeugt wurden

*¹ gemäß der Definition in Artikel 2 Buchstabe i der Richtlinie 2009/28/EG

*² Nicht vermischt mit konventionellen fossilen Brennstoffen

CNG - komprimiertes Erdgas | LNG - Flüssigerdgas | LPG - Flüssiggas

CVD Definitionen

Definition emissionsfreie Fahrzeuge

- Sauberes Fahrzeug (nach Definition) ohne Verbrennungsmotor
 - Sauberes Fahrzeug (nach Definition) mit Verbrennungsmotor
und
 - CO₂ Emission < 1 g CO₂ / kWh
Gemessen entsprechend Verordnung (EG) Nr. 595/2009
- oder
- CO₂ Emission < 1 g CO₂ / km
Gemessen entsprechend Verordnung (EG) Nr. 715/2007

Derzeit nur
Elektrobusse und
Brennstoffzellenbusse
sowie H₂-Verbrenner

CVD in Deutschland

Fazit zur CVD / SaubFahrzeugBeschG

- Bundesquote ist 1:1 auf Länder heruntergebrochen, Länder können zusammenarbeiten
- Zeiträume sind bekannt



Die breite Einführung von alternativen Antrieben & E-Mobilität im Bus ÖPNV ist bundesweit verpflichtend und wird die meisten Betreiber betreffen



Die Umlegung der Quoten auf Regionalebene bzw. Betreiberseite ist unbekannt



Die Art und Weise der Quotenumlegung ist unbekannt
(z.B. Vorschrift oder Subvention)

A green rounded rectangular box containing the text 'Technische Grundlagen'. The background of the slide is a photograph of a complex electronic assembly with multiple green printed circuit boards (PCBs) populated with various components like chips and capacitors, and connected by a dense network of black and colored wires.

Technische Grundlagen

A dark blue rounded rectangular box containing the text 'Emissionsfreie Fahrzeugtechnik'.

**Emissionsfreie
Fahrzeugtechnik**

Elektrobusse

E-Busse unterscheiden sich hinsichtlich ihrer **Ladestrategie**

E **Depot-Ladung**

Große Energiebatterie – maximale Reichweite
Nachladung nur in Betriebspausen
Ladung über CCS (selten Pantograph)

E **Gelegenheitsladen I (Depot- & Zwischenladung)**

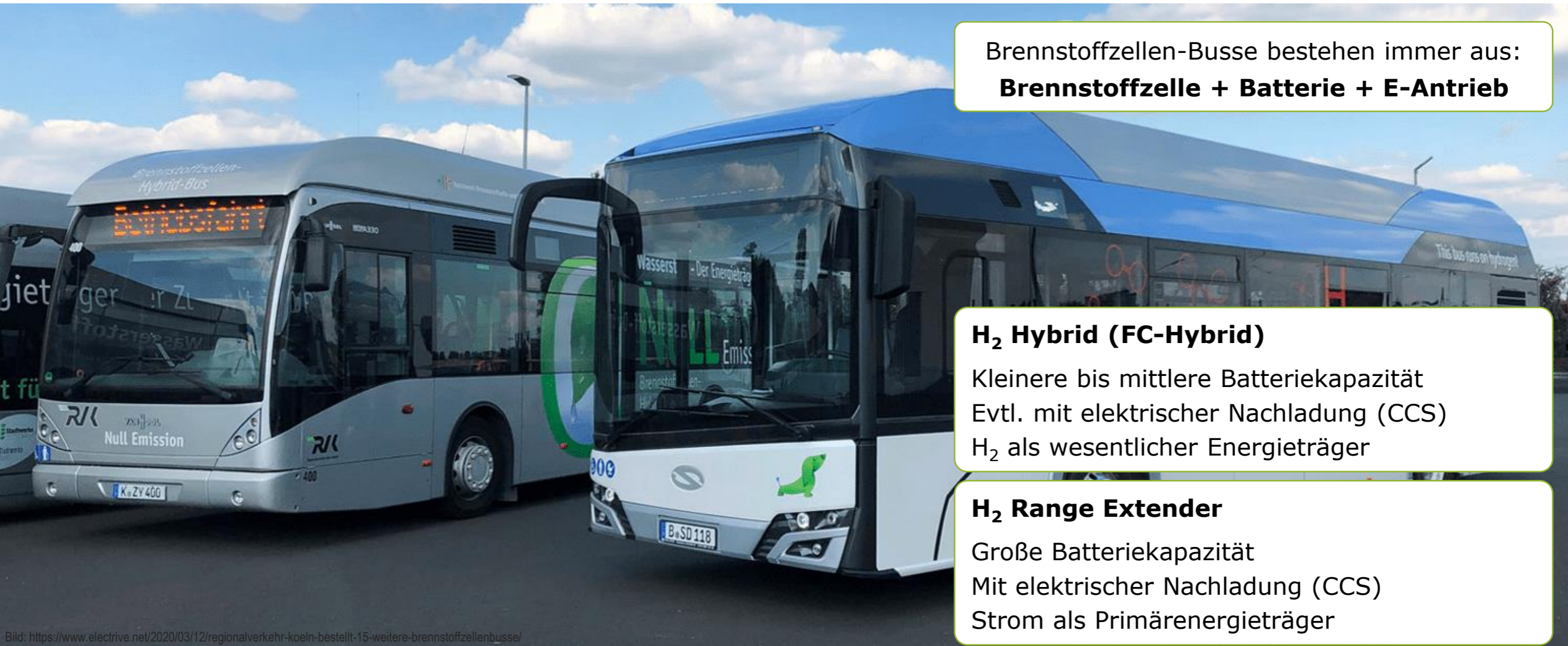
Große Energiebatterie – maximale Reichweite
Vereinzelt Zwischenladen (z.B. Wendestellen)
Ladung über CCS oder Pantograph

P **Gelegenheitsladen II**

Kleine Leistungsbatterie – kurze Wegstrecken
Häufiges Zwischenladen (Halte- & Wendestellen)
Ladung über Pantograph



Brennstoffzellenbusse



Brennstoffzellen-Busse bestehen immer aus:
Brennstoffzelle + Batterie + E-Antrieb

H₂ Hybrid (FC-Hybrid)
Kleinere bis mittlere Batteriekapazität
Evtl. mit elektrischer Nachladung (CCS)
H₂ als wesentlicher Energieträger

H₂ Range Extender
Große Batteriekapazität
Mit elektrischer Nachladung (CCS)
Strom als Primärenergieträger

Bild: <https://www.electrive.net/2020/03/12/regionalverkehr-koeln-bestellt-15-weitere-brennstoffzellenbusse/>

Elektrische Antriebstechnologien

Energiezuführung

CCS Steckkontakt
bis 200 A (ca. 150 kW)



Pantograph / Stromabnehmer
> 600 A (500 kW +)



Brennstoffzelle
konfigurationsabhängig



Traktionsbatterie



Energiebatterie

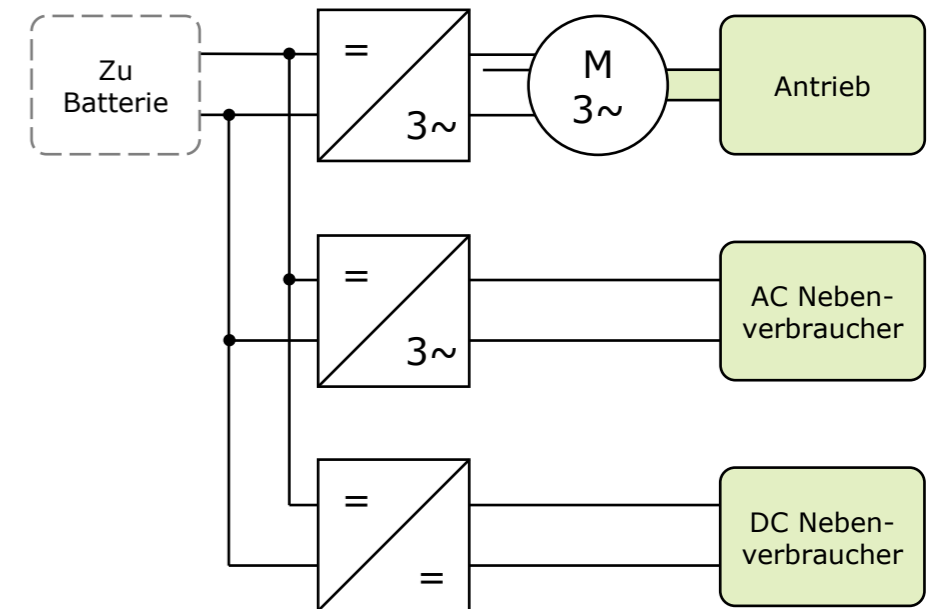
- Z.B. NMC / LFP / Festkörper
- Hohes Speichervermögen
 - Typ. > 400 kWh
- Geringes Leistungsvermögen
 - Typ. 1,5 C



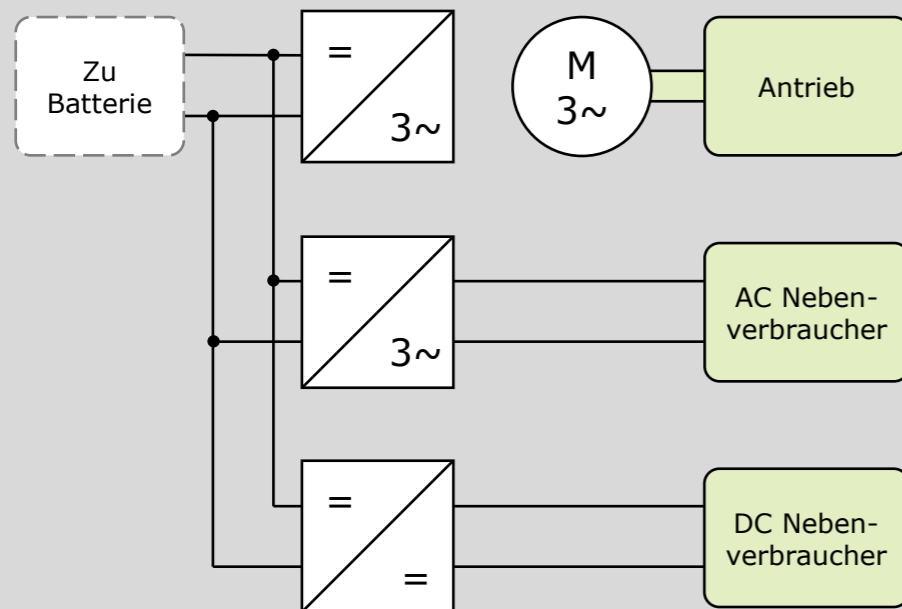
Leistungsbatterie

- Z.B. LTO
- Geringes Speichervermögen
 - Typ. < 150 kWh
- Hohes Leistungsvermögen
 - Typ. > 4 C

Elektrischer Antriebsstrang



Elektrischer
Antriebsstrang

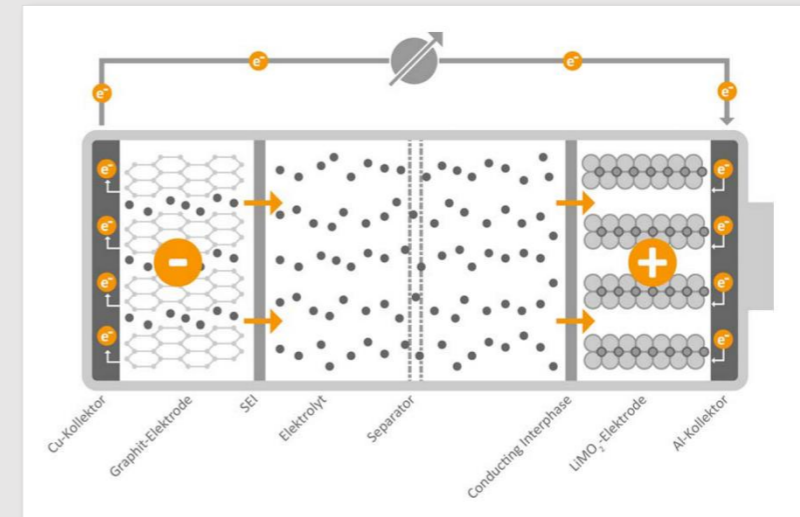


Nebenverbraucher im Antriebsstrang

- Fahrzeug-Klimatisierung (HVAC)
 - Wärmepumpe
 - Widerstandsheizung
 - Biodiesel
- Lenkhilfepumpe & Druckluftkompressor
- Fahrgastinformation, Beleuchtung
- Monitoringsysteme
- Steuereinheiten / Bordrechner

Kernkomponente: Traktionsbatterie

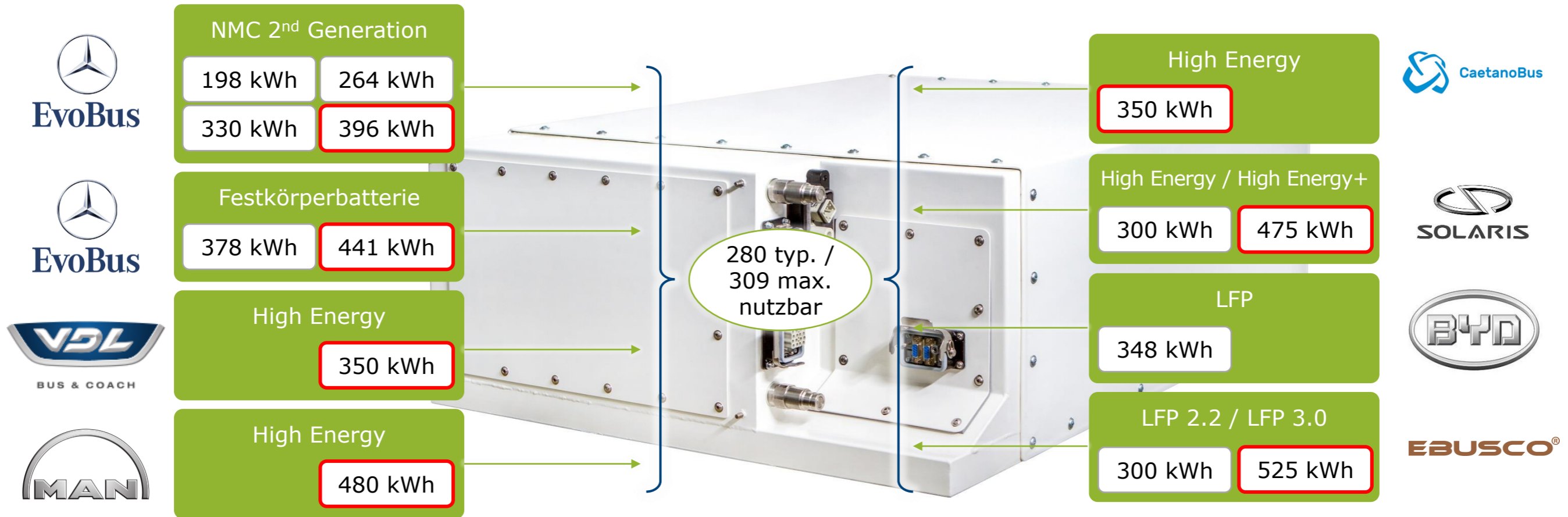
- i** Elektro-Chemischer Energiespeicher
- i** Stand der Technik für Batterie-elektrische Busse & PKW und Nfz
- i** Verschiedene Zellchemien am Markt (z.B. LTO, NMC, LFP) mit unterschiedlichen Eigenschaften
- i** Primär Unterscheidung in: Energie- und Leistungsbatterie
- i** **Energiebatterie**
Hohe Kapazität & reduzierte Ladeleistung
- i** **Leistungsbatterie**
Hohe Ladeleistung & reduzierte Kapazität



Energiespeicherung durch chemische Prozesse an Anode und Kathode. Ionen können innerhalb der Zelle „wandern“, Elektroden werden über äußeren Stromkreis geführt
⇒ Entnahme oder Eintrag elektrischer Arbeit

Bild: E. Rahimzai, K. Sann und M. Dr. Vogel, Kompendium: Li-Ionen Batterien Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen, Frankfurt am Main: VDE Verband der Elektrotechnik, 2015

Typische Batteriekapazitäten Standardbus (12 m)



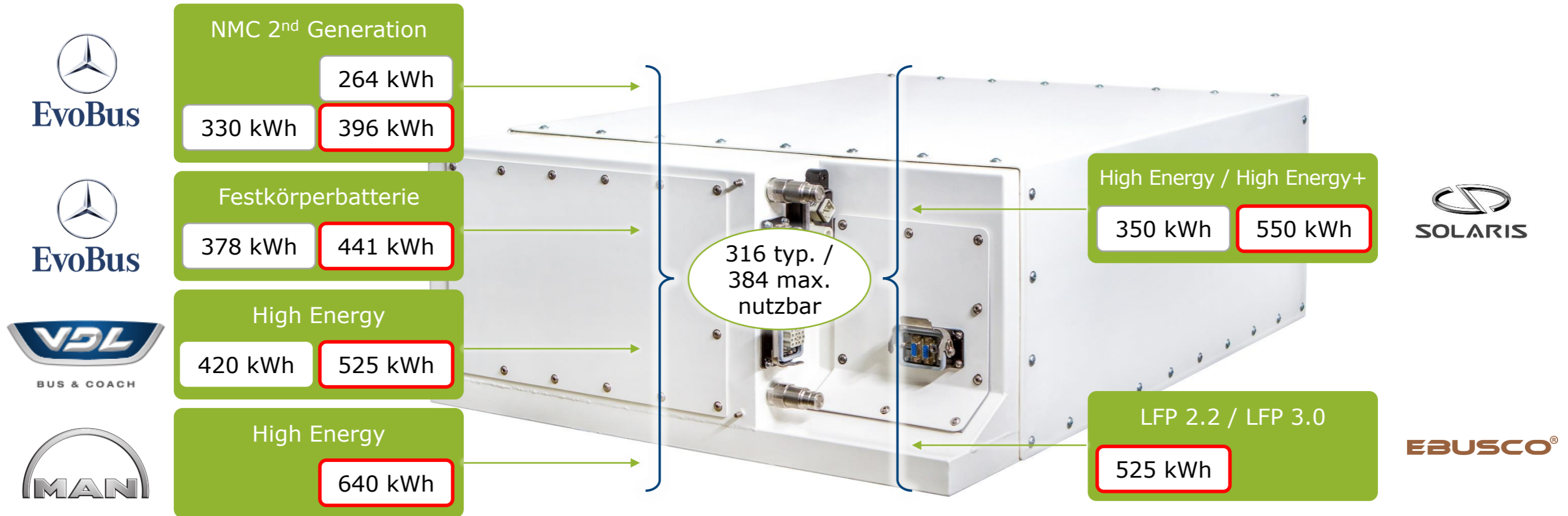
Vorgehen:

Auswahl hoher und marktüblicher Kapazitätswerte versch. Anbieter

Bewertung nutzbarer Kapazitätsanteil (Erfahrungswert)

Mittelwertbildung („typischer“ Wert) und höchster Wert eines Anbieters („max.“ Wert)

Typische Batteriekapazitäten Gelenkbus (18 m)



Vorgehen:

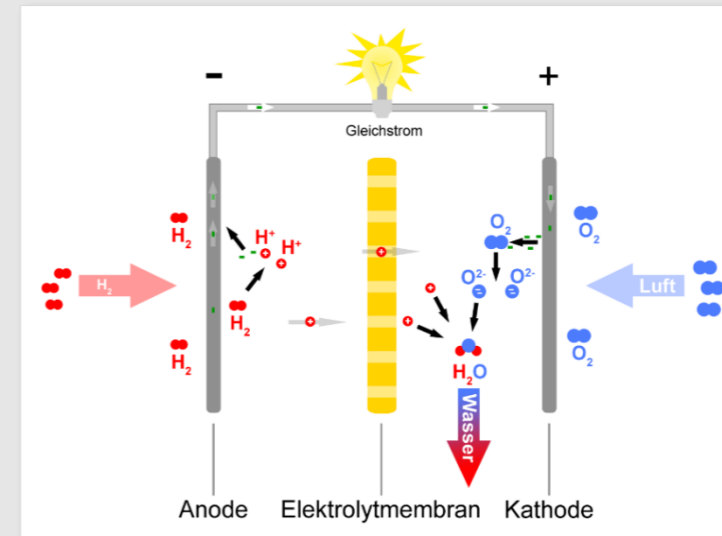
Auswahl hoher und marktüblicher Kapazitätswerte versch. Anbieter

Bewertung nutzbarer Kapazitätsanteil (Erfahrungswert)

Mittelwertbildung („typischer“ Wert) und höchster Wert eines Anbieters („max.“ Wert)

Kernkomponente: Brennstoffzelle

- i Energiewandler, kein Energiespeicher
- i Energiespeicher ist Wasserstoff (H_2)
Oxidationsmittel ist Sauerstoff (O_2)
aus der Umgebungsluft
- i Vorherrschender Typ:
Proton Exchange Membrane (PEM)
- i Erfordert Umgebungskomponenten wie
Kompressoren
- i Möglichst statischer Betrieb gewünscht
(Lebensdauer, Effizienz)



Energiewandlung durch umgekehrte Elektrolyse: Auf Anodenseite werden dem H_2 Elektronen entzogen und über einen äußeren Stromkreis geführt (elektrische Arbeit). Die Membran ist für Protonen durchlässig. Auf Kathodenseite oxidieren H_2 Protonen, Elektronen und O_2 zu H_2O

Wasserstoff Tankkapazität



Vertriebsaussage

37,5 kg



EvoBus

Medienberichte

30...40 kg



SOLARIS

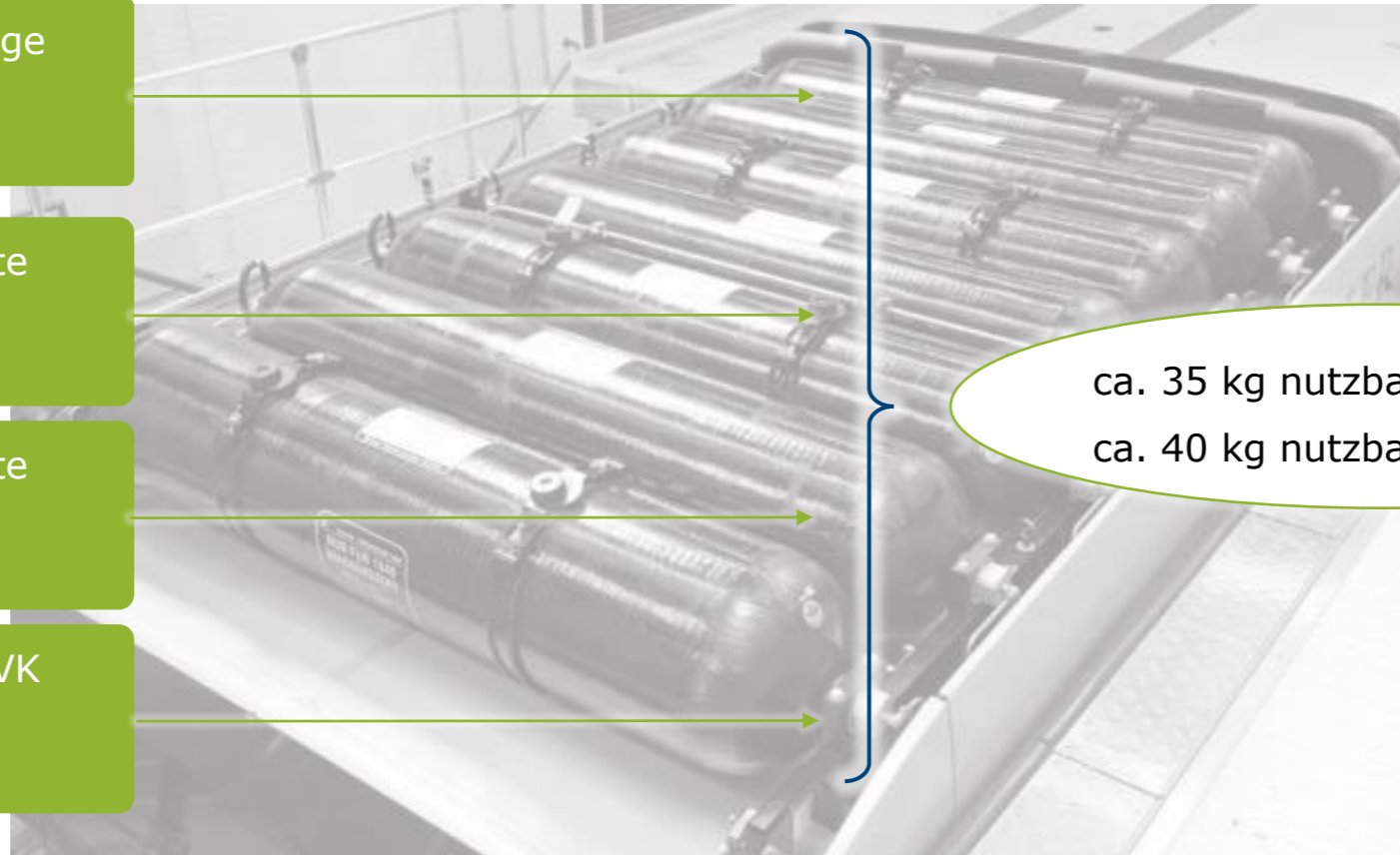
Medienberichte

36,8 kg



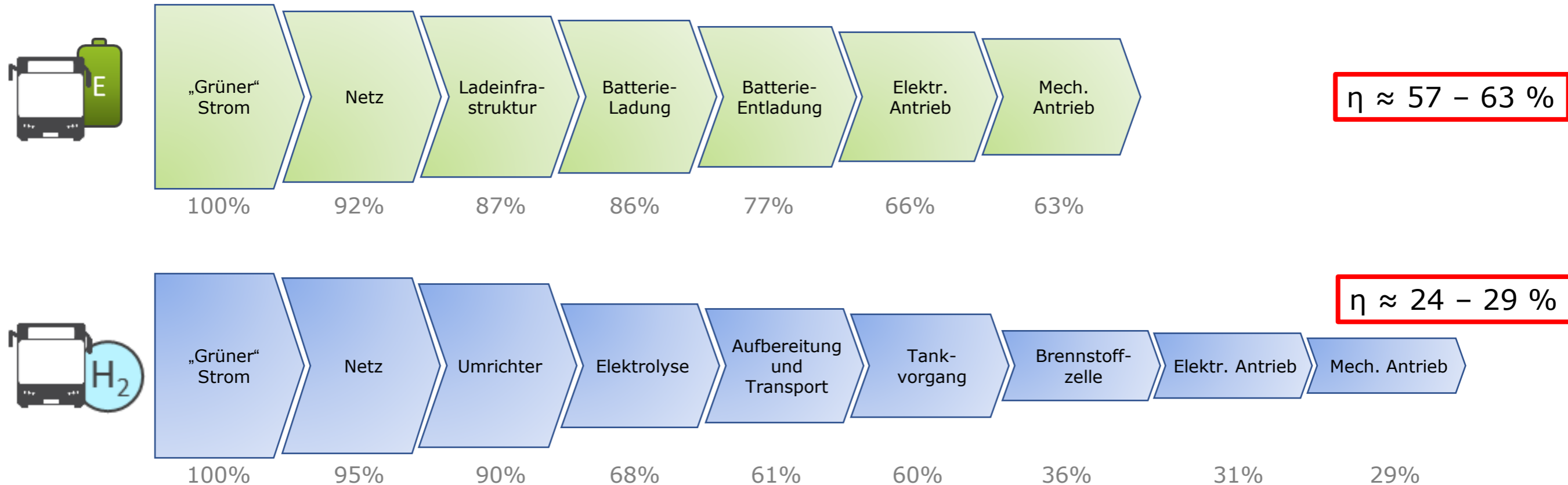
Wuppertal / RVK

38,5 kg



ca. 35 kg nutzbar bei 12m Bus
ca. 40 kg nutzbar bei 18m Bus

Von der Quelle bis zum Rad – Wirkungsgradvergleich



➔ Wasserstoff-Erzeugung macht (nur) Sinn, wenn keine Direktnutzung des Stroms möglich ist, z.B. Überschuss aus erneuerbaren Quellen

Quelle: VDI-/VDE-Studie „Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge: Bedeutung für die Elektromobilität“, 2019

The background of the slide is a photograph of a complex electronic assembly. It shows several green printed circuit boards (PCBs) mounted on a metal chassis. The boards are densely packed with various electronic components, including integrated circuits, capacitors, and connectors. Numerous black and colored wires are connected to the boards, creating a dense network of connections. The overall appearance is that of a high-performance, industrial-grade electronic system.

Technische Grundlagen

E-Bus Ladeinfrastruktur

Ladeschnittstellen

Steckkontakt

- i** Standardisiert als CCS Steckkontakt
- i** Ausführung z.B. als Ladesäule oder Zuführung von oben („Kabeltrommel“)

Pantographenkontakt

- i** Standardisierte Kommunikationsschnittstelle
- i** Ausführung ausfahrbar (vom FZG Dach) oder absenkbar (von Ladestation)



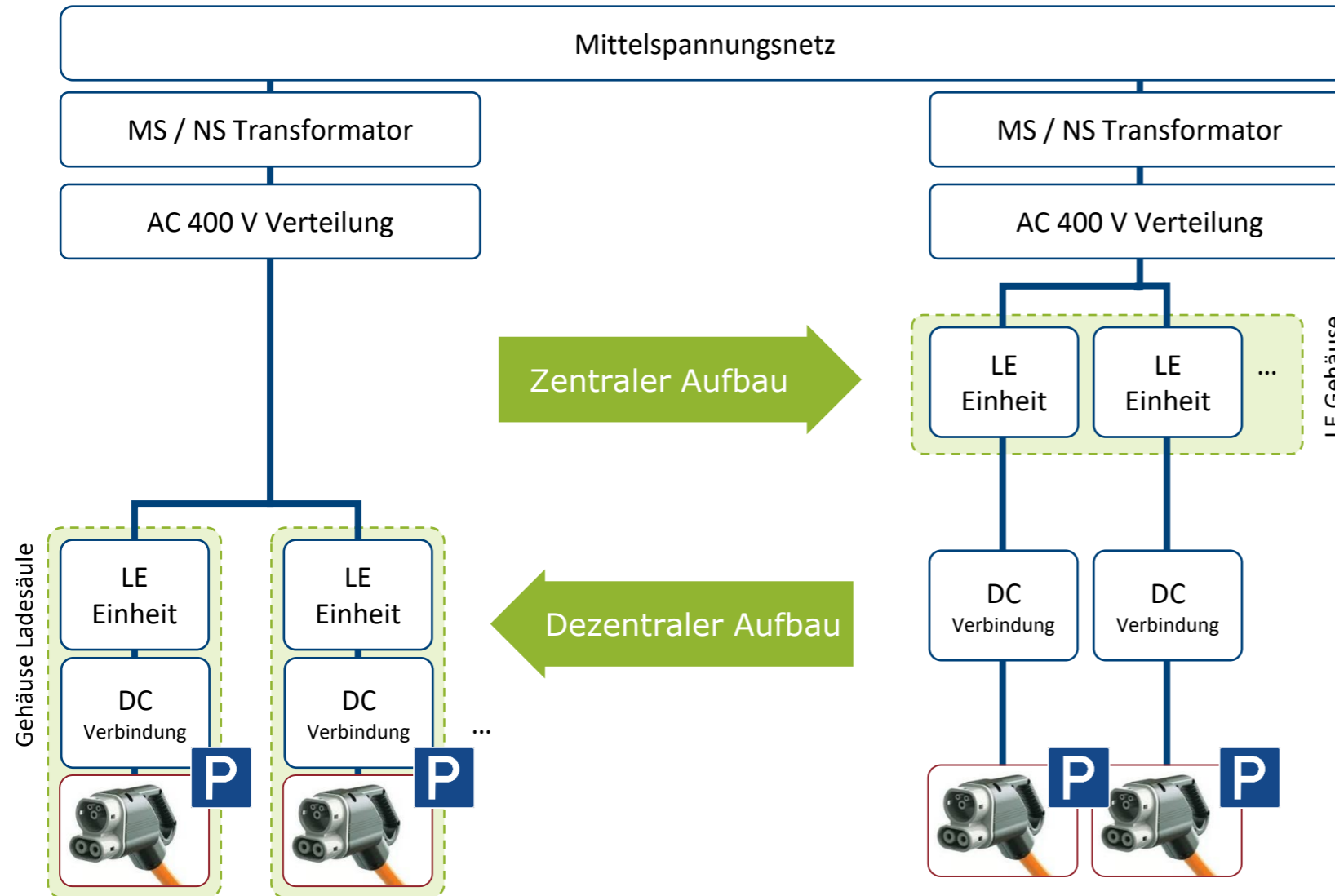
Bild: Schunk



Hinweis

Alle E-Busse werden mit DC Ladesystemen geladen!

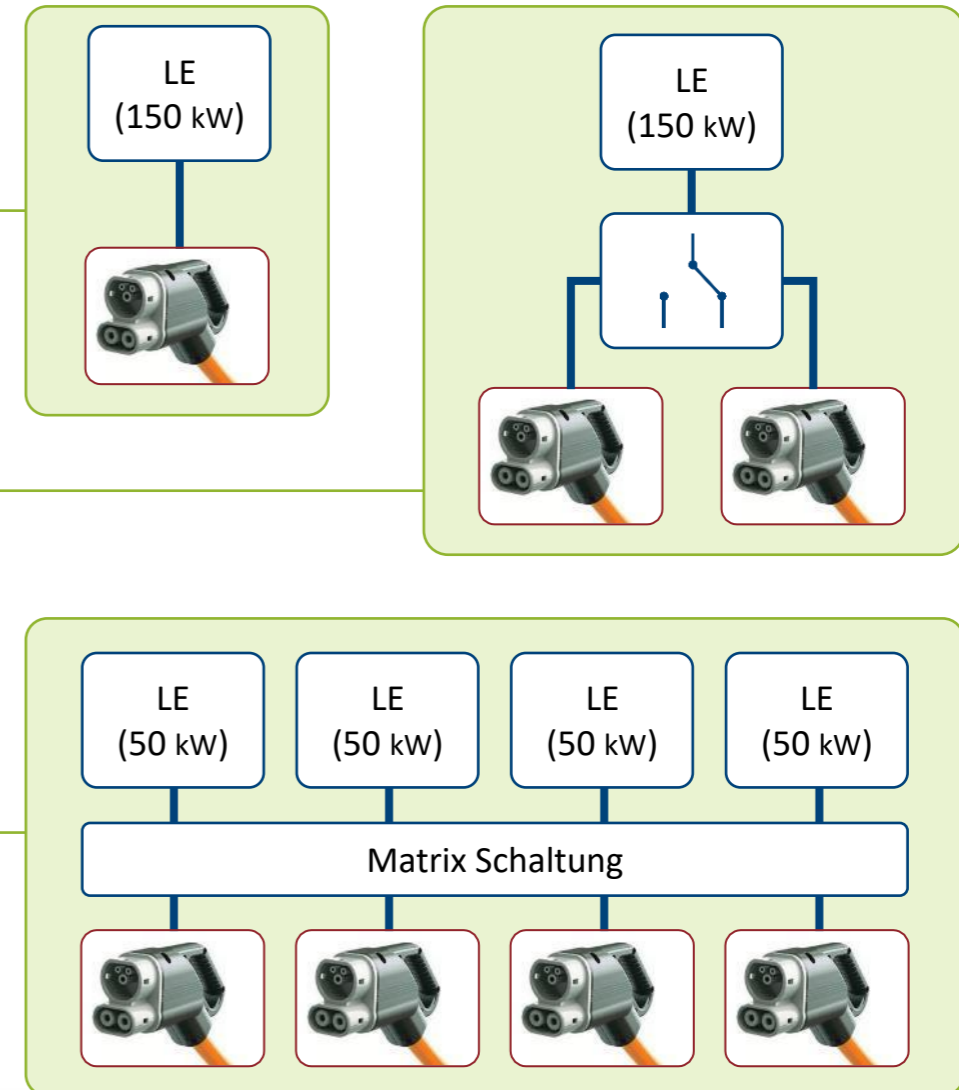
Aufbauprinzip



Oder mobil

Technische Ausführung Ladelektronik

- Standardansatz (Stand Alone):
Eine Ladestation hat eine eigene Leitungselektronik (LE) Einheit
- Umschaltbarer Ansatz:
Eine LE Einheit kann mehrere Ladepunkte bedienen
- Vernetzter Ansatz (Matrix):
Mehrere (kleine) LE Einheiten können gleichzeitig auf mehrere Ladepunkte geschaltet werden



Netzanschluss

Niederspannung (400 V)

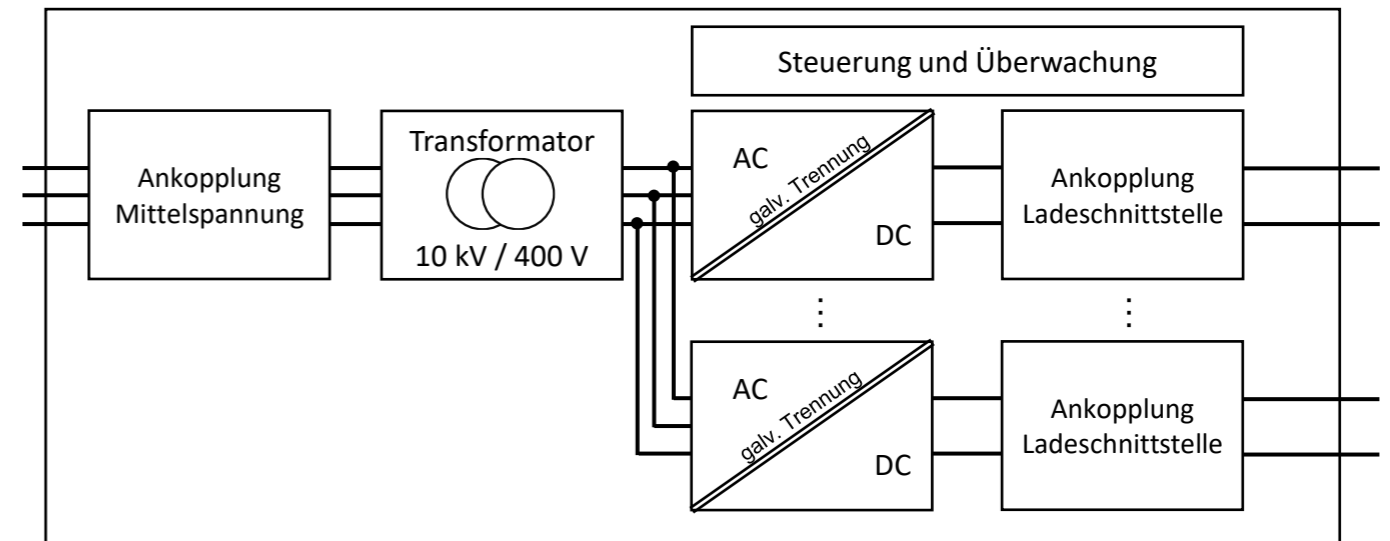
- Nur für einzelne oder mobile Systeme

Mittelspannung (10 kV)

- Anbindung über Trafostation
- Ab ca. 3 Ladestationen erforderlich

Hochspannung (110 kV)

- Anbindung über Trafostation
- Notwendig, wenn MS Netz ausgelastet
- Faustwert: Mehrere MW gleichzeitig (ab 70-100 Ladestationen)

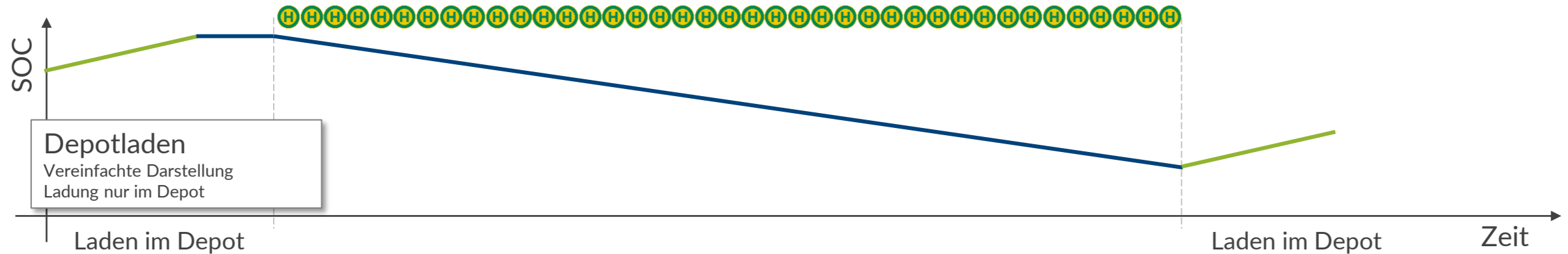


The background of the slide is a photograph of several green printed circuit boards (PCBs) mounted on a metal chassis. The boards are densely packed with electronic components, including integrated circuits, capacitors, and connectors. Numerous black and colored wires are connected to the boards, creating a complex network of connections. The overall appearance is that of a high-density electronic assembly, likely part of an electric vehicle's powertrain or control system.

Technische Grundlagen

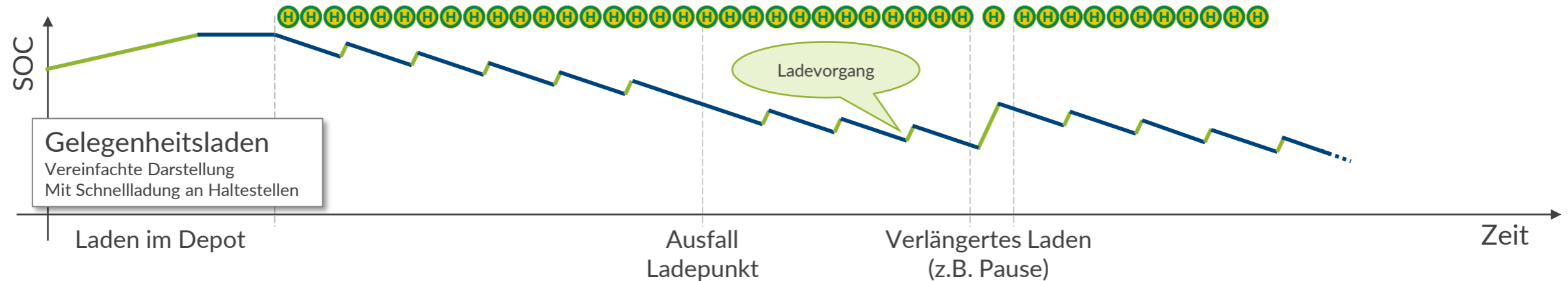
**E-Bus Betriebs-
und Ladestrategien**

Betrieb mit Depotladestrategie



- i** Ladevorgänge erfolgen nur im Depot
- i** Ladeleistung tendenziell gering (typ.: 75 – 150 kW), Lange Ladedauer (typ.: 3 - 8 h)
Üblicherweise Einsatz von „Energiebatterien“

Betrieb mit Gelegenheitsladestrategie



- i Ladevorgänge erfolgen an Haltestellen im Liniennetz (z.B. Wendestellen, zentrale Haltestellen mit hohem Fahrtakt)
- i Ladeleistung tendenziell hoch (bis zu 500 kW und mehr), kurze Ladedauer (typ.: wenige Minuten)
Üblicherweise Einsatz von „Leistungsbatterien“
- i Das System muss so ausgelegt sein, dass der Ausfall einer Ladestation (kurzzeitig) kompensiert werden kann

Systemintelligenz

Keine Systemintelligenz

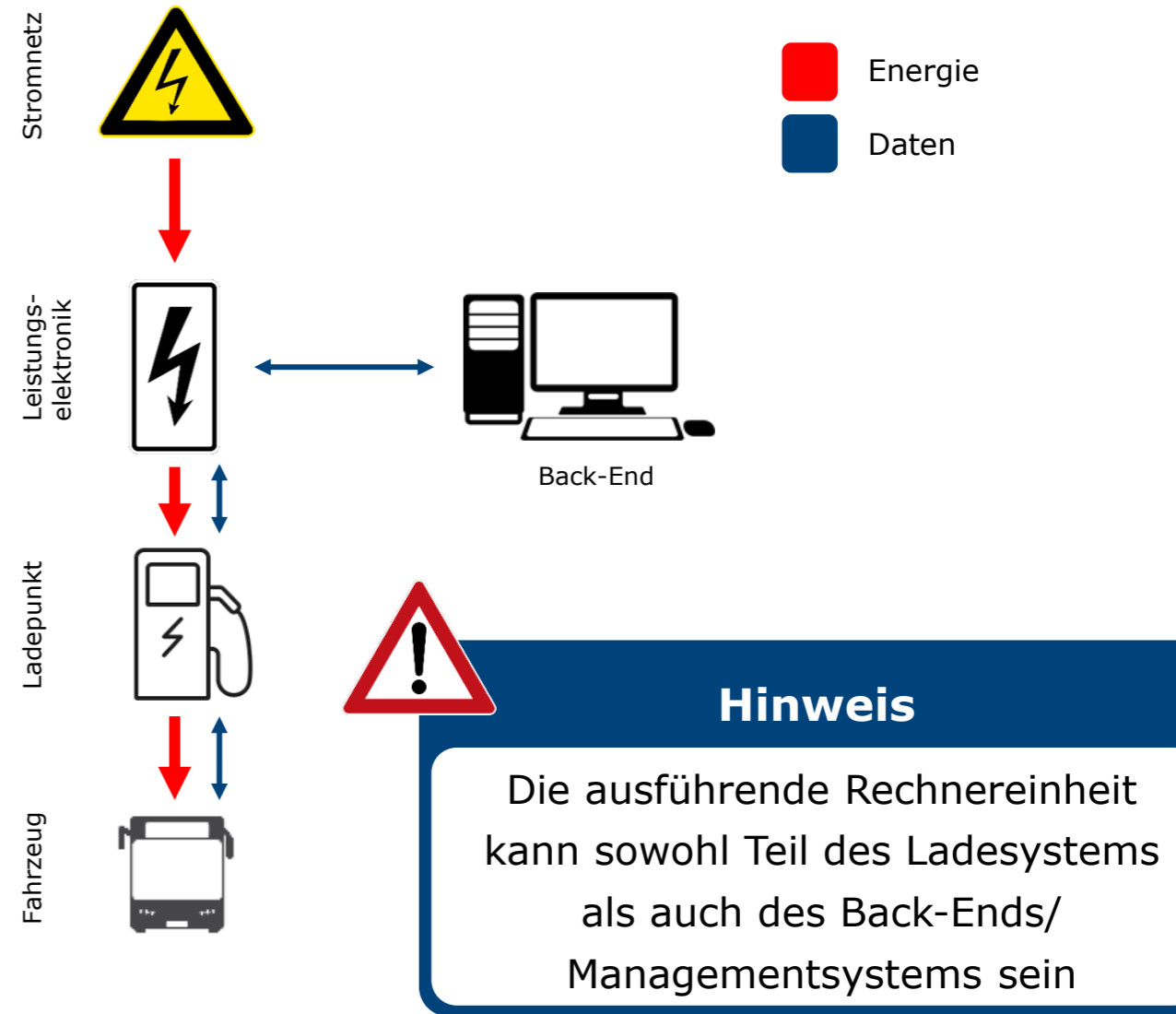
- i Standardausführung Ladesäule als reiner Aktor

Passive Intelligenz

- i Intelligenz ist „statisch“ und extern vorgegeben (z.B. feste Zeitpläne oder Grenzwerte). Ladesystem wird nach festen Vorgaben gesteuert (Freigabe, Sperrung oder Leistungsbegrenzung von Ladepunkten)

Aktive Intelligenz

- i Vollautomatische Algorithmen steuern den Ladeablauf in Teilen autark. Externe Kenngrößen (z.B. Wetter, Energiepreis) werden dynamisch ausgewertet.



A green rounded rectangular box with a white border containing the text 'Marktübersicht'. The background of the slide is a photograph of a trade show booth for a vehicle named 'VECTOR'. The booth has a white wall with the word 'VECTOR' in black letters and a red arrow pointing to the right. A black car is on display in the foreground, and other vehicles and people are visible in the background.

Marktübersicht

Die wichtigsten E-Bus Anbieter



Die wichtigsten H₂ Bus Anbieter



Ab 2021/2022

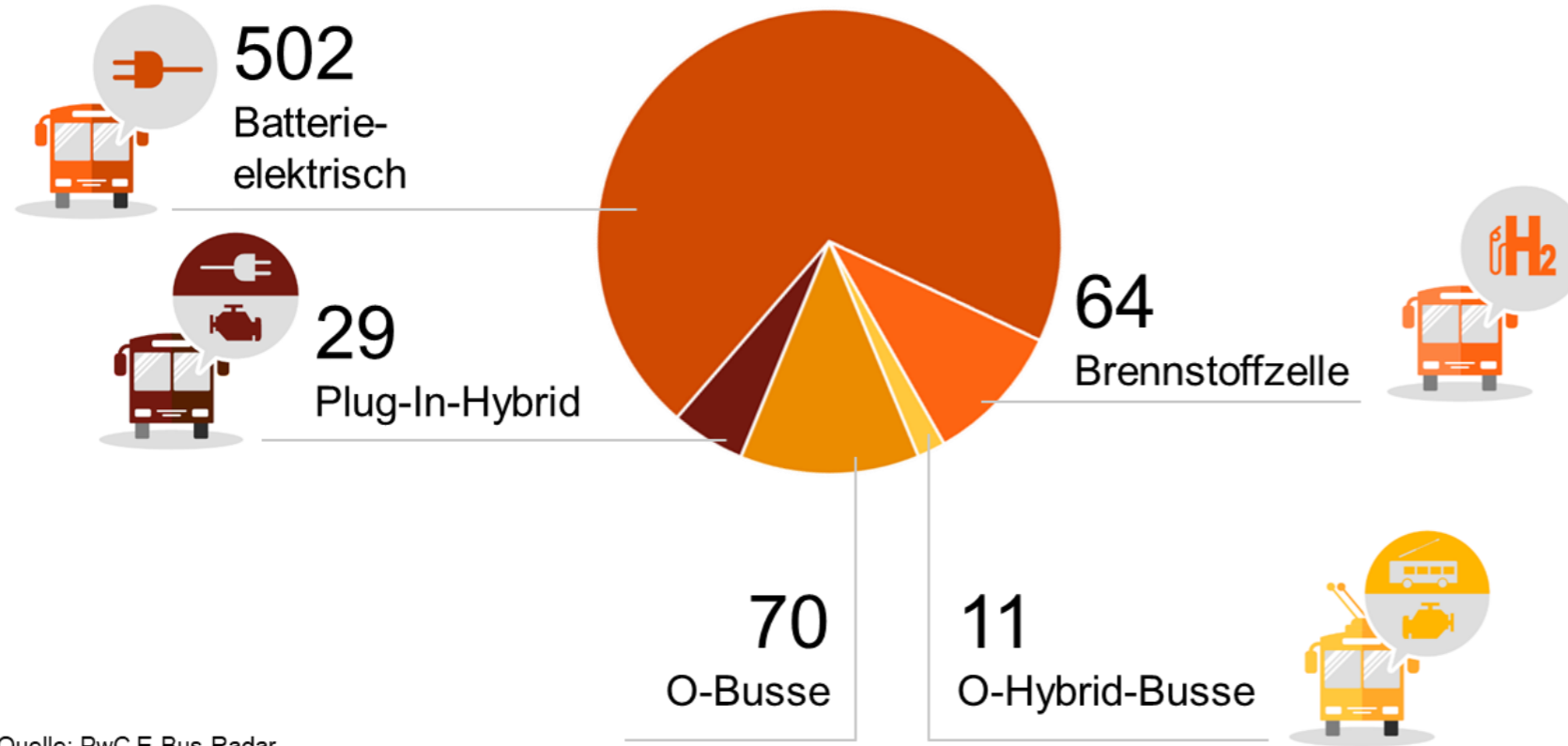
Ab 2022

REX Anhänger



Marktübersicht emissionsfreie Busse

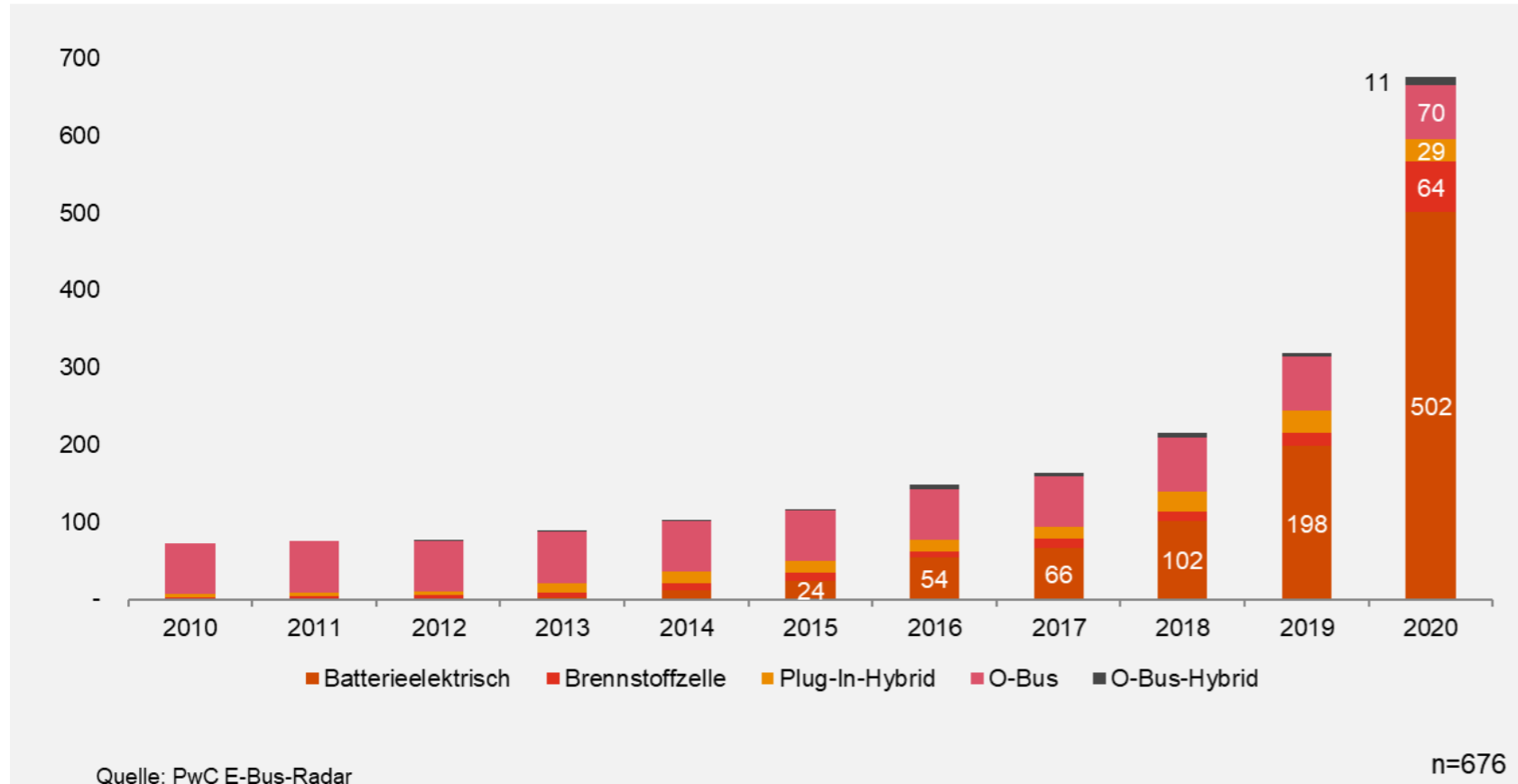
Aktueller Elektrifizierungsstand in Deutschland (Anzahl Busse mit elektrifizierten Antrieben)



- 1) Derzeit sind über 670 E-Busse im Einsatz
- 2) Davon über 500 Batteriebusse
- 3) Deutlicher Anstieg in den letzten zwei Jahren

Quelle: PwC E-Bus-Radar

Markthochlauf für emissionsfreie Busse



- 1) Starker Zuwachs in 2020 aufgrund batterieelektrischer und H₂ Busse
- 2) Plug-In Hybrid Busse haben nur eine Nischenposition
- 3) Konstante O-Bus Anteile aus den drei deutschen „Trolleybus-Städten“ (Solingen, Esslingen, Eberswalde)

Inhalt

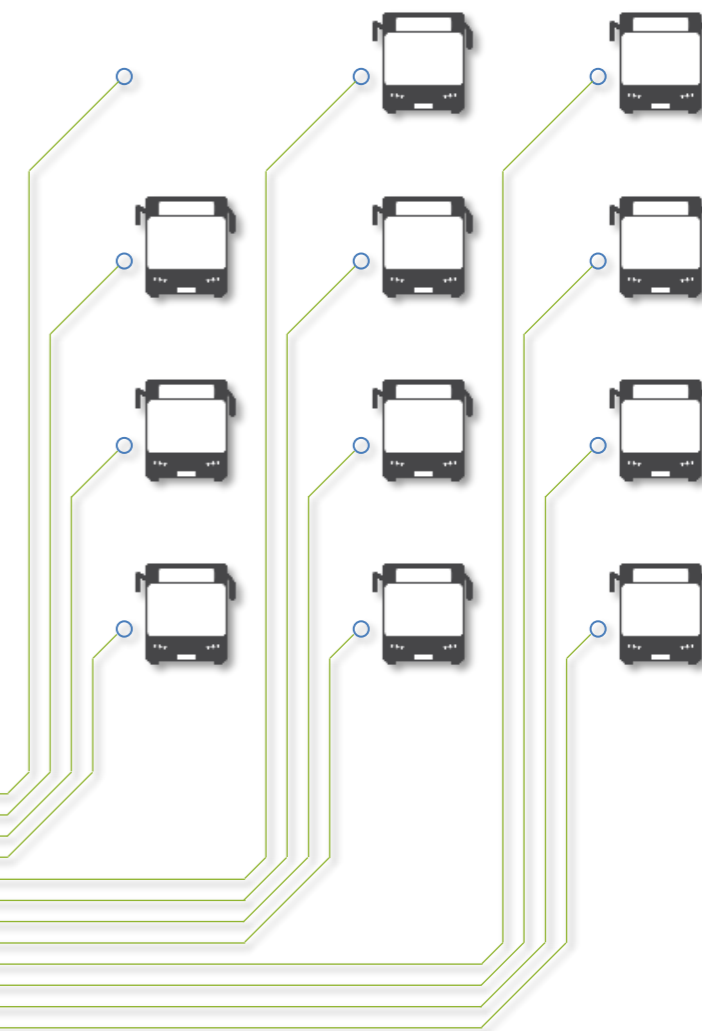
AP 2: Rahmenbedingungen und Grundlagen

AP 3: Bewertung saubere Antriebe

AP 4: Bewertung emissionsfreie Antriebe

AP 5: Kostenübersicht Vorzugstechnologie

AP 6: Handlungsempfehlung



Saubere Fahrzeuge nach CVD



Fahrzeuge betrieben mit ALTERNATIVEN KRAFTSTOFFEN.

Also Kraftstoffe oder Energiequellen, die zumindest teilweise als Ersatz für Erdöl als Energieträger für den Verkehrssektor dienen und die zur Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen.

Plug-In Hybridbus



Hybridbus (Diesel/Erdgas)
mit vergrößerter Traktionsbatterie
für erhöhte zero emission Reichweite

Nachladung über Pantograph oder Stecker,
selten über laufenden Motor.
Externe Nachladung erforderlich für Aner-
kennung als „sauberes Fahrzeug“ gemäß CVD

BRT-Konzepte mit 24m Bussen möglich



Bilder: Emile Weber (groß) / Volvo (klein)

Bewertung Plug-In-Hybridbus

Verfügbare Fahrzeugklassen

 Gelenkbus	 Standardbus	 Midibus	 Kleinbus	 Auton. Shuttle
----------------------	------------------------	--------------------	---------------------	---------------------------

Entwicklungsstand

Etablierte Technik

Größe Energiespeicher

Typisch 20 – 90 kWh

Reichweite / Nutzungsdauer

modellabhängig, 7–40 km (elektrisch)
Batterie unterliegt Verschleiß

Emissionen

Euro 6 / im E-Betrieb keine

Lade- / Tankzeit

Tanken: typ. 5-10 Minuten
Laden (im Depot): typ. 60-120 Minuten

Kosten Fahrzeug

Solobus: > 450.000 €
Gelenkbus: > 550.000 €

Besonderheiten

Fahrzeug muss extern (elektrisch) nachgeladen werden, um als sauberes Fahrzeug zu gelten.
Mögliche Übergangslösung / Alternative zum E-Bus mit opportunity charging (Anfahrt zur Linie per Diesel)
Ladedauer kann durch Schnellladetechnik wesentlich reduziert werden

Biokraftstoffe



„sauberes Fahrzeug“ gemäß CVD nur,
wenn keine Beimischung von fossilen Kraftstoffen
und
wenn kein hohes Risiko indirekter
Landnutzungsänderungen zu beobachten ist

- 1. Gen.: Basis Stärke, Zucker, Pflanzenöle
- 2. Gen.: Basis Cellulose, Lignin, Pektin
- 3. Gen.: Basis aquatische Biomasse (Algen)

Bild: U.S. Department of Energy: Energy Efficiency and Renewable Energy

Bewertung Biokraftstoffe

Verfügbare Fahrzeugklassen

 Gelenkbus		 Standardbus		 Midibus		 Kleinbus		 Auton. Shuttle	
----------------------	--	------------------------	--	--------------------	--	---------------------	--	---------------------------	--

Entwicklungsstand

Generation 1: Etablierte Technik
Generation 2: Kleinmengen verfügbar
Generation 3: Forschung

Größe Energiespeicher

Analog Dieselfahrzeug

Reichweite / Nutzungsdauer

Typ: 10-20 % < Dieselfahrzeug

Emissionen

Geringer als fossile Kraftstoffe,
aber nicht klimaneutral

Lade- / Tankzeit

Analog Dieselfahrzeug

Kosten Fahrzeug

Analog Dieselfahrzeug

Besonderheiten

Nach CVD nur sauber ohne Beimischung fossiler Kraftstoffe (B100) wenn kein hohes Risiko indirekter Landnutzungsänderungen zu beobachten ist.



Fritz Wahr, Energie

Synthetische Herstellung von Kraftstoffen

- (1) „Fischer-Tropsch-Kraftstoffe“ aus Kohle, Erdgas oder Biomasse
- (2) mittels Strom aus Wasser und Kohlendioxid

- (1) sauberer als Dieselmotorkraftstoff (Anwendung SSB)
- (2) Klimaneutral (Forschung)

Bewertung Synthetische Kraftstoffe

Verfügbare Fahrzeugklassen



Gelenkbus



Standardbus



Midibus



Kleinbus



Auton. Shuttle



Entwicklungsstand

Etablierte Fahrzeugtechnik
Kraftstoff: tlw. Forschung & Entwicklung

Größe Energiespeicher

Analog Dieselfahrzeug

Reichweite / Nutzungsdauer

Typ: 10-20 % < Dieselfahrzeug

Emissionen

Je nach Herstellung kein CO2 Ausstoß.
Lokale NOX Emissionen

Lade- / Tankzeit

Analog Dieselfahrzeug

Kosten Fahrzeug

Analog Dieselfahrzeug

Besonderheiten

Fahrzeuge sind verfügbar (Standardbusse), synthetische Kraftstoffe nur eingeschränkt.
Leistung und Verbrauch sind gegenüber Dieselfahrzeug reduziert.
Hoher Energiebedarf bei Kraftstoffherstellung (mit Einfluss auf Gesamtwirkungsgrad)

Bus mit Gasantrieb



Erdgas oder **Biogas** als Kraftstoff

Technisch vergleichbar zu Dieselbus

Sauberer als Dieselfahrzeug

Bild: Mercedes-Benz / EvoBus

Bewertung Erdgas-/Biogasantrieb

Verfügbare Fahrzeugklassen



Gelenkbus



Standardbus



Midibus



Kleinbus



Auton. Shuttle



Entwicklungsstand

Etablierte Technik

Größe Energiespeicher

Analog Dieselfahrzeug

Reichweite / Nutzungsdauer

Reichweite ca. -20% ggü. Dieselfahrzeug

Emissionen

Geringer als Dieselfahrzeug

Lade- / Tankzeit

ca. 10 Minuten

Kosten Fahrzeug

Analog Dieselfahrzeug

Besonderheiten

Nur geringfügige Mehrkosten im Betrieb gegenüber Dieselfahrzeugen

Fazit saubere Antriebe

- Gasantrieb und Plug-In Hybridvarianten sind etablierte Technik
- Bio- und synthetische Kraftstoffe sind nur eingeschränkt (nach CVD Vorgaben) verfügbar
- Technisch liegen für den Anwendungsfall keine Einschränkungen vor
 - Für Plug-In Hybride ist ebenfalls Ladeinfrastruktur erforderlich (ggf. klein dimensioniert)
- Die positiven Umweltauswirkungen sind begrenzt
- ➔ Keine Dekarbonisierung, „nur“ CO₂ Minderung
- ➔ Mögliche Zwischenlösung
- ➔ Geringe Mehrkosten, dafür nur reduzierte oder keine Förderung

Inhalt

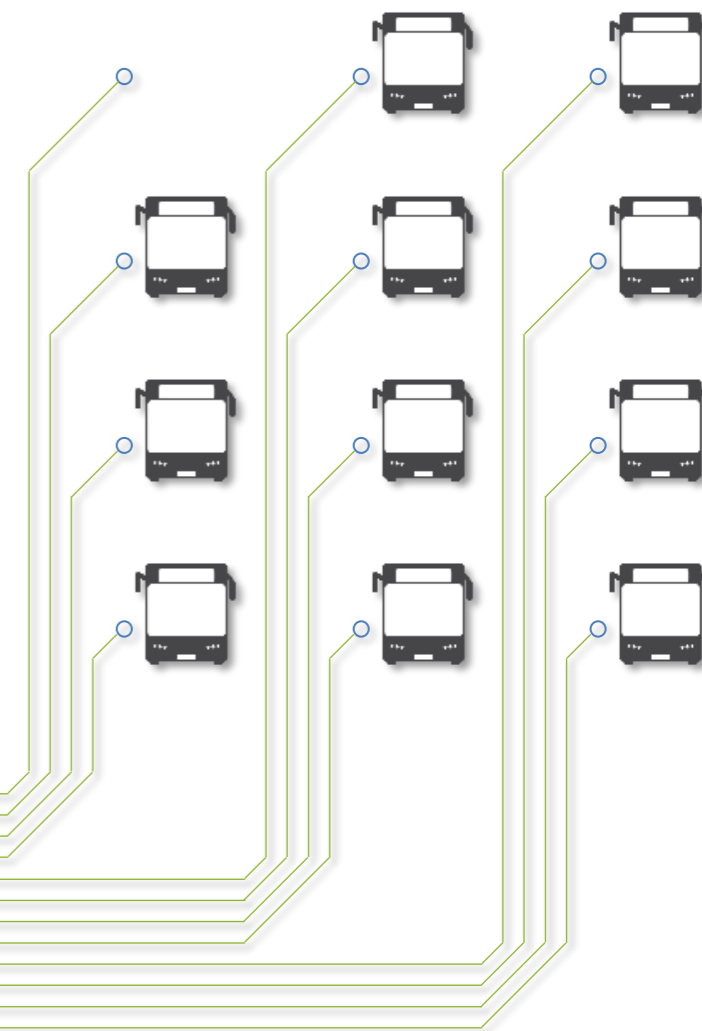
AP 2: Rahmenbedingungen und Grundlagen

AP 3: Bewertung saubere Antriebe


AP 4: Bewertung emissionsfreie Antriebe

AP 5: Kostenübersicht Vorzugstechnologie

AP 6: Handlungsempfehlung



Emissionsfreie Fahrzeuge nach CVD



Nach CVD „saubere“ Fahrzeuge mit oder ohne Verbrennungsmotor, die außerdem CO₂ Emissionen < 1 g CO₂/kWh und < 1 g CO₂/km aufweisen.

Grundlagenbetrachtung (Vorauswahl)

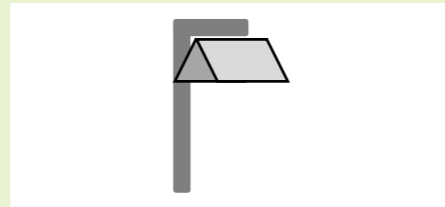


Vorauswahl Untersuchungsalternativen

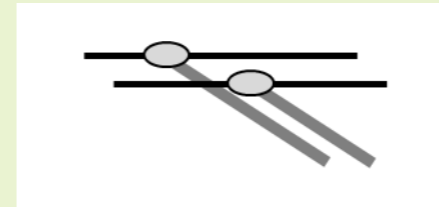
Emissionsfreie Technologien (marktverfügbar)



E-Bus Depotlader



E-Bus Gelegenheitslader



Oberleitungsbus



Brennstoffzellenbus



Varianten werden nicht untersucht

- Varianten nicht gut geeignet für Regionalverkehr
- Umfassende Installation von Ladetechnik erforderlich
- Kein konzentriertes Nutzungsgebiet (wie Innenstadt)
- Nur unter stark erhöhten Kosten möglich

Varianten werden untersucht

Umlaufanalyse



Erläuterung Bewertungsdarstellung

Freitag

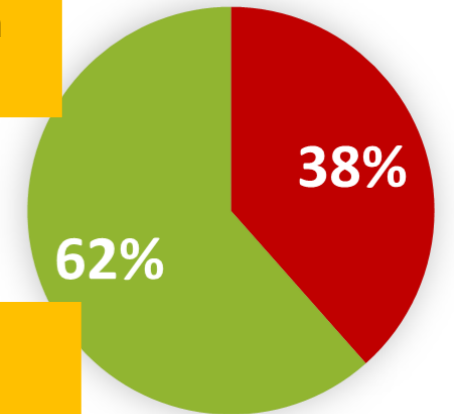
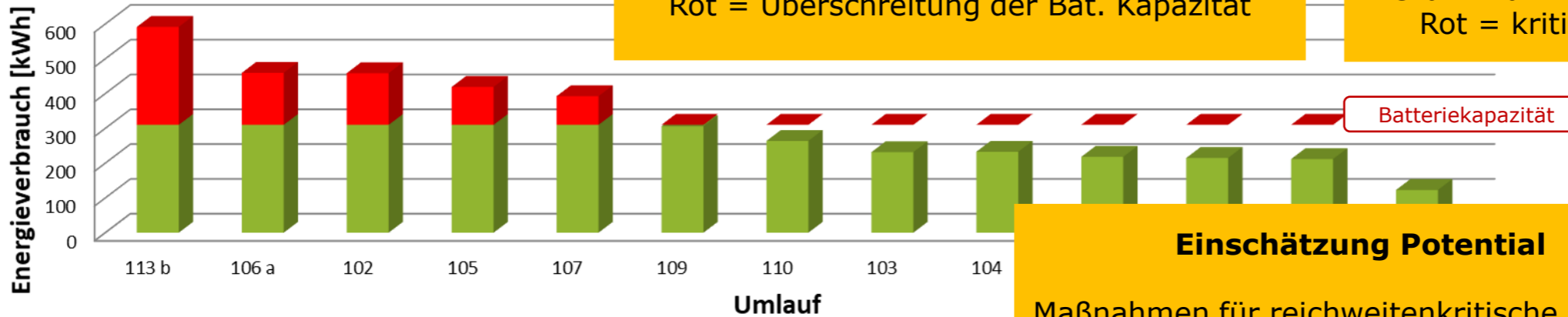
Energieverbrauch

Graphische Machbarkeitsdarstellung

Rot = Überschreitung der Bat. Kapazität

Umlaufanteile

Grün = unkritisch
Rot = kritisch



Einschätzung Potential

Maßnahmen für reichweitenkritische Umläufe



Erforderl. Zeit
Zwischenladen

Zeitwerte Zwischenladen

Müssen pro Umlauf mit Ladeinfrastruktur gewährleistet werden, um Energiedefizit zu kompensieren

Umlauf Brechen



Zwischen Laden



Sukzessive Umstellung



Einschätzung positiv

Es sind diverse Umläufe vorhanden, die direkt elektrisch betrieben werden können. Mittelfristig (Bis 2025) können bis auf drei Umläufe alle ohne weitere Maßnahmen durchgeführt werden.

Die verbleibenden kritischen Umläufe können durch Aufbrechen der Umläufe optimiert werden. Durch die Optimierung einzelner Umläufe ggf. weiter verbessert werden.

Ein Fahrzeugmehrbedarf ist unwahrscheinlich.

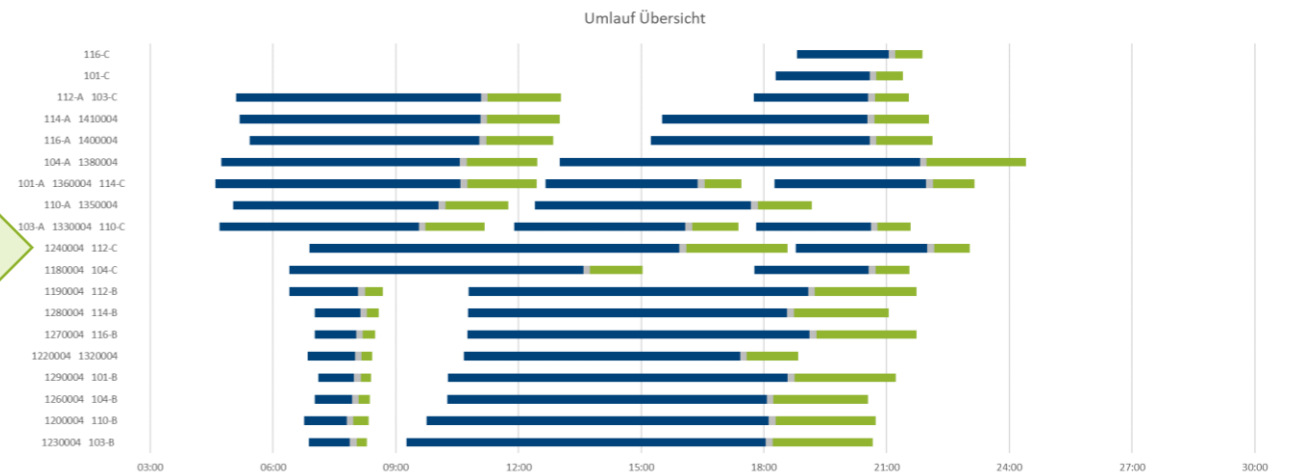
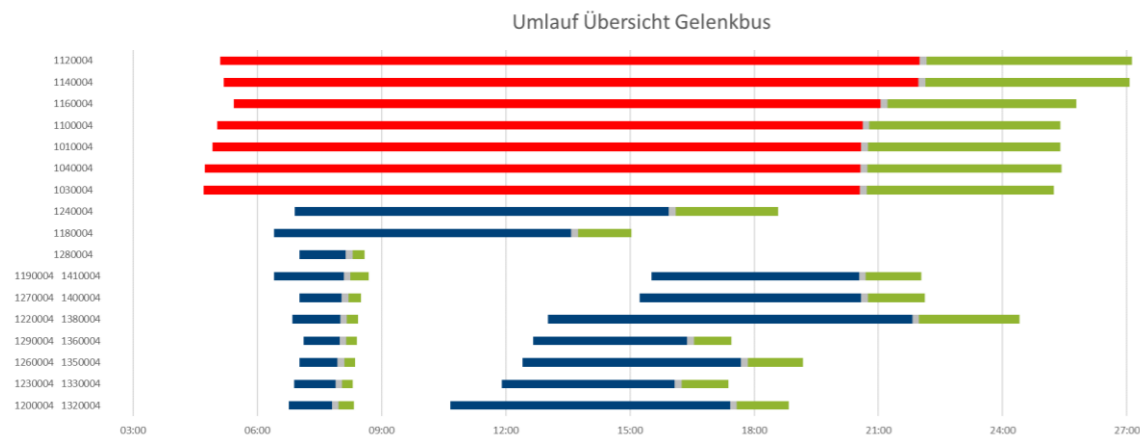
Abschließende Einschätzung

Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW
113 b	57 min	41 min
106 a	28 min	20 min
102	27 min	19 min
105	19 min	13 min
107	13 min	9 min

Maßnahmen für reichweitenkritische Umläufe

Umlaufoptimierung (Aufbrechen von Umläufen)

- Kritische Umläufe werden von einem Fahrzeug aus dem Depot abgelöst
- Das abgelöste Fahrzeug steht nach der Ladedauer (≈ 2 bis $2,5$ h) wieder zur Verfügung (Springerbetrieb möglich)
- Erfahrungsgemäß sehr gute Ergebnisse



Maßnahmen für reichweitenkritische Umläufe

Zwischenladen

- Schnellladestationen im Liniennetz (typ: 250 bis 450 kW)
- Erforderlich: Pantograph, Ladeinfrastruktur und Aufenthaltszeit
- Bevorzugt: Nutzung durch viele Fahrzeuge (geringe Kosten pro Fahrzeug)
 - Zentrale Positionierung (z.B. Innenstadt)
- Im Regionalnetz primär als Notlösung (Mehrfachnutzung sehr eingeschränkt im weitläufigen Liniennetz)



Bild: Stadtwerke Münster

Maßnahmen für reichweitenkritische Umläufe

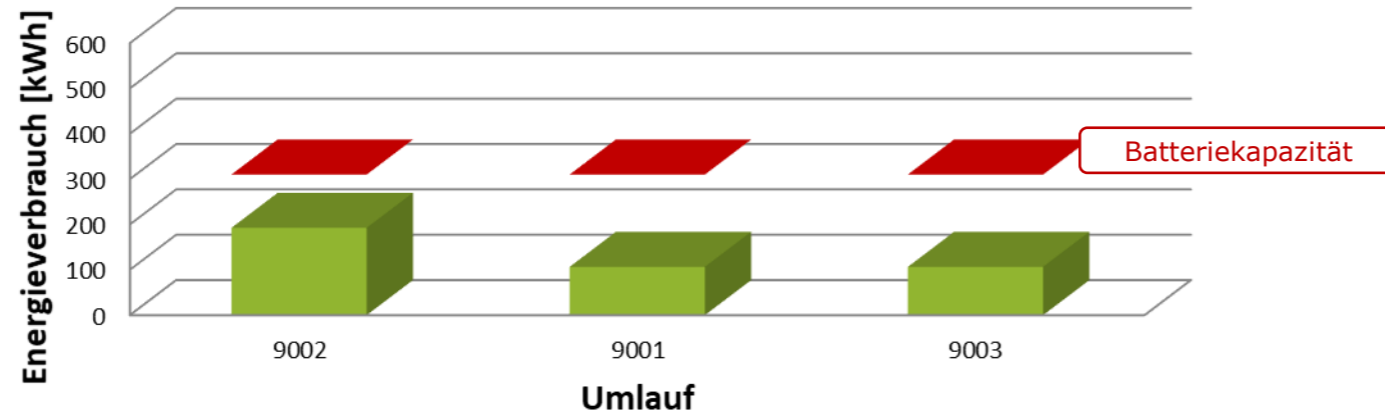
Sukzessive Technologie-Einführung

- Mittel- bis langfristig wird eine Steigerung der Kapazität angenommen
 - Konservative Schätzung +30 % in 5 bis 7 Jahren
 - ➔ Standardbus ca. 400 kWh statt 310 kWh nutzbarer Energieinhalt
- Kurzfristig werden kritische Umläufe vermieden

BEV E-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag

Energieverbrauch Umläufe Solobus Worst Case BEV



Erforderl. Zeit Zwischenladen

Umlauf Brechen

N.A.

Zwischen Laden

N.A.

Sukzessive Umstellung

N.A.

Technische Einschätzung sehr positiv

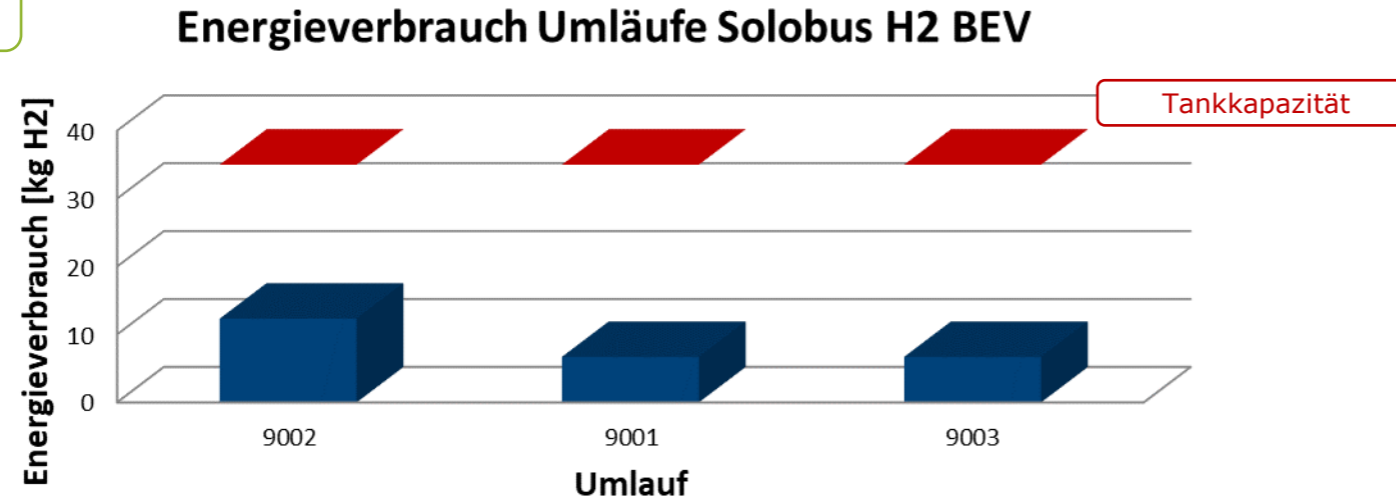
Alle Umläufe sind direkt mit E-Bussen machbar.

Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW

BEV H2-Bus Verbrauchsübersicht



Donnerstag



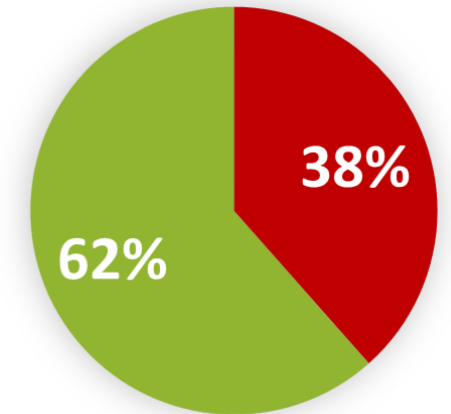
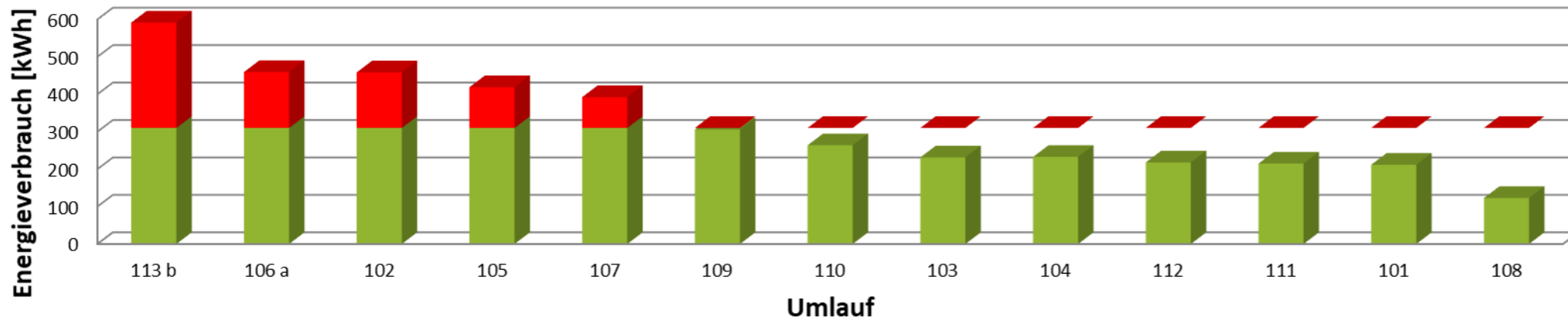
Technische Einschätzung sehr positiv

Alle Umläufe sind direkt mit H₂-Bussen machbar.

Ehrlich E-Bus Verbrauchsübersicht

Freitag

Energieverbrauch Umläufe Solobus Worst Case Ehrlich



Erforderl. Zeit Zwischenladen

Umlauf Brechen



Zwischen Laden



Sukzessive Umstellung



Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW
113 b	68 min	48 min
106 a	36 min	26 min
102	36 min	25 min
105	26 min	19 min
107	20 min	14 min

Technische Einschätzung tendenziell positiv

Es sind diverse Umläufe vorhanden, die direkt elektrisch betrieben werden können. Mittelfristig (Batteriekapazität ca. 400 kWh) ein weiterer Umlauf ohne weitere Maßnahmen elektrifiziert werden.

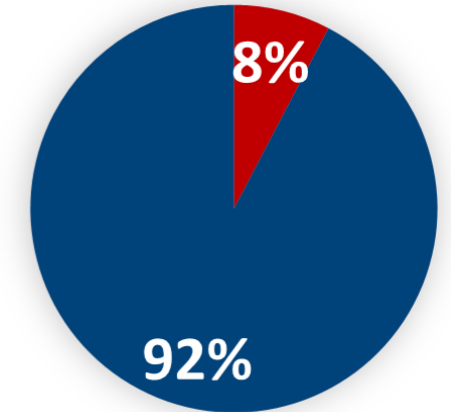
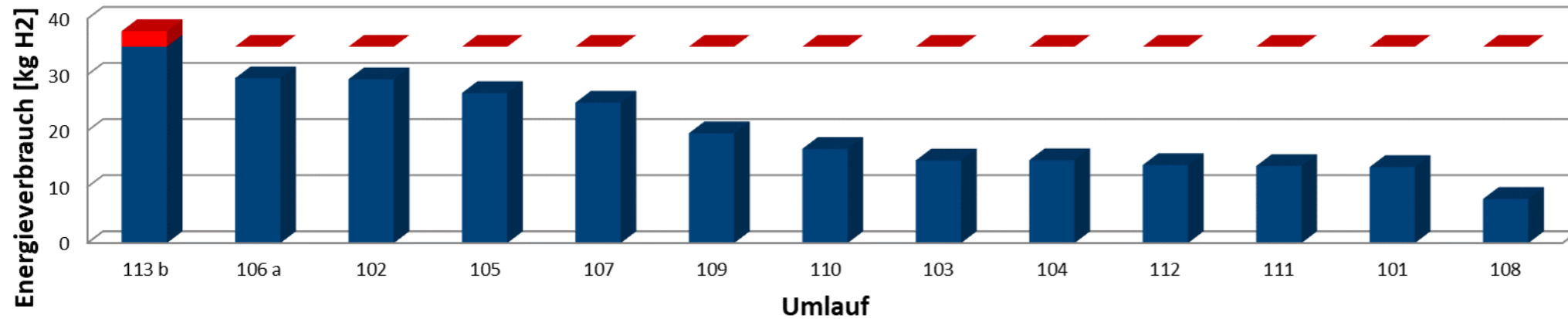
Die verbleibenden kritischen Umläufe sollten durch Aufbrechen der Umläufe optimiert werden. Durch Zwischenladen können einzelne Umläufe ggf. weiter verbessert werden.

Ein Fahrzeugmehrbedarf ist unwahrscheinlich.

Ehrlich H₂-Bus Verbrauchsübersicht

Freitag

Energieverbrauch Umläufe Solobus H2 Ehrlich



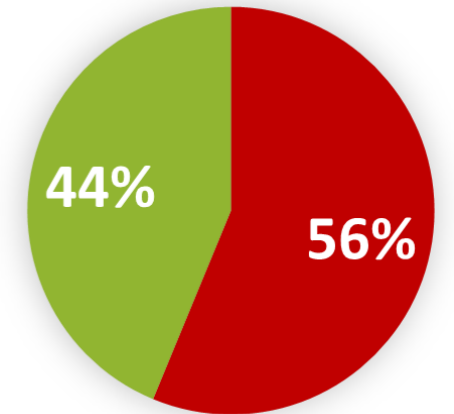
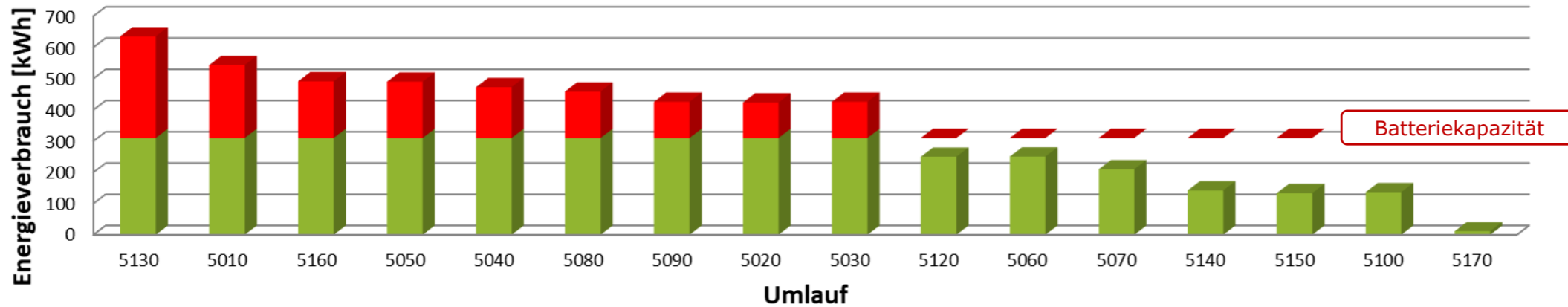
Technische Einschätzung sehr positiv

Nahezu alle Umläufe können mit H₂-Bussen direkt bedient werden.
Umlauf 113 b muss angepasst werden.

Eisenhauer E-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag

Energieverbrauch Umläufe Solobus Worst Case Eisenhauer



Erforderl. Zeit
Zwischenladen

Umlauf
Brechen



Zwischen
Laden



Sukzessive
Umstellung



Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW	Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW
5130	78 min	56 min	5020	27 min	19 min
5010	56 min	40 min	5030	28 min	20 min
5160	43 min	31 min			
5050	43 min	31 min			
5040	39 min	28 min			
5080	36 min	25 min			
5090	28 min	20 min			

Technische Einschätzung tendenziell negativ

Es sind wenige Umläufe vorhanden, die direkt elektrisch betrieben werden können. Mittelfristig (Batteriekapazität ca. 400 kWh) können nicht mehr Umläufe elektrifiziert werden.

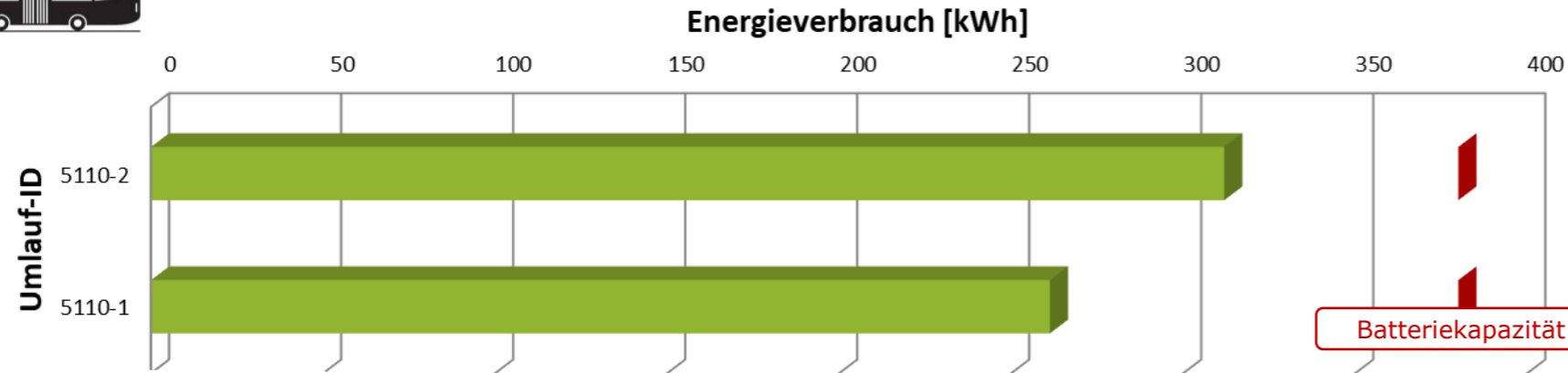
Die kritischen Umläufe sollten durch Aufbrechen der Umläufe optimiert werden. Zwischenladen ist keine praktikable Option (lange Dauer).

Ein Fahrzeugmehrbedarf ist wahrscheinlich, sofern die Umlauflängen durch eine Umlaufoptimierung nicht wesentlich verbessert werden können.

Eisenhauer E-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag

Energieverbrauch Umläufe Gelenkbus Worst Case Eisenhauer



Erforderl. Zeit Zwischenladen

Umlauf Brechen

N.A.

Zwischen Laden

N.A.

Sukzessive Umstellung

N.A.

Technische Einschätzung sehr positiv

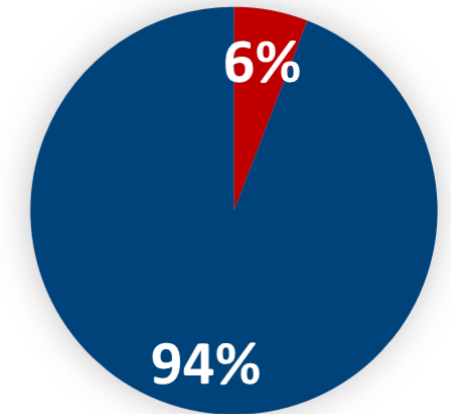
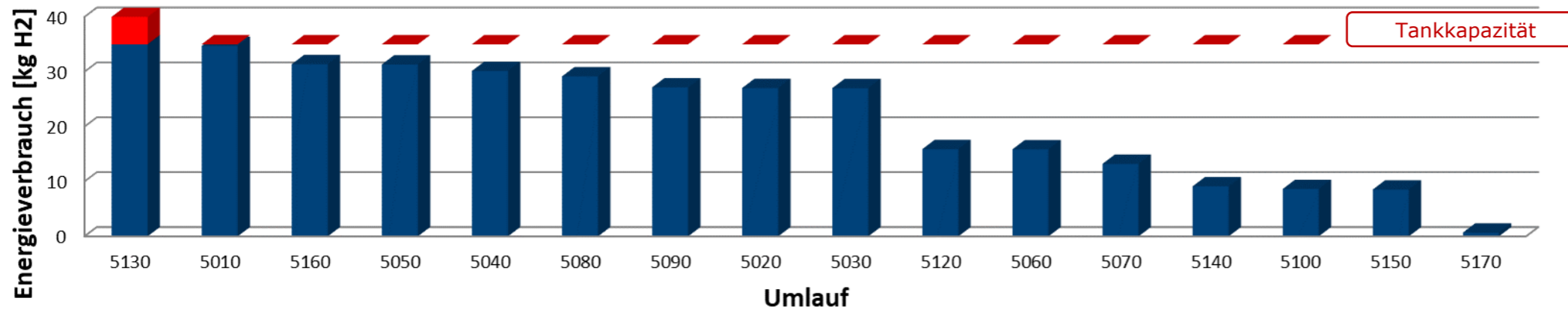
Alle Gelenkbus-Umläufe sind direkt mit E-Bussen machbar.

Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW

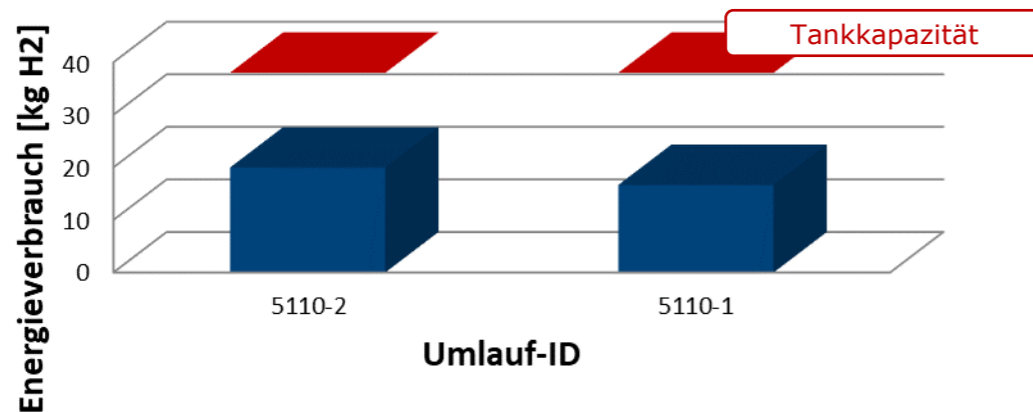
Eisenhauer H₂-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag

Energieverbrauch Umläufe Solobus H2 Eisenhauer



Energieverbrauch Umläufe Gelenkbus H2 Eisenhauer

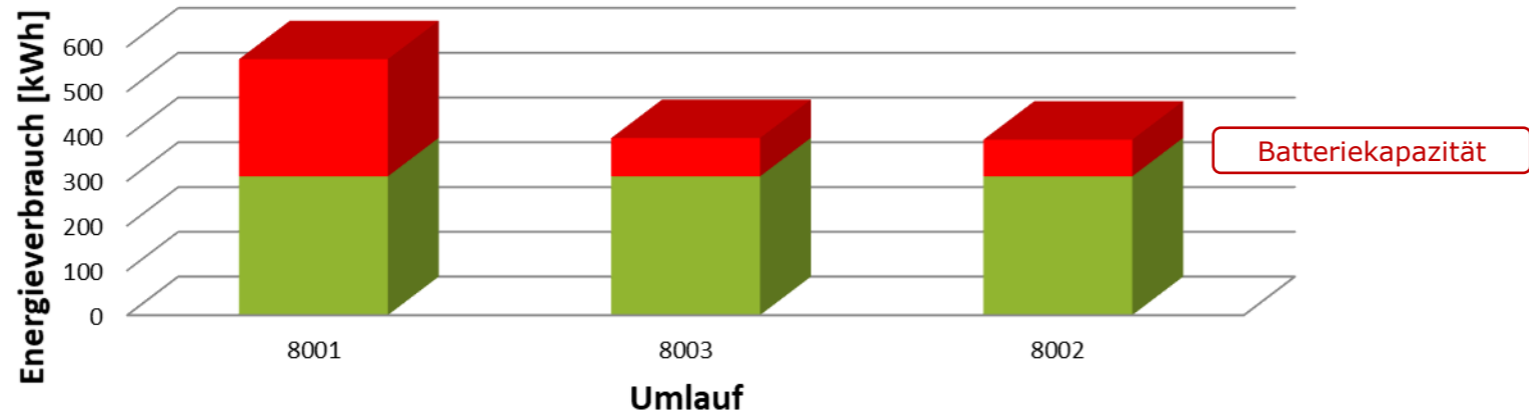


Technische Einschätzung sehr positiv
 Nahezu alle Umläufe können mit H₂-Bussen direkt bedient werden.
 Umlauf 5130 muss angepasst werden.

Hettinger E-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag

Energieverbrauch Umläufe Solobus Worst Case Hettinger



100%



Erforderl. Zeit Zwischenladen

Umlauf Brechen



Zwischen Laden



Sukzessive Umstellung



Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW
8001	63 min	45 min
8003	21 min	15 min
8002	20 min	14 min

Technische Einschätzung negativ

Es sind keine Umläufe vorhanden, die direkt elektrisch betrieben werden können.

Mittelfristig (Batteriekapazität ca. 400 kWh) können zwei Umläufe elektrifiziert werden.

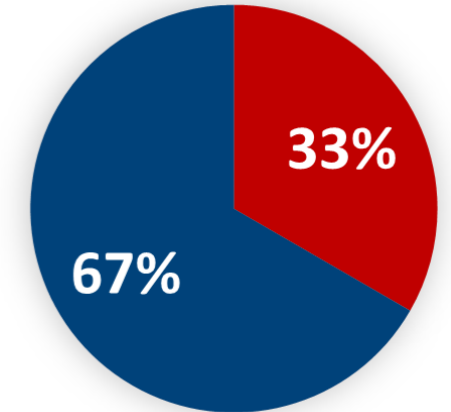
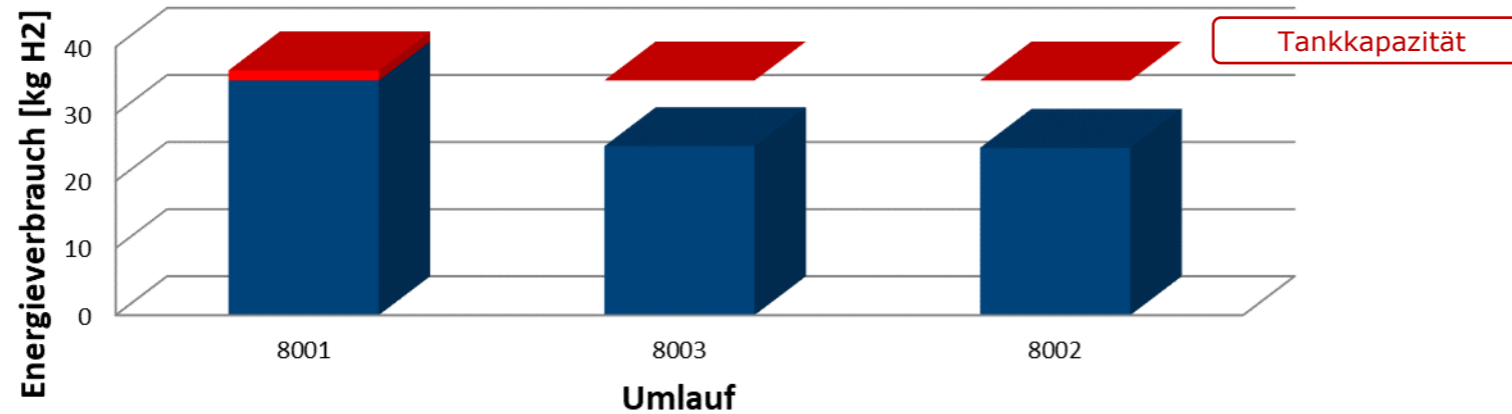
Da alle Umläufe reichweitenkritisch sind, ist das Aufbrechen der Umläufe betriebsintern keine Option.

Ein Fahrzeugmehrbedarf muss in Kauf genommen werden.

Hettinger H₂-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag

Energieverbrauch Umläufe Solobus H2 Hettinger



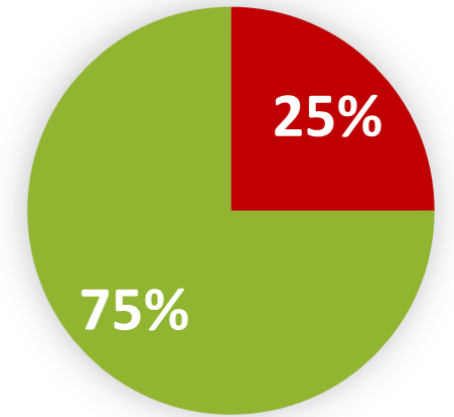
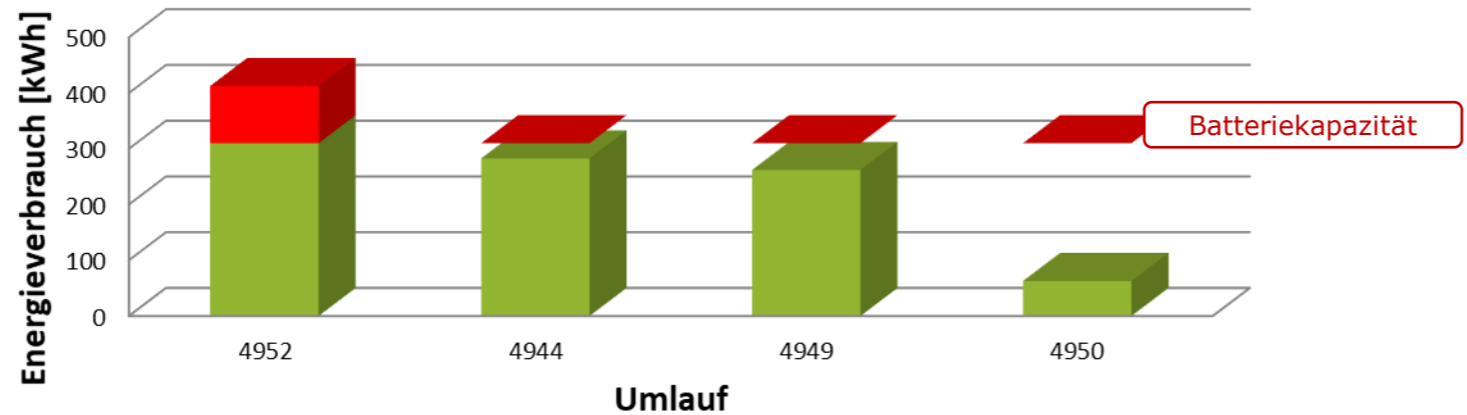
Technische Einschätzung tendenziell positiv

Nahezu alle Umläufe können mit H₂-Bussen direkt bedient werden.
Umlauf 8001 muss angepasst werden.

Lillig E-Bus Verbrauchsübersicht

Dienstag

Energieverbrauch Umläufe Solobus Worst Case Lillig



Erforderl. Zeit Zwischenladen

Umlauf Brechen



Zwischen Laden



Sukzessive Umstellung



Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW
4952	25 min	18 min

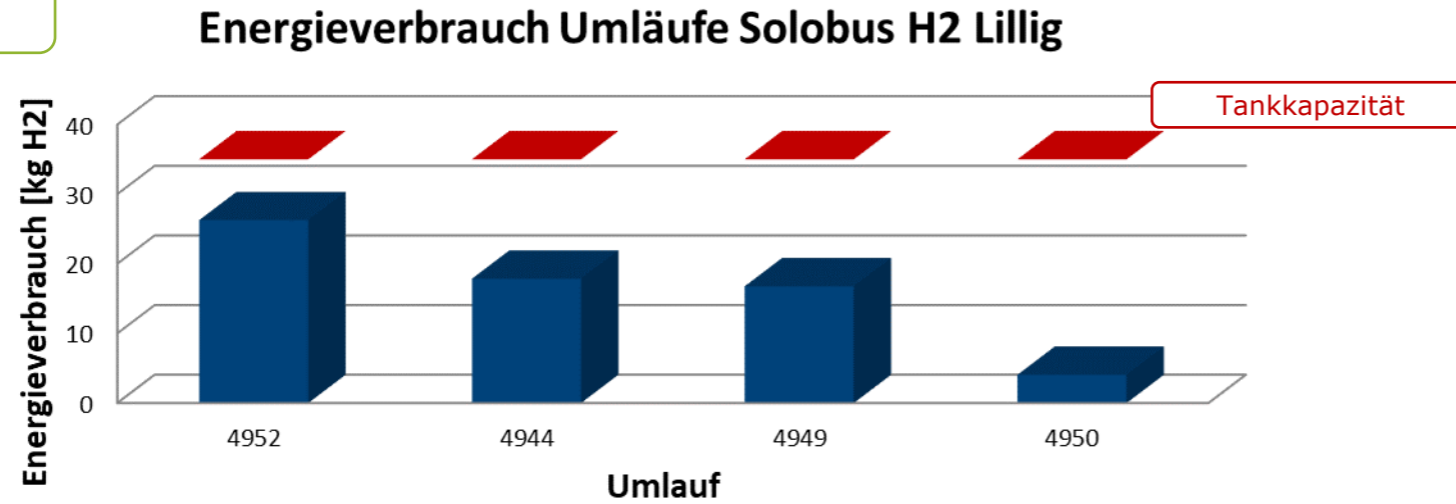
Technische Einschätzung positiv

Drei der vier Umläufe können direkt mit Elektrobussen betrieben werden. Durch Umlafoptimierung kann das Energiedefizit des kritischen Umlaufs ggf. kurzfristig kompensiert werden (insbesondere mittelfristig bei einer Batteriekapazität von ca. 400 kWh). Notfalls besteht die Option den Umlauf durch Zwischenladen zu unterstützen.

Ein Fahrzeugmehrbedarf ist unwahrscheinlich.

Lillig H₂-Bus Verbrauchsübersicht

Dienstag



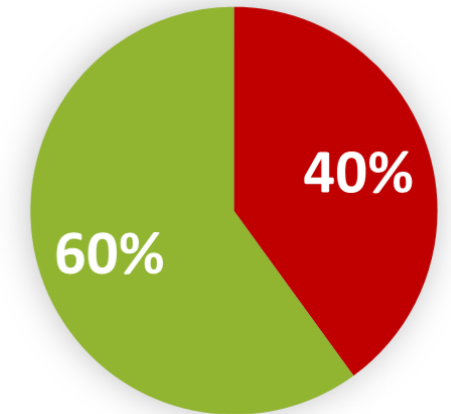
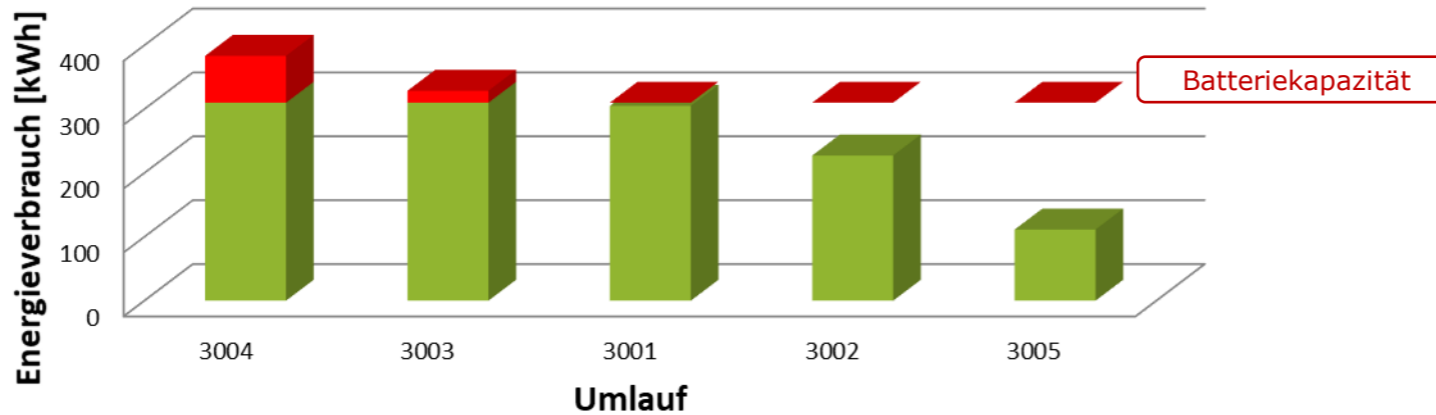
100%

Technische Einschätzung sehr positiv
Alle Umläufe sind direkt mit H₂-Bussen umsetzbar.

Nitschke E-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag

Energieverbrauch Umläufe Solobus Worst Case Nitschke



Erforderl. Zeit
Zwischenladen

Umlauf
Brechen



Zwischen
Laden



Sukzessive
Umstellung



Technische Einschätzung tendenziell positiv

Es sind diverse Umläufe vorhanden, die direkt elektrisch betrieben werden können. Mittelfristig (Batteriekapazität ca. 400 kWh) können alle Umläufe elektrifiziert werden.

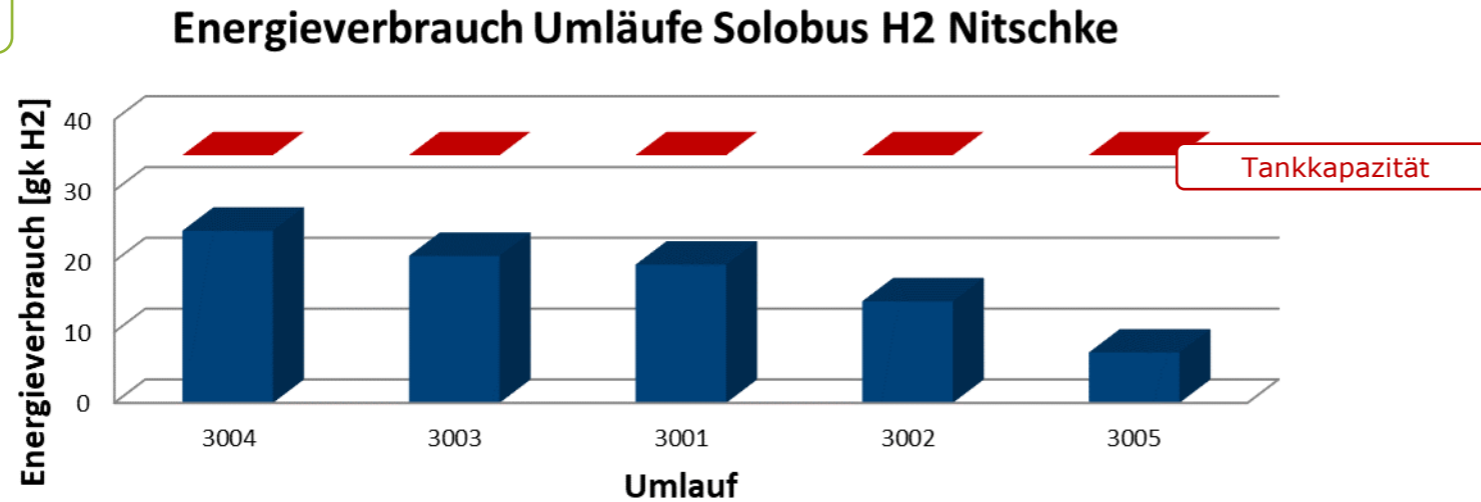
Die kurzfristig verbleibenden kritischen Umläufe sollten durch Aufbrechen der Umläufe optimiert werden. Durch Zwischenladen können einzelne Umläufe ggf. weiter verbessert werden.

Ein Fahrzeugmehrbedarf ist unwahrscheinlich.

Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW
3004	18 min	13 min
3003	4 min	3 min

Nitschke H₂-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag



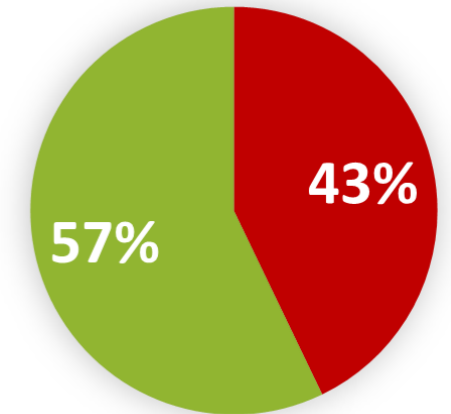
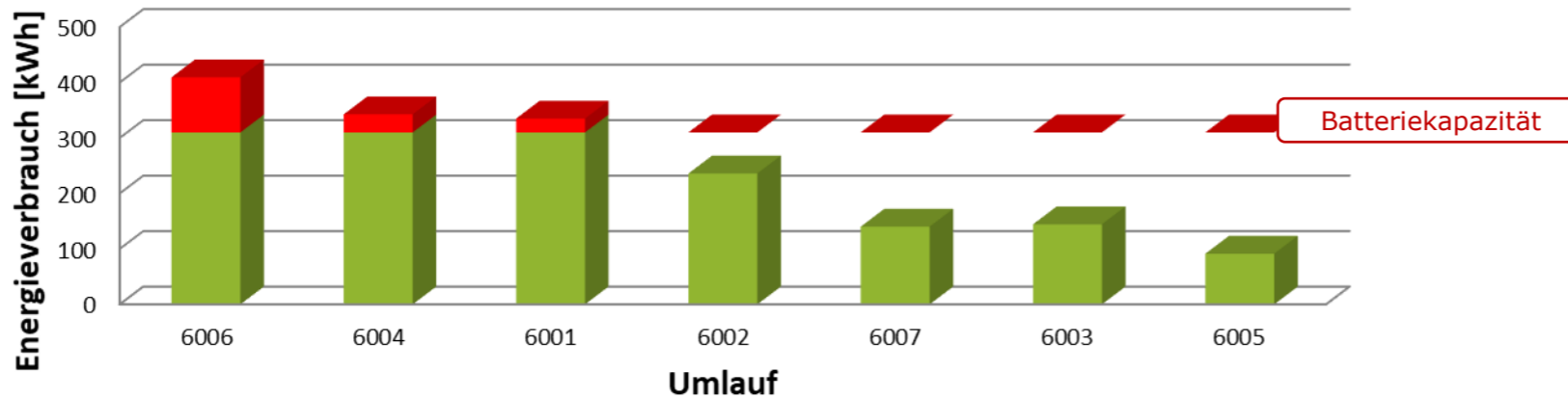
100%

Technische Einschätzung sehr positiv
Alle Umläufe sind direkt mit H₂-Bussen umsetzbar.

Ott E-Bus Verbrauchsübersicht

Freitag

Energieverbrauch Umläufe Solobus Worst Case Ott



Erforderl. Zeit
Zwischenladen

Umlauf
Brechen



Zwischen
Laden



Sukzessive
Umstellung



Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW
6006	24 min	17 min
6004	8 min	6 min
6001	6 min	4 min

Technische Einschätzung tendenziell positiv

Es sind diverse Umläufe vorhanden, die direkt elektrisch betrieben werden können. Mittelfristig (Batteriekapazität ca. 400 kWh) können bis auf einen Umlauf alle elektrifiziert werden.

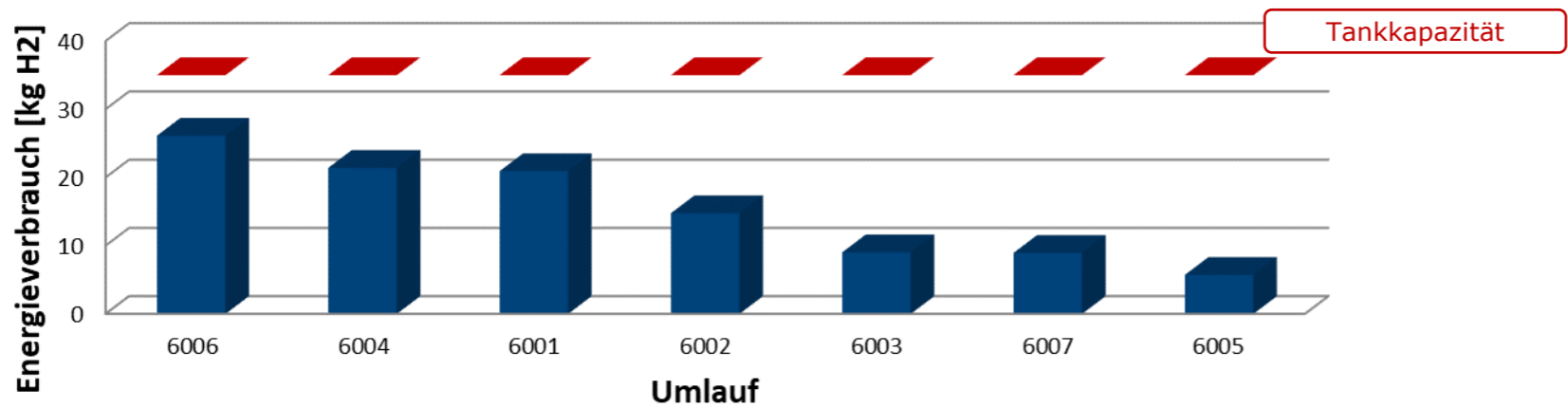
Die (kurzfristig) verbleibenden kritischen Umläufe sollten durch Aufbrechen der Umläufe optimiert werden. Durch Zwischenladen können einzelne Umläufe ggf. weiter verbessert werden.

Ein Fahrzeugmehrbedarf ist unwahrscheinlich.

Ott H₂-Bus Verbrauchsübersicht

Freitag

Energieverbrauch Umläufe Solobus H2 Ott

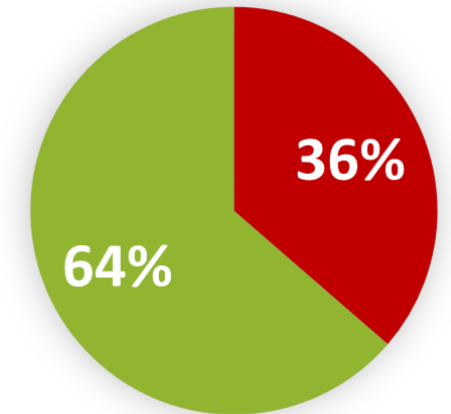
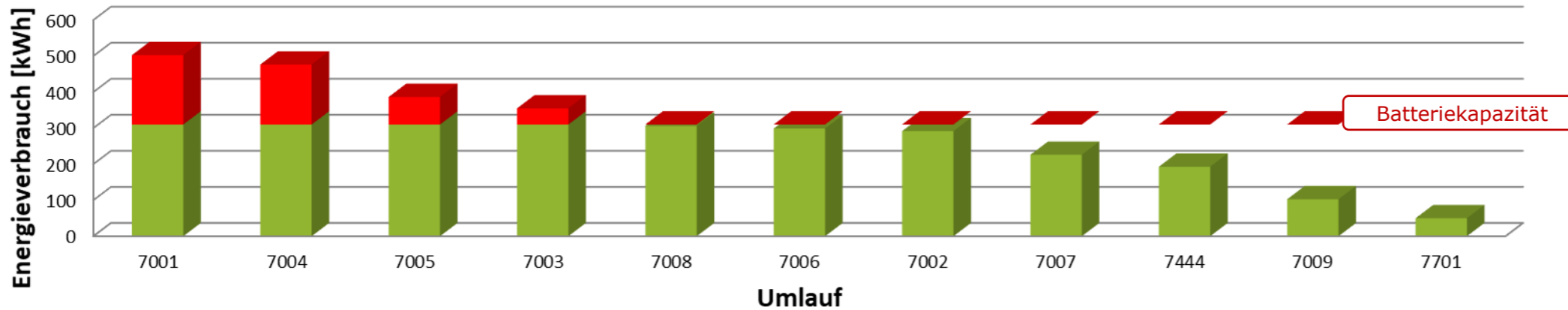


Technische Einschätzung sehr positiv
Alle Umläufe sind direkt mit H₂-Bussen umsetzbar.

Pflüger E-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag

Energieverbrauch Umläufe Solobus Worst Case Pflüger



Erforderl. Zeit Zwischenladen

Umlauf Brechen



Zwischen Laden



Sukzessive Umstellung



Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW
7001	46 min	33 min
7004	40 min	29 min
7005	18 min	13 min
7003	11 min	8 min

Technische Einschätzung tendenziell positiv

Es sind diverse Umläufe vorhanden, die direkt elektrisch betrieben werden können. Mittelfristig (Batteriekapazität ca. 400 kWh) können bis auf zwei Umläufe alle elektrifiziert werden.

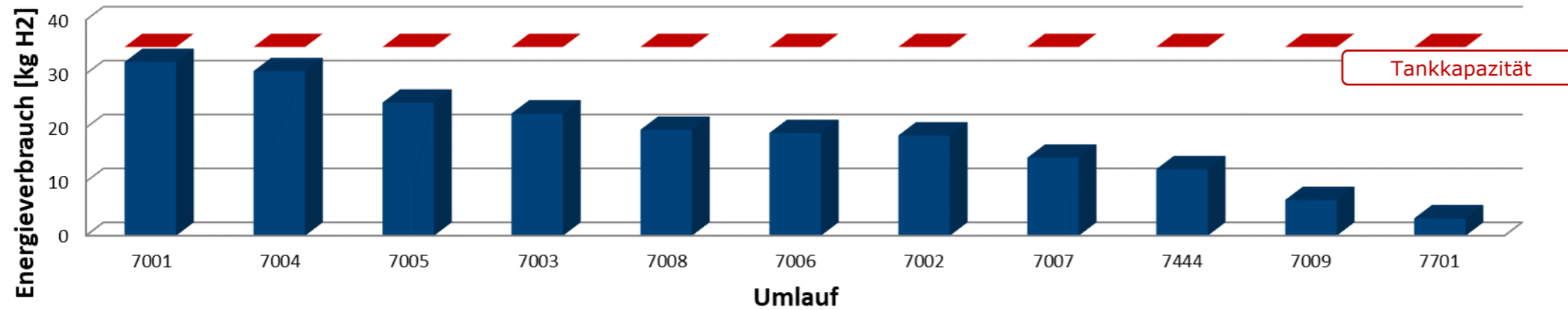
Die verbleibenden kritischen Umläufe sollten durch Aufbrechen der Umläufe optimiert werden. Durch Zwischenladen können einzelne Umläufe ggf. weiter verbessert werden.

Ein Fahrzeugmehrbedarf ist unwahrscheinlich.

Pflüger H₂-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag

Energieverbrauch Umläufe Solobus H2 Pflüger



100%

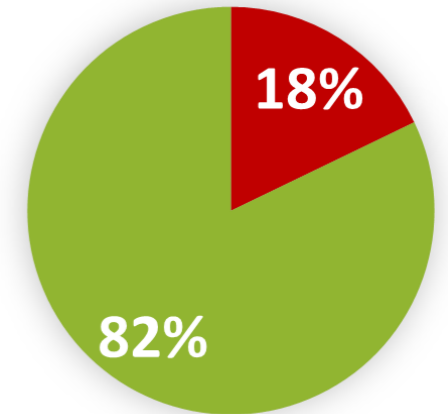
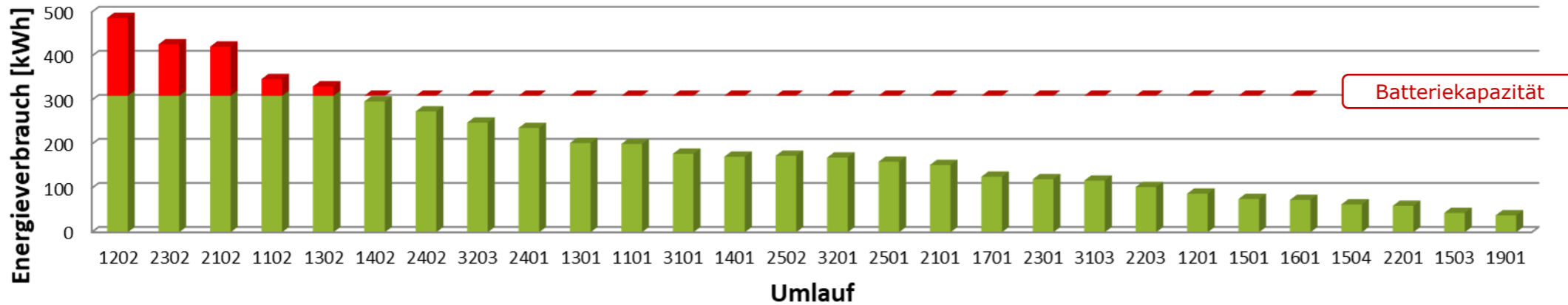
Technische Einschätzung sehr positiv

Alle Umläufe sind direkt mit H₂-Bussen umsetzbar.

Seitz E-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag

Energieverbrauch Umläufe Solobus Worst Case Seitz



Erforderl. Zeit Zwischenladen

Umlauf Brechen



Zwischen Laden



Sukzessive Umstellung



Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW
1202	42 min	30 min
2302	28 min	20 min
2102	27 min	19 min
1102	9 min	6 min
1302	5 min	4 min

Technische Einschätzung positiv

Es sind viele Umläufe vorhanden, die direkt elektrisch betrieben werden können. Mittelfristig (Batteriekapazität ca. 400 kWh) können bis auf drei Umläufe alle elektrifiziert werden.

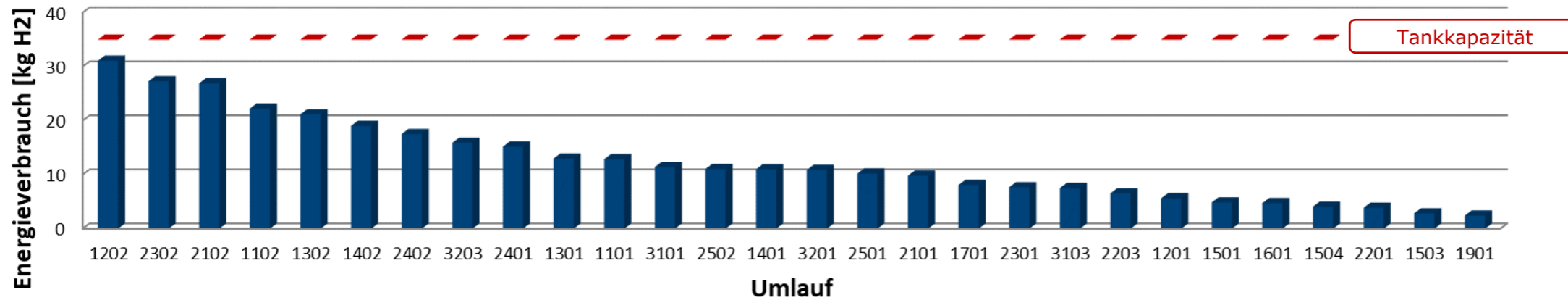
Die verbleibenden kritischen Umläufe sollten durch Aufbrechen der Umläufe optimiert werden. Durch Zwischenladen können einzelne Umläufe ggf. weiter verbessert werden.

Ein Fahrzeugmehrbedarf ist unwahrscheinlich.

Seitz H₂-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag

Energieverbrauch Umläufe Solobus H2 Seitz



100%

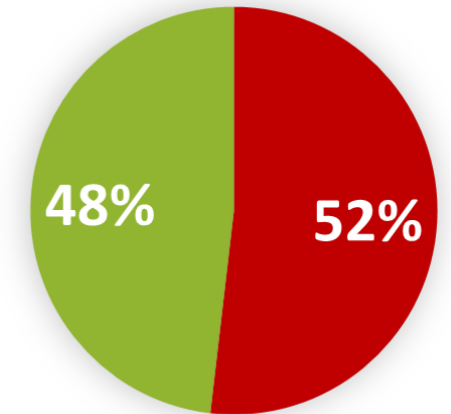
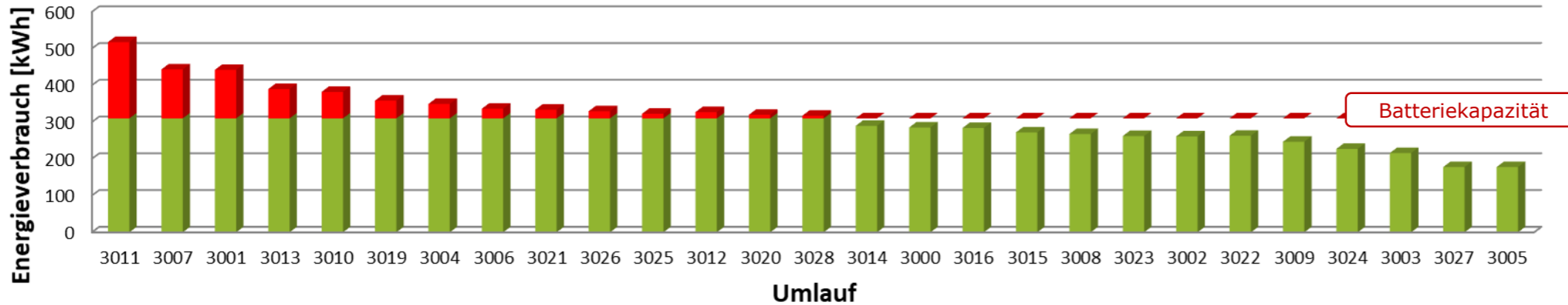
Technische Einschätzung sehr positiv

Alle Umläufe sind direkt mit H₂-Bussen umsetzbar.

SWEG (ohne Stadtbus) E-Bus Verbrauchsübersicht

Wochentag

Energieverbrauch Umläufe Solobus Worst Case SWEG



Erforderl. Zeit Zwischenladen

Umlauf Brechen



Zwischen Laden



Sukzessive Umstellung



Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW	Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW
3011	50 min	36 min	3006	6 min	5 min
3007	32 min	23 min	3021	6 min	4 min
3001	32 min	23 min	3026	5 min	3 min
3013	19 min	14 min	3025	3 min	2 min
3010	17 min	12 min	3012	4 min	3 min
3019	12 min	8 min	3020	2 min	2 min
3004	9 min	7 min	3028	2 min	1 min

Technische Einschätzung tendenziell negativ

Es sind diverse Umläufe vorhanden, die direkt elektrisch betrieben werden können. Mittelfristig (Batteriekapazität ca. 400 kWh) können bis auf drei Umläufe alle elektrifiziert werden.

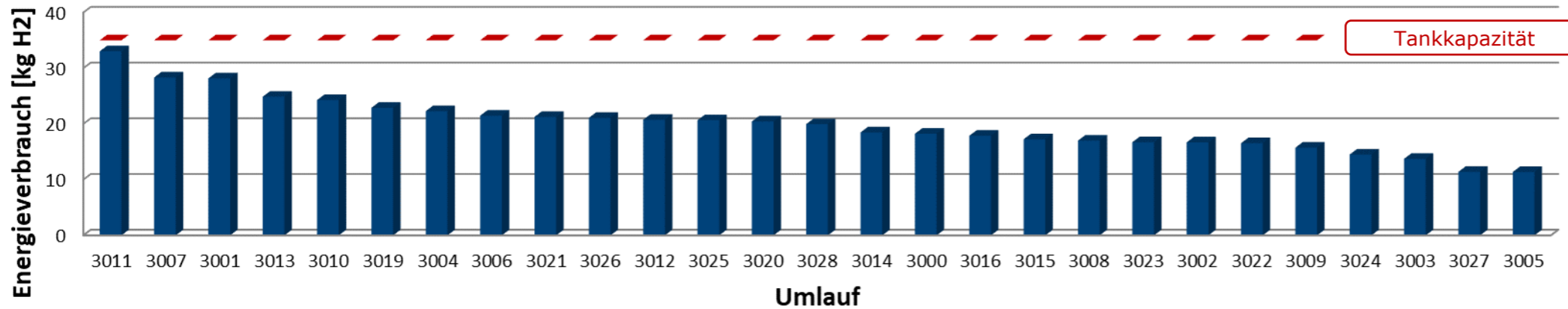
Die verbleibenden kritischen Umläufe sollten durch Aufbrechen der Umläufe optimiert werden. Durch Zwischenladen können einzelne Umläufe ggf. weiter verbessert werden.

Ein Fahrzeugmehrbedarf ist unwahrscheinlich.

SWEG (ohne Stadtbus) H₂-Bus Verbrauchsübersicht

Wochentag

Energieverbrauch Umläufe Solobus H2 SWEG



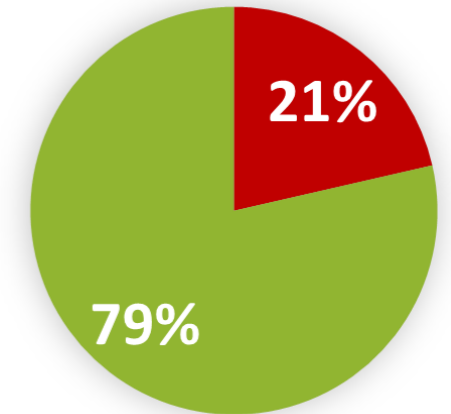
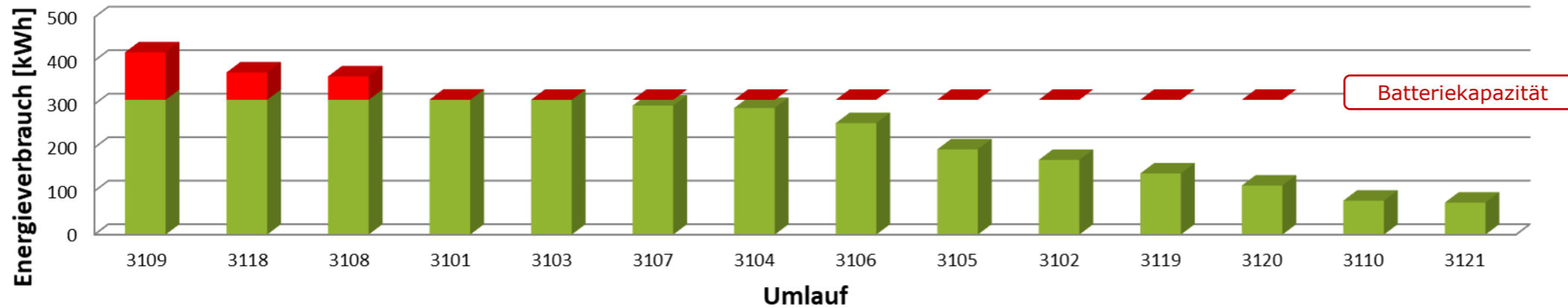
Technische Einschätzung sehr positiv

Alle Umläufe sind direkt mit H₂-Bussen umsetzbar.

Ziegler E-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag

Energieverbrauch Umläufe Solobus Worst Case Ziegler



Erforderl. Zeit Zwischenladen

Umlauf Brechen



Zwischen Laden



Sukzessive Umstellung



Umlauf	P = 250 kW	P = 350 kW
3109	26 min	19 min
3118	15 min	11 min
3108	13 min	9 min

Technische Einschätzung positiv

Es sind diverse Umläufe vorhanden, die direkt elektrisch betrieben werden können. Mittelfristig (Batteriekapazität ca. 400 kWh) können bis auf einen Umlauf alle elektrifiziert werden.

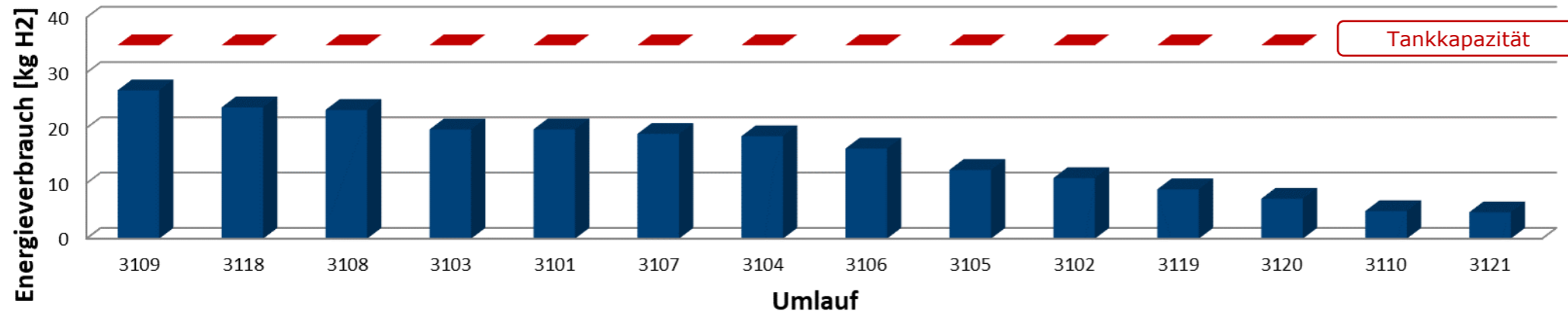
Die (kurzfristig) verbleibenden kritischen Umläufe sollten durch Aufbrechen der Umläufe optimiert werden. Durch Zwischenladen können einzelne Umläufe ggf. weiter verbessert werden.

Ein Fahrzeugmehrbedarf ist unwahrscheinlich.

Ziegler H₂-Bus Verbrauchsübersicht

Donnerstag

Energieverbrauch Umläufe Solobus H2 Ziegler



100%

Technische Einschätzung sehr positiv

Alle Umläufe sind direkt mit H₂-Bussen umsetzbar.

Zusammenfassung Verbrauchsübersicht

Betreiber	E-Bus heute			E-Bus ca. 2026			H ₂ -Bus		
	Anz. Uml. unkritisch	Anz. Uml. kritisch	Tendenz technisch	Anz. Uml. unkritisch	Anz. Uml. kritisch	Tendenz technisch	Anz. Uml. unkritisch	Anz. Uml. kritisch	Tendenz technisch
BEV	3 (100 %)	0 (0 %)		3 (100 %)	0 (0 %)		3 (100 %)	0 (0 %)	
Ehrlich	8 (62 %)	5 (83 %)		9 (69 %)	4 (31 %)		12 (92 %)	1 (8 %)	
Eisenhauer Solobus	7 (44 %)	9 (56 %)		7 (44 %)	9 (56 %)		15 (94 %)	1 (6 %)	
Eisenhauer Gelenkbus	2 (100 %)	0 (0 %)		2 (100 %)	0 (0 %)		2 (100 %)	0 (0 %)	
Hettinger	0 (0 %)	3 (100 %)		2 (67 %)	1 (33 %)		2 (67 %)	1 (33 %)	
Lillig	3 (75 %)	1 (25 %)		3 (75 %)	1 (25 %)		4 (100 %)	0 (0 %)	
Nitschke	3 (60 %)	2 (40 %)		5 (100 %)	0 (0 %)		5 (100 %)	0 (0 %)	
Ott	4 (57 %)	3 (43 %)		6 (86 %)	1 (14 %)		7 (100 %)	0 (0 %)	
Pflüger	7 (64 %)	4 (36 %)		9 (82 %)	2 (18 %)		11 (100 %)	0 (0 %)	
Seitz	23 (82 %)	5 (18 %)		25 (89 %)	3 (11 %)		28 (100 %)	0 (0 %)	
SWEG ohne Stadtbus	13 (48 %)	14 (52 %)		24 (89 %)	3 (11 %)		27 (100 %)	0 (0 %)	
Ziegler	11 (79 %)	3 (21 %)		13 (93 %)	1 (7 %)		14 (100 %)	0 (0 %)	
Summe	84 (63 %)	49 (37 %)		108 (81 %)	25 (19 %)		130 (98 %)	3 (2 %)	

Pro und Contra

	E-Bus	H ₂ -Bus
PRO	<ul style="list-style-type: none">• Niedrigere Betriebskosten• Niedriger Invest für Infrastruktur (Laden auf Betriebshof möglich)• Großes Angebot von Fahrzeugen und Infrastruktur vorhanden• Hohe Innovationsdichte für Weiterentwicklungen und Services (z.B. Notladen, Pay per Use)	<ul style="list-style-type: none">• Umläufe können fast immer 1:1 ersetzt werden• Höhere Reichweite• Verbrauch weniger stark abhängig von Außentemperatur
CONTRA	<ul style="list-style-type: none">• Erst in ca. 5 Jahren sind ca. 80 % der Umläufe direkt umsetzbar (1:1 Ersatz)• Mehr Aufwand bei Neuzuschnitt der Umläufe• Ggf. Zwischenladeinfrastruktur oder zusätzliche Fahrzeuge notwendig	<ul style="list-style-type: none">• Höherer Aufwand (Explosionsschutz) in Werkstatt und ggf. auch Abstellhalle• Höhere Betriebskosten (Wirkungsgrad)• In der Regel kein Tanken auf Betriebshof<ul style="list-style-type: none">• Transfer zu zentraler Tankstelle → Mehrverbrauch, erhöhter Personaleinsatz• Eingeschränktes Fahrzeug-Angebot

Vorschlag Vorzugsvariante

- H₂-Busse stellen aus **technischer Perspektive** die einfachere Alternative dar, da ein größerer Anteil der Umläufe ohne Änderungen umstellbar ist
- **Praktisch** verschieben wesentliche Faktoren die Tendenz zu E-Bussen
 - Mehrere H₂ Tankanlagen müssen für alle Betreiber **gut erreichbar** vorgesehen werden (Transferstrecken bedeuten zusätzlichen Verbrauch. Aktuell sind Tankanlagen im Depot bilanziert)
 - Der **Gesamtwirkungsgrad** bei E-Bussen ist deutlich besser als bei H₂-Bussen
 - ➔ Da für grünen Wasserstoff der Primärenergieträger ebenfalls Strom ist, kann angenommen werden, dass langfristig die **Betriebskosten** für H₂-Busse **wesentlich höher** sind als für E-Busse
 - Die Batterietechnik wird sich vsl. in den nächsten Jahren wesentlich verbessern
 - Die Batteriebus-Technik eignet sich besser für einen **schrittweisen Einstieg** und ist für die mittelständisch geprägten Betreiber einfacher und günstiger zu realisieren.

Vorschlag Vorzugsvariante

- E-Busse und H₂-Busse rangieren „auf Augenhöhe“
 - Unterschiedliche aber starke Pros und Contras
- Entscheidung letztlich abhängig von
 - Aufwand für betriebliche Anpassungen und Fahrzeugmehrbedarf (E-Bus)
 - Höhere Betriebskosten und hohen Infrastrukturinvestitionen (H₂-Bus)
- **Vorschlag Vorzugsvariante: E-Bus**
 - *Lieber betrieblich anpassen als in flächige H₂ Infrastruktur investieren*
 - *Erwartung an technische Entwicklung (wesentliche Verbesserungen höchstwahrscheinlich)*
 - *Sukzessive Erweiterung möglich*

Energiebedarf und Lastgangoptimierung

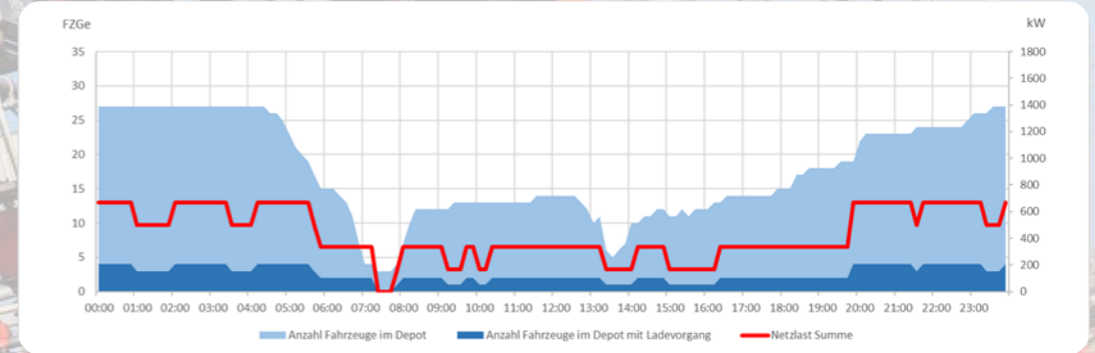
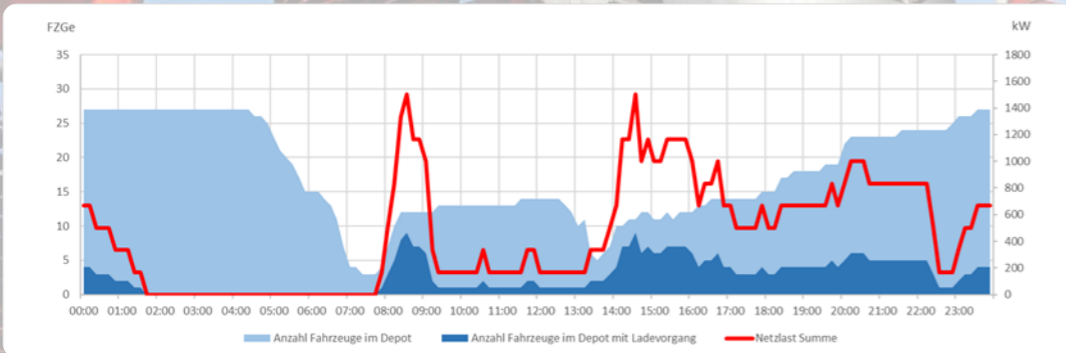


Bild: Netz Oberösterreich GmbH

Festlegung mögliche Ladeintervalle



- Wenn Tag der Umlaufuntersuchung MO – DO
 - Ankunft Depot = Ende Umlauf / Abfahrt Depot = Start Umlauf Folgetag
- Wenn Tag der Umlaufuntersuchung = FR
 - Ankunft Depot = Ende Umlauf Vortag / Abfahrt Depot = Start Umlauf Freitag
- Umlaufverknüpfung nach FIFO Prinzip
 - Der erste ankommende Bus übernimmt den ersten Umlauf des Folgetags

Fahrzeugmehrbedarf durch Zwischenladen im Depot

Umlaufverknüpfung Dieselbus



Umlauf 1

Depot

Umlauf 2

Zeit

Umlaufverknüpfung E-Bus ohne Mehrbedarf



Umlauf 1

Ladeintervall

Umlauf 2

Umlaufverknüpfung E-Bus mit Mehrbedarf



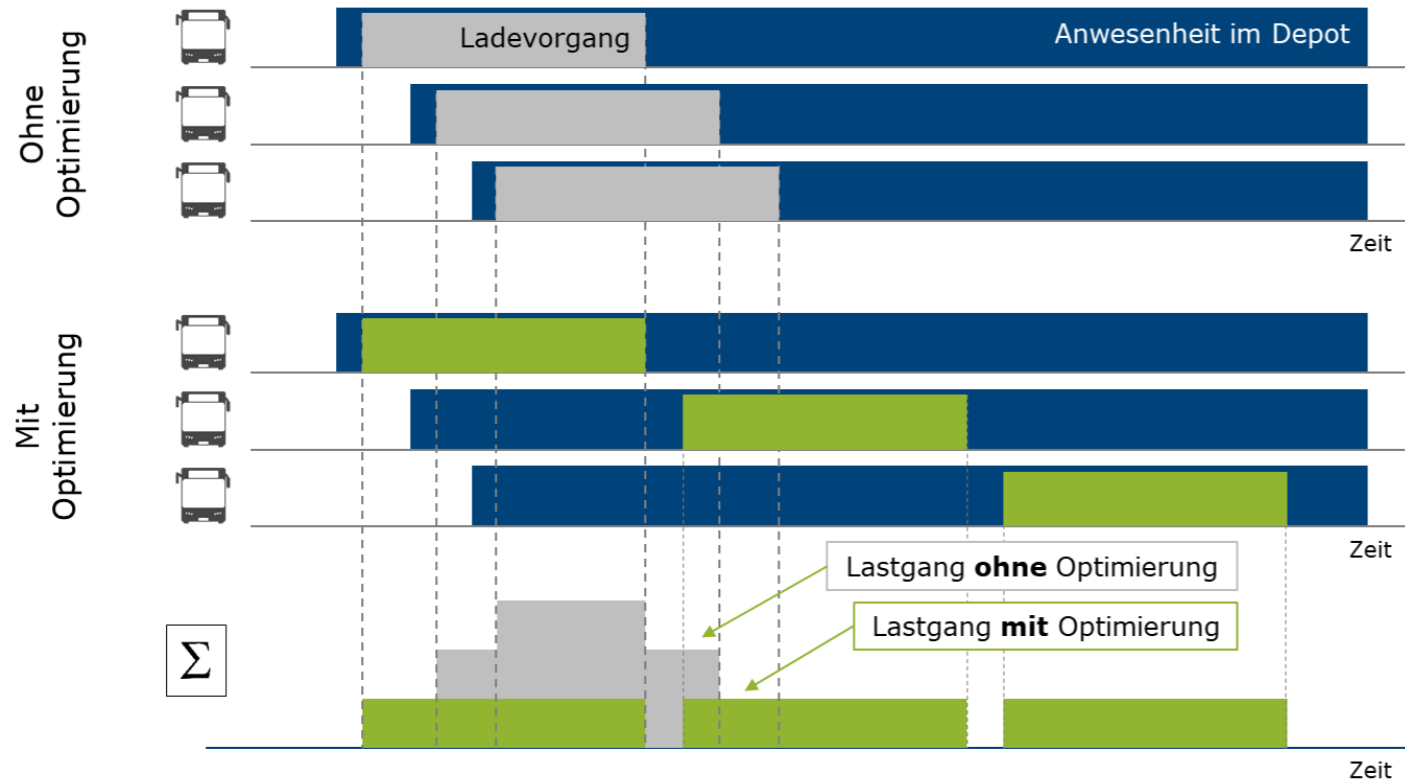
Umlauf 1

Ladeintervall



Umlauf 2

Prinzip Lastgangoptimierung



Die Lastgangoptimierung erfolgt:

- 1) Entsprechend der heutigen Umläufe
- 2) Mit verdoppelter Umlaufzahl (Vergrößerung Verkehrsangebot)

Ladeleistung = 130 kW

Systemwirkungsgrad = 90 %

Angenommen wird eine „unendliche Batterie“

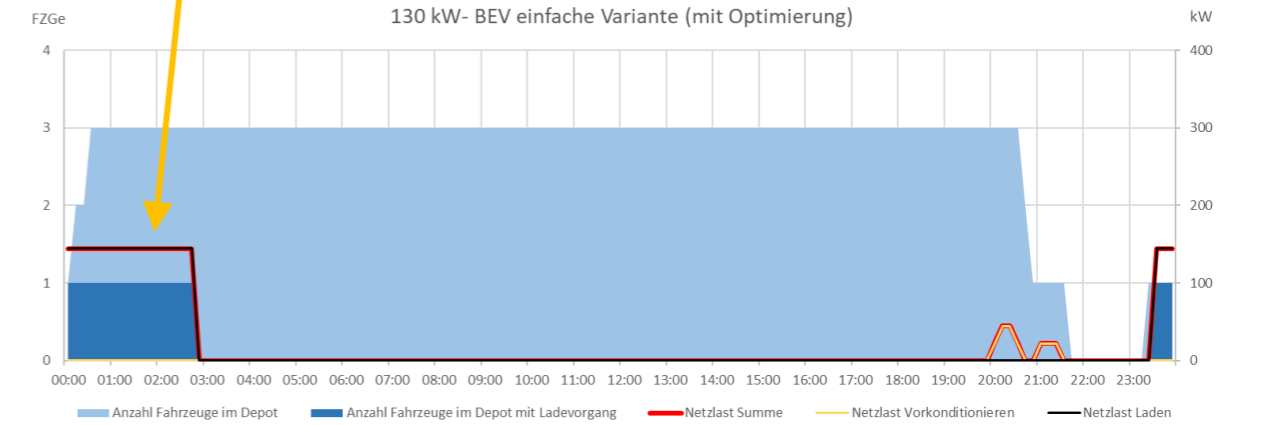
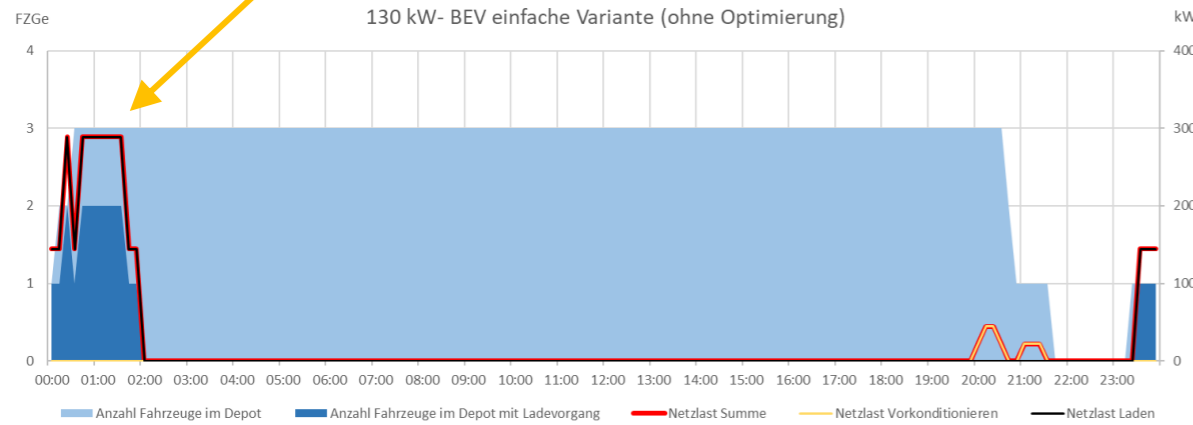
Das Ladesystem muss also den vollen Energiebedarf decken

BEV Lastgangübersicht

PEAK 289 kW

- 50 %

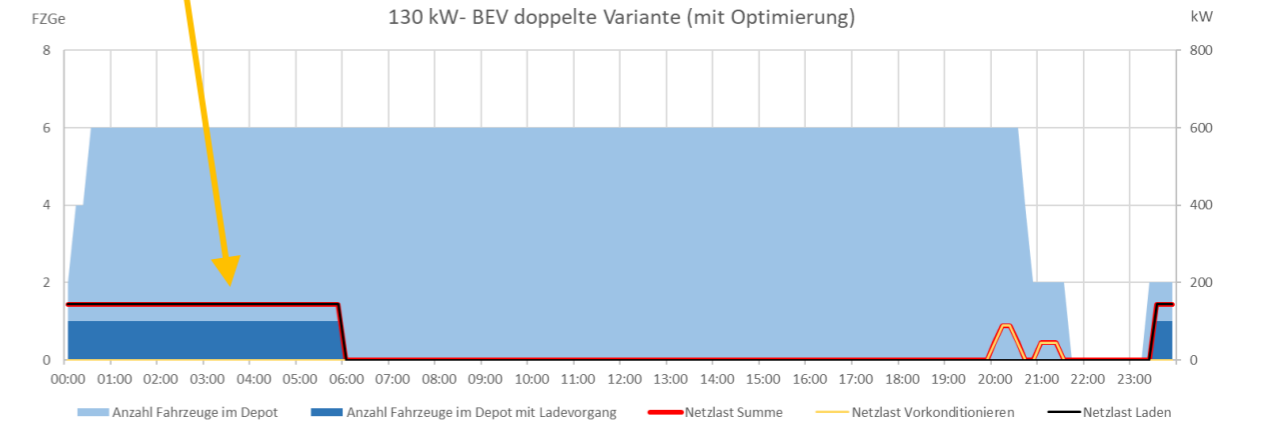
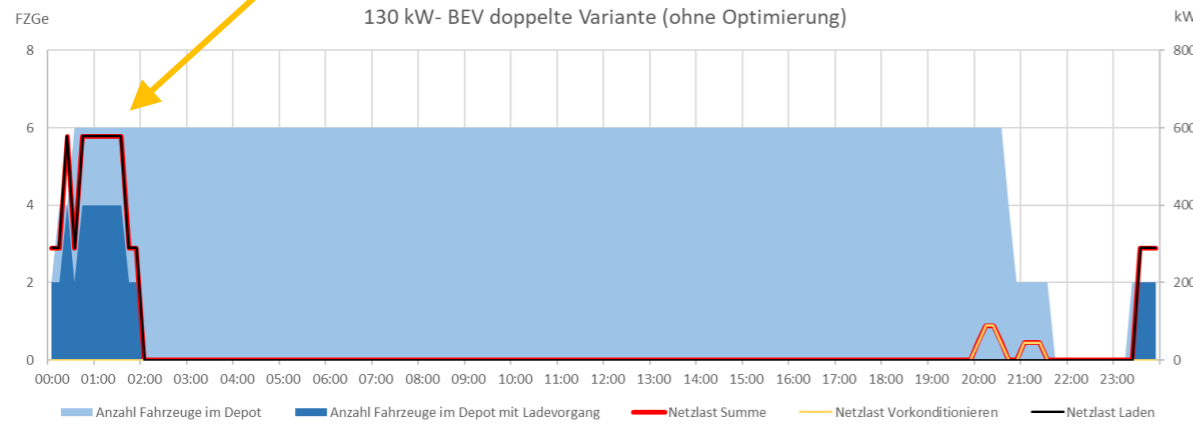
PEAK 144 kW



PEAK 578 kW

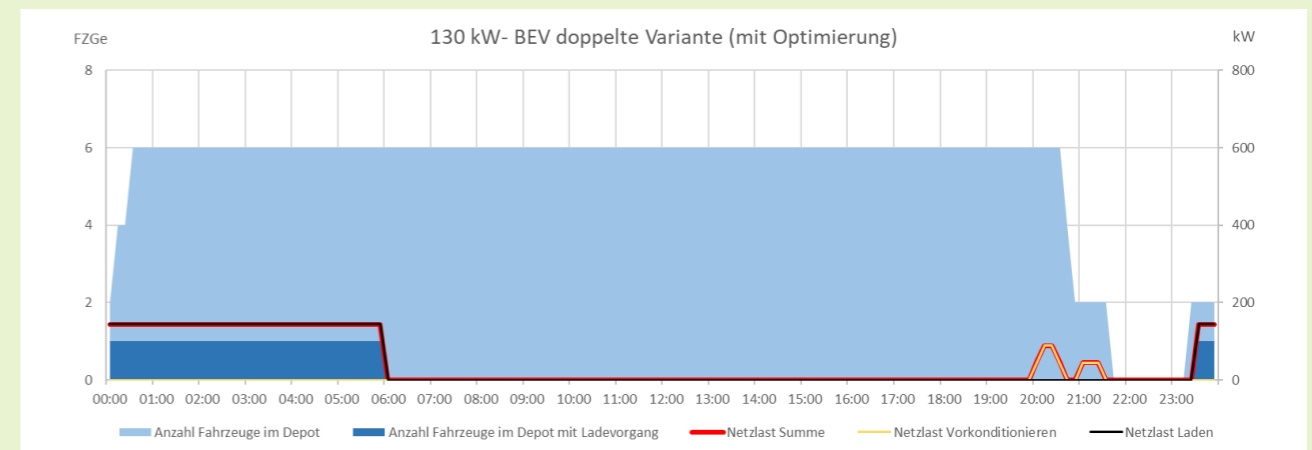
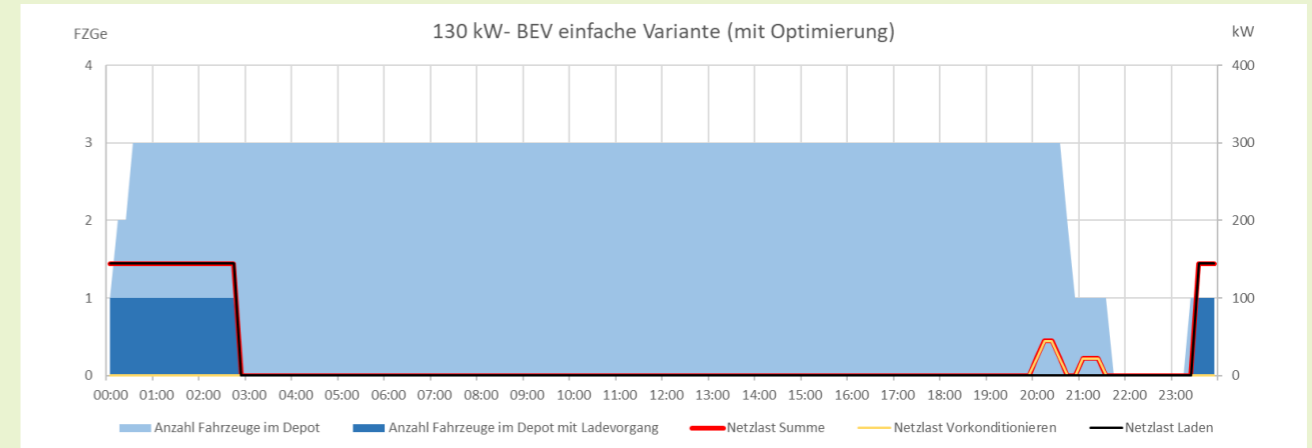
- 75 %

PEAK 144 kW



BEV Lastgang Besonderheiten

- Lange Aufenthaltsdauern
- Optimierung unkritisch
- Einfache Variante optimiert:
Max 1 Fahrzeug am Laden
- Doppelte Variante optimiert:
Max 1 Fahrzeug am Laden
- Vor und nach Optimierung 3 Busse erforderlich (einfache Variante)

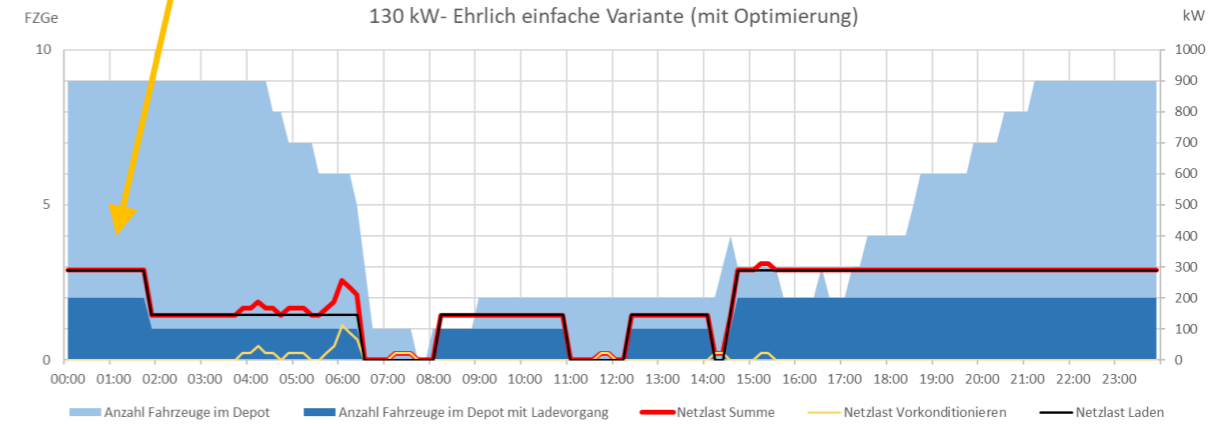
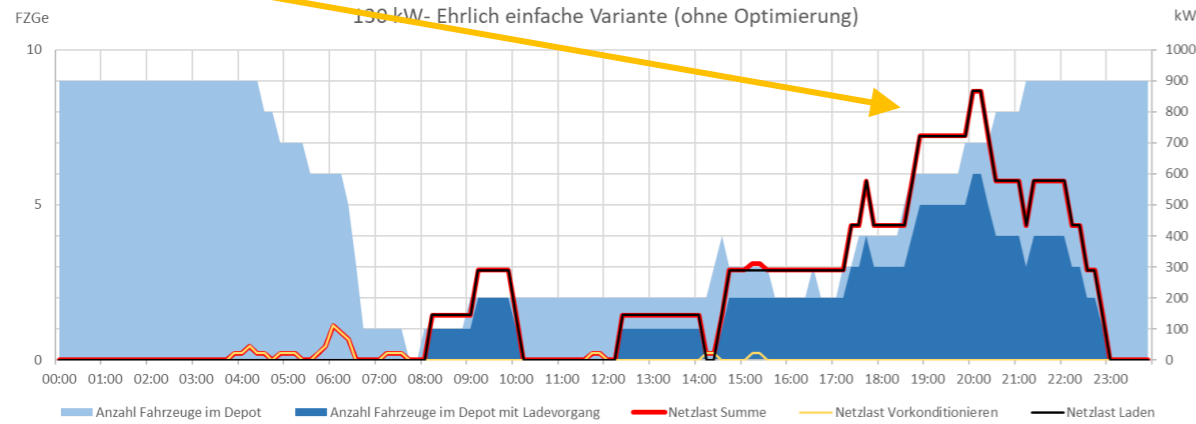


Ehrlich Lastgangübersicht

PEAK 867 kW

- 67 %

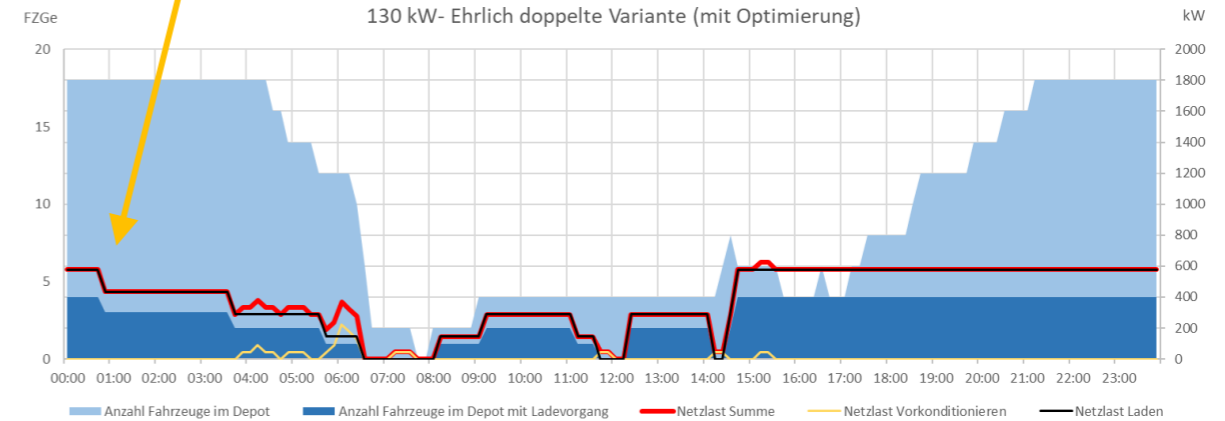
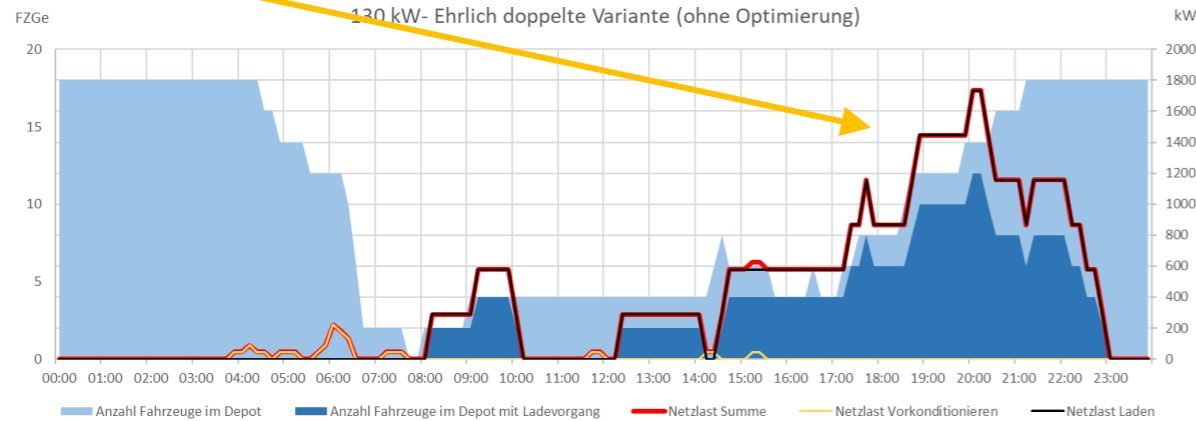
PEAK 289 kW



PEAK 1734 kW

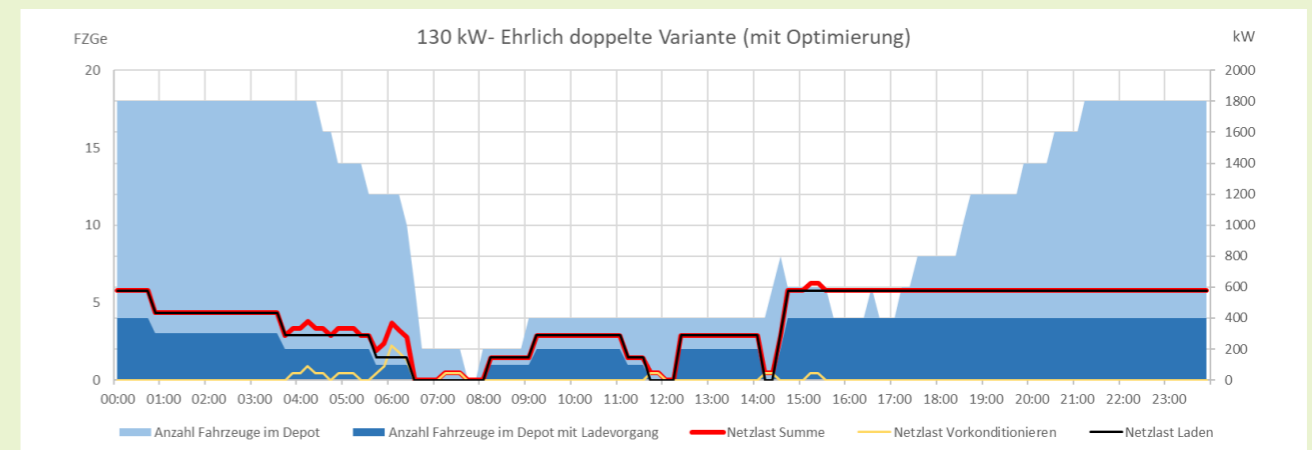
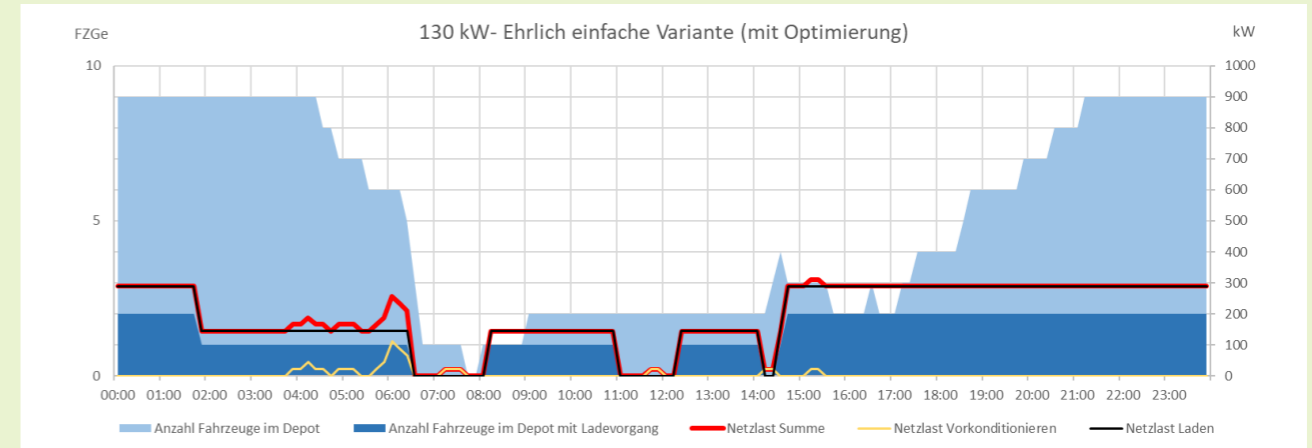
- 67 %

PEAK 578 kW



Ehrlich Lastgang Besonderheiten

- Kein erhöhtes Optimierungspotential bei „doppelter“ Variante (Verdopplung des Lastganges)
- Einfache Variante optimiert: Max 2 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Doppelte Variante optimiert: Max 4 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Vor und nach Optimierung 9 Busse erforderlich (einfache Variante)

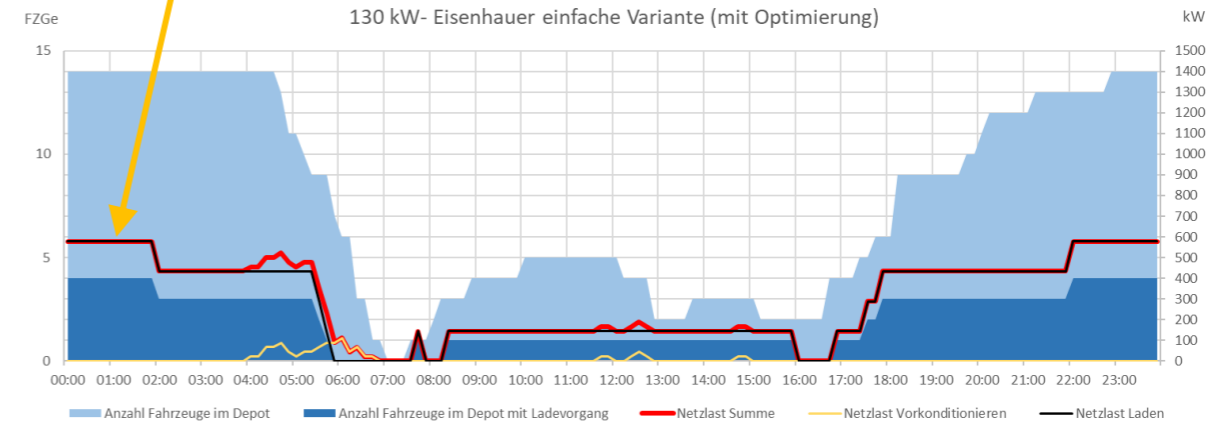
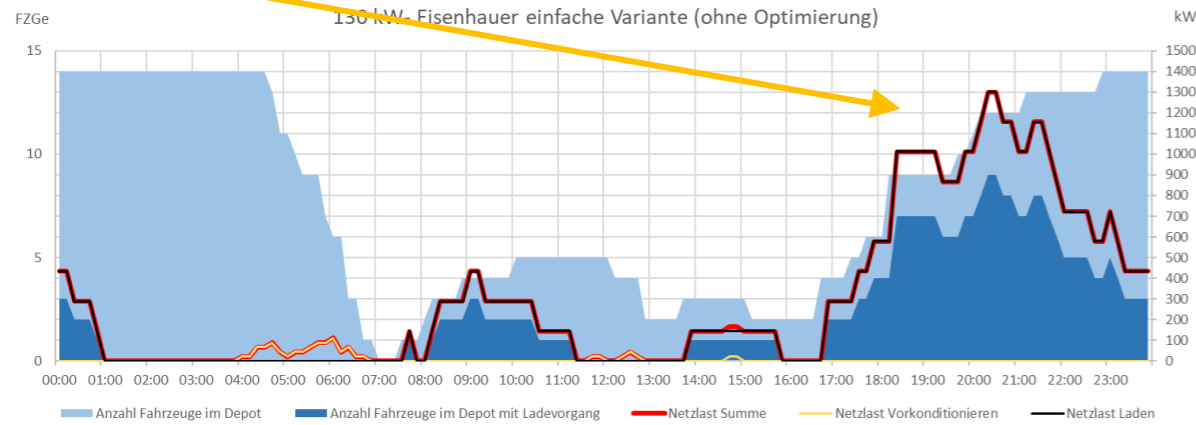


Eisenhauer Lastgangübersicht

PEAK 1300 kW

- 56 %

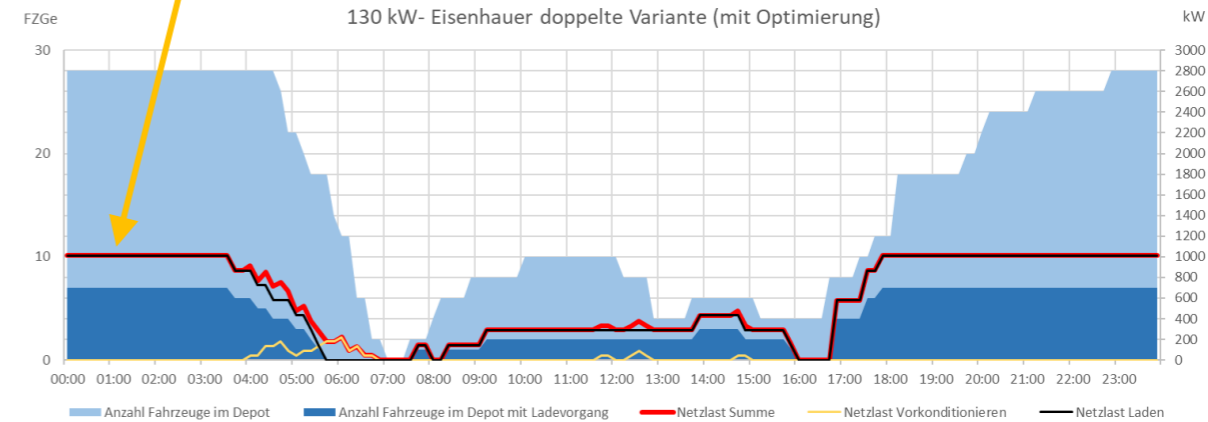
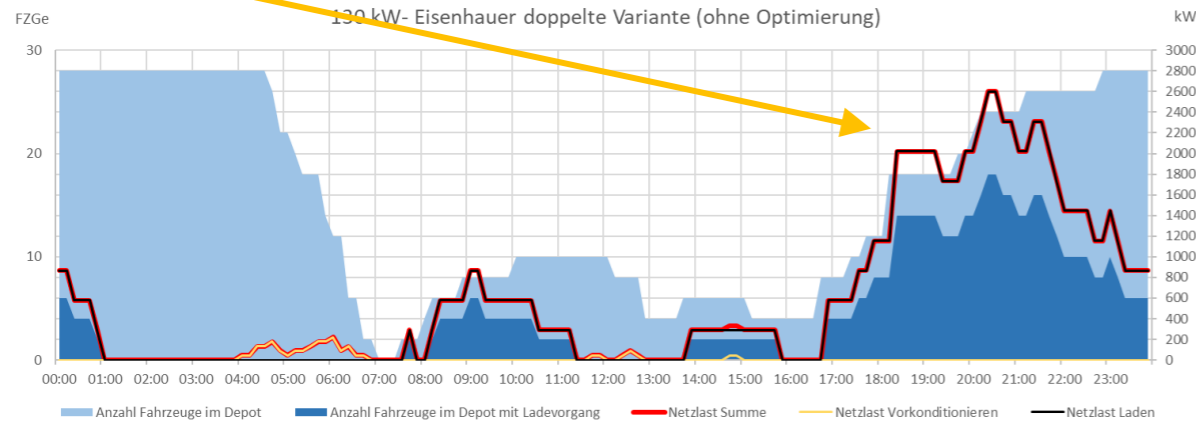
PEAK 578 kW



PEAK 2600 kW

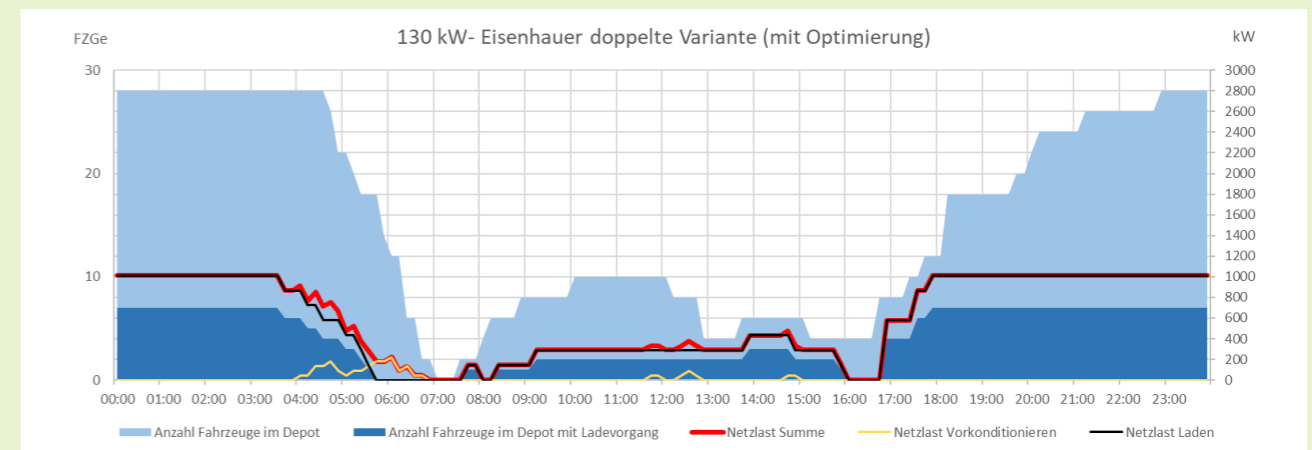
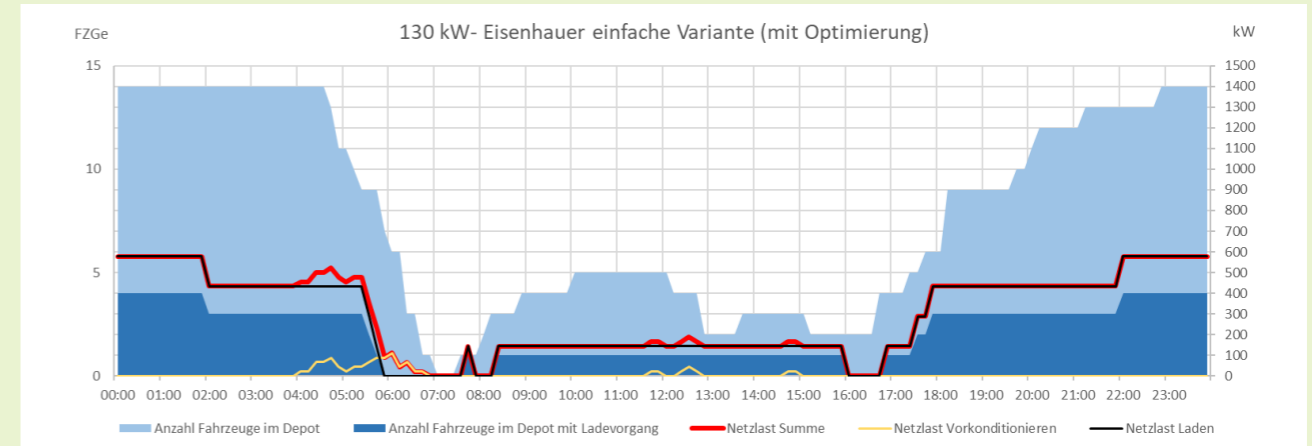
- 61 %

PEAK 1011 kW



Eisenhauer Lastgang Besonderheiten

- Einfache Variante optimiert:
Max 4 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Doppelte Variante optimiert:
Max 7 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Vor und nach Optimierung
13 Solobusse und 1 Gelenkbus
erforderlich (einfache Variante)



AP 4: Bewertung emissionsfreie Antriebe

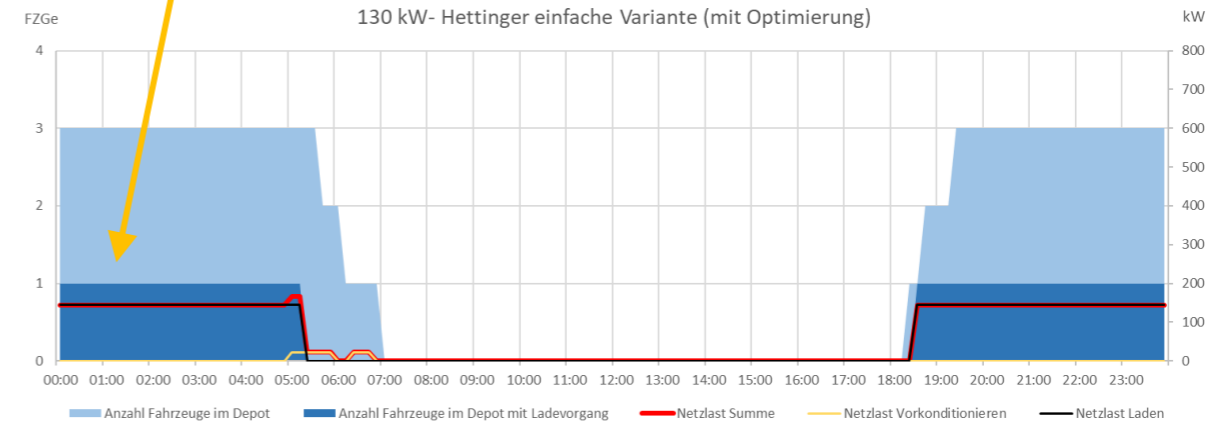
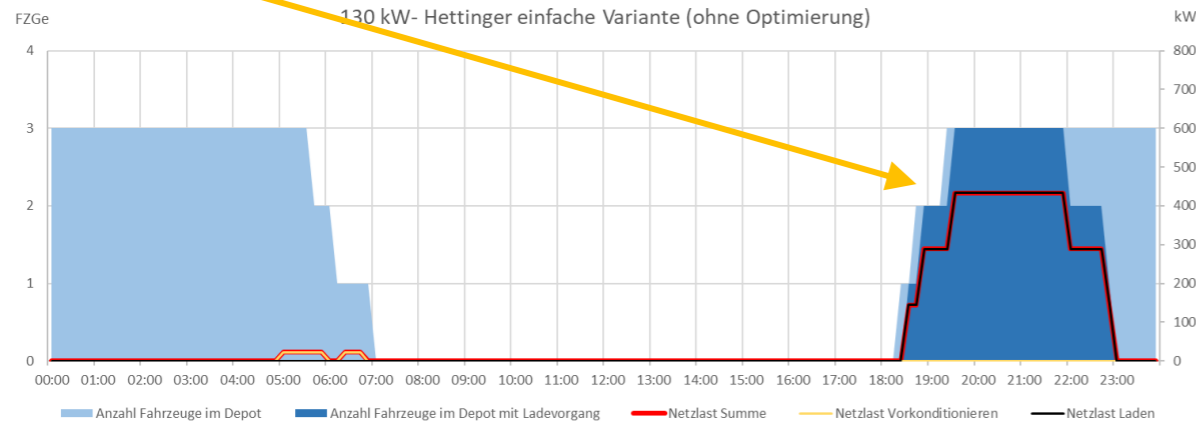
Hettinger Lastgangübersicht



PEAK 433 kW

- 67 %

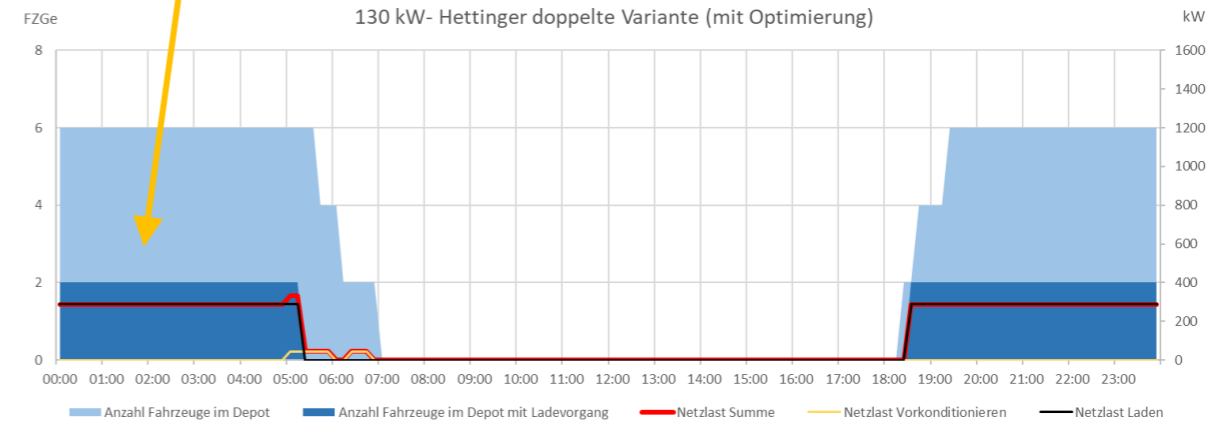
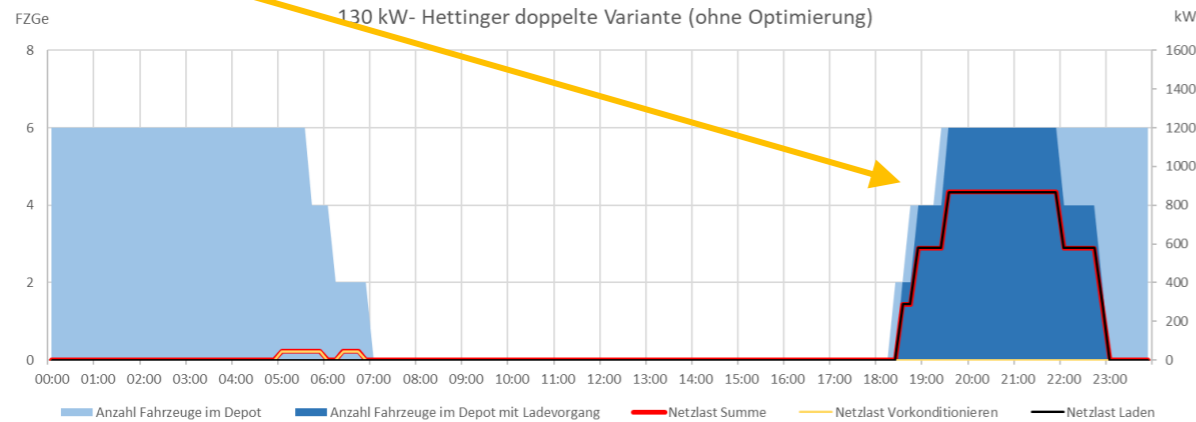
PEAK 144 kW



PEAK 867 kW

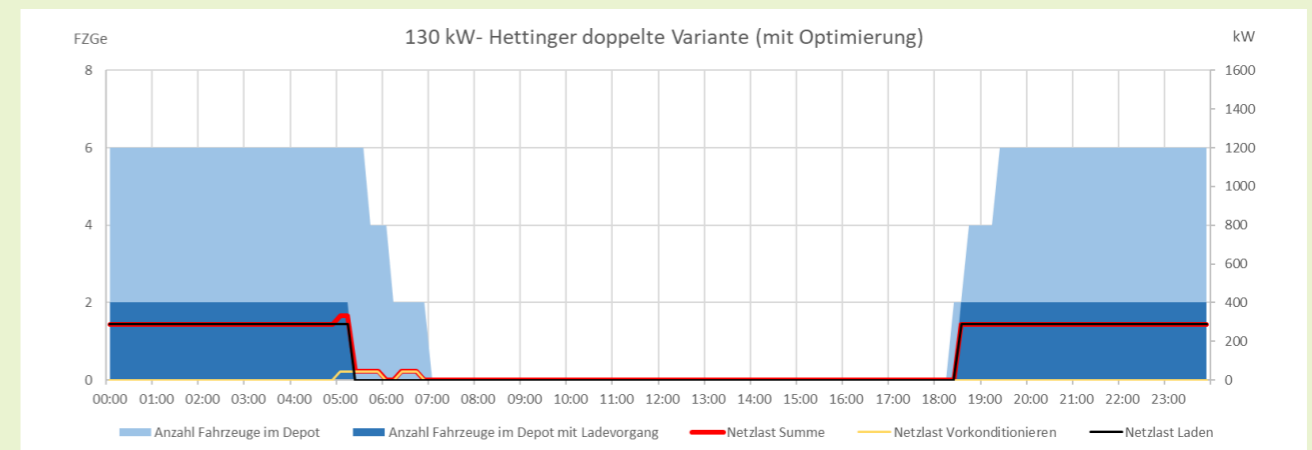
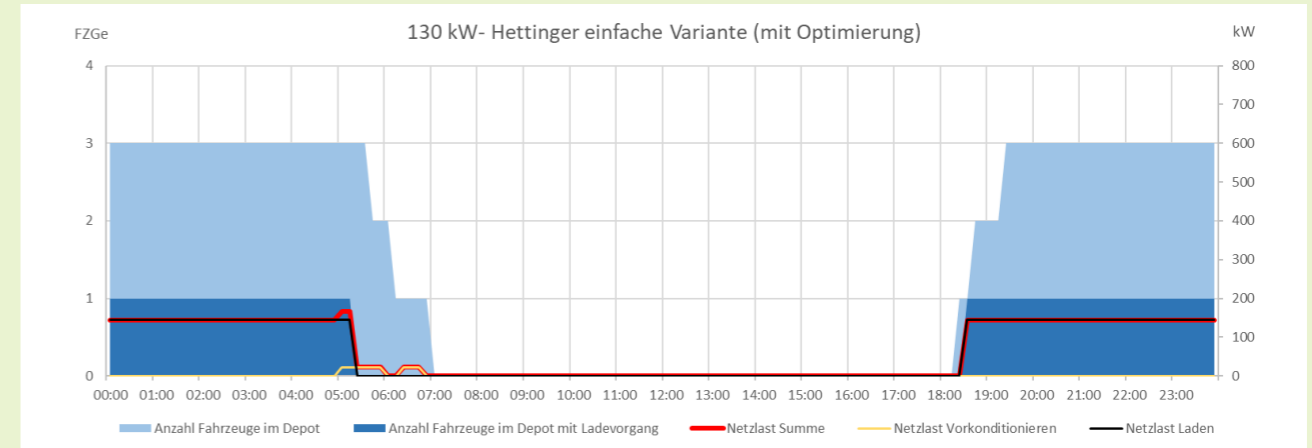
- 67 %

PEAK 289 kW



Hettinger Lastgang Besonderheiten

- Kein erhöhtes Optimierungspotential bei „doppelter“ Variante (Verdopplung des Lastganges)
- Einfache Variante optimiert: Max 1 Fahrzeug gleichzeitig am Laden
- Doppelte Variante optimiert: Max 2 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Vor und nach Optimierung 3 Busse erforderlich (einfache Variante)

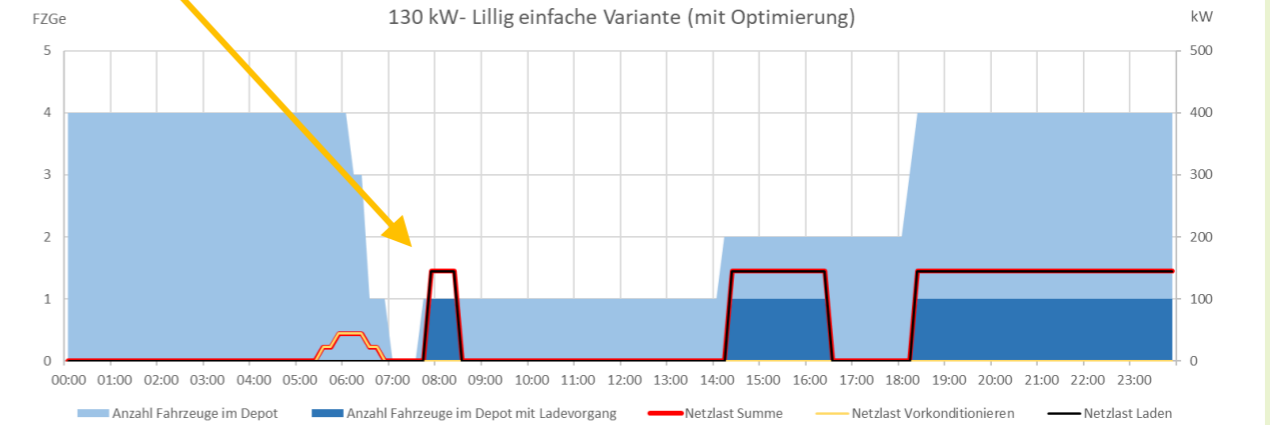
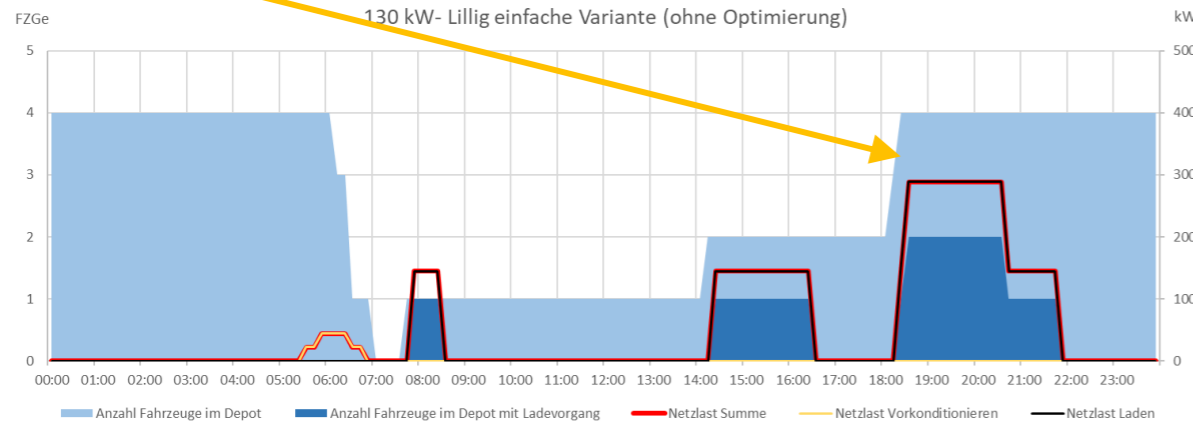


Lillig Lastgangübersicht

PEAK 289 kW

- 50 %

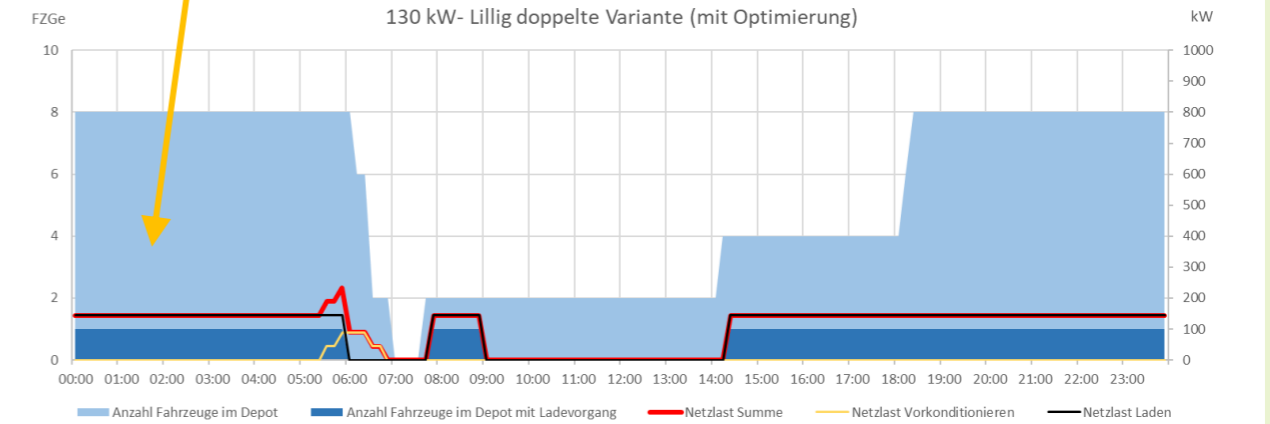
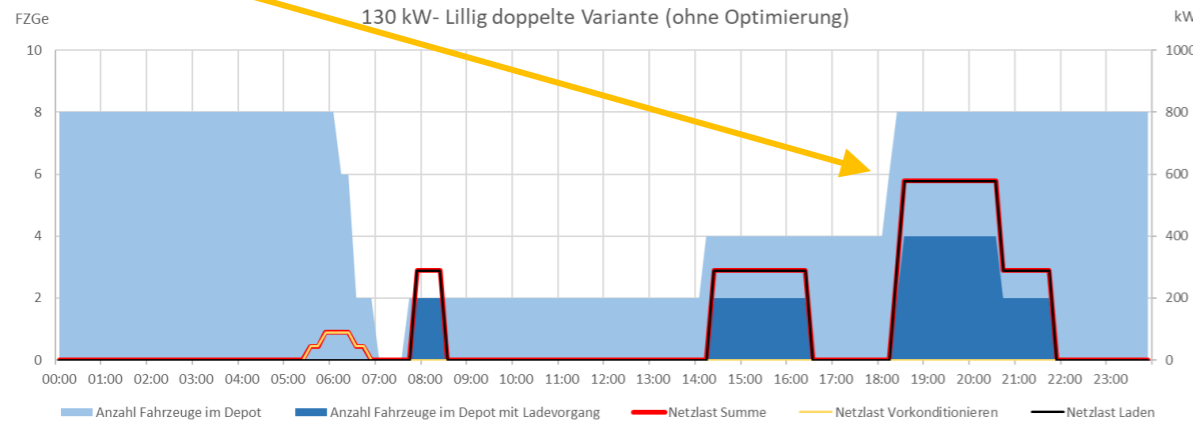
PEAK 144 kW



PEAK 578 kW

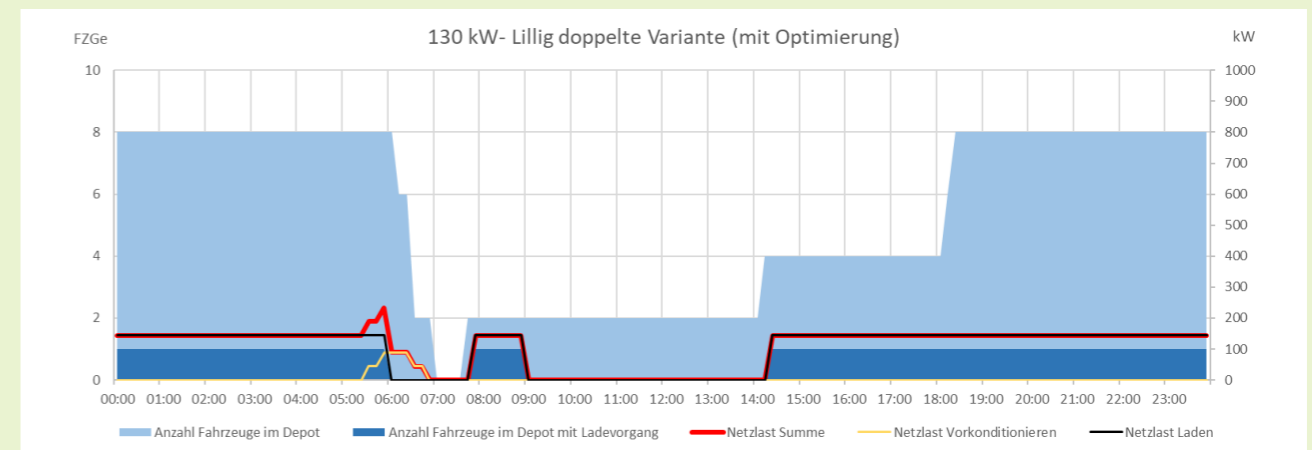
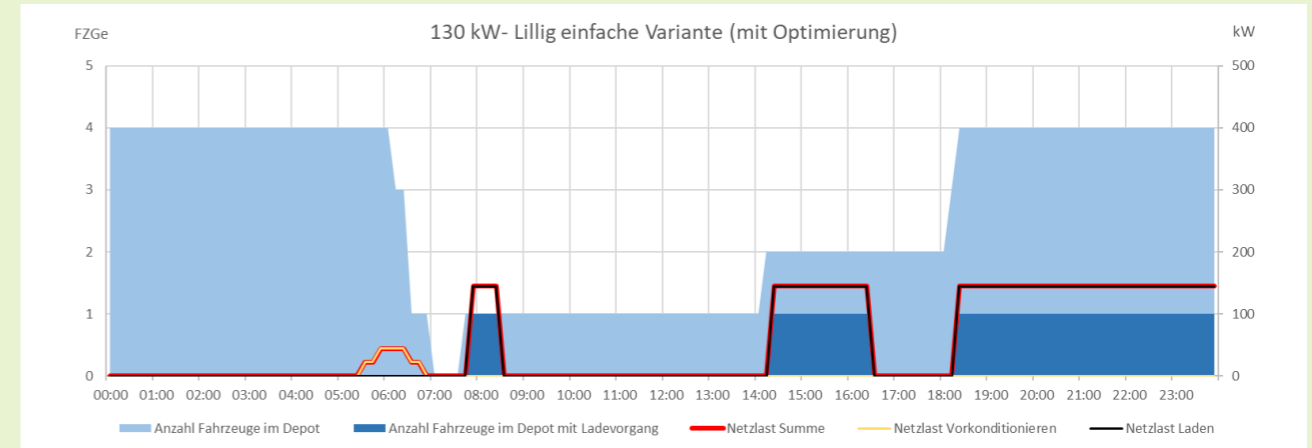
- 75 %

PEAK 144 kW



Lillig Lastgang Besonderheiten

- Lange Aufenthaltsdauern
- Optimierung unkritisch
- Einfache Variante optimiert:
Max 1 Fahrzeug am Laden
- Doppelte Variante optimiert:
Max 1 Fahrzeug am Laden
- Vor und nach Optimierung 4 Busse erforderlich (einfache Variante)



AP 4: Bewertung emissionsfreie Antriebe

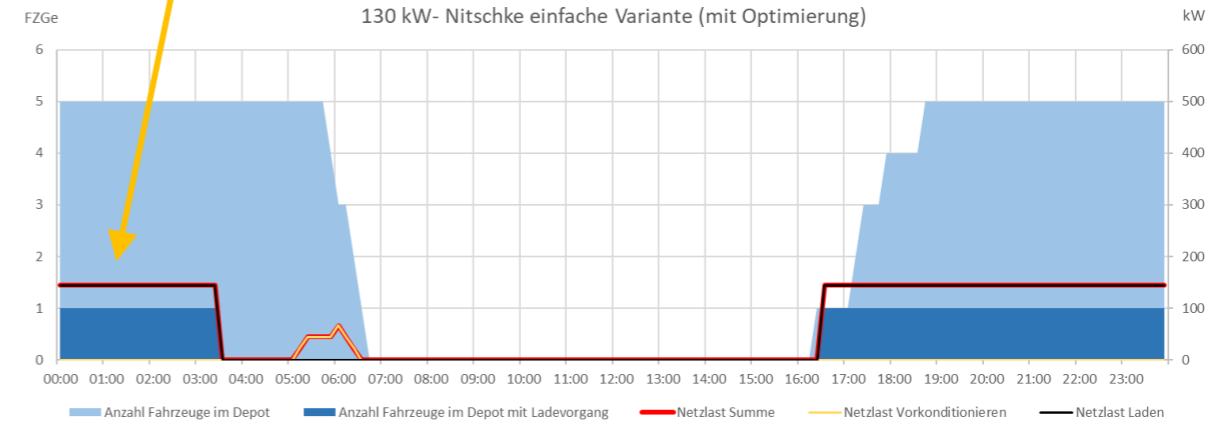
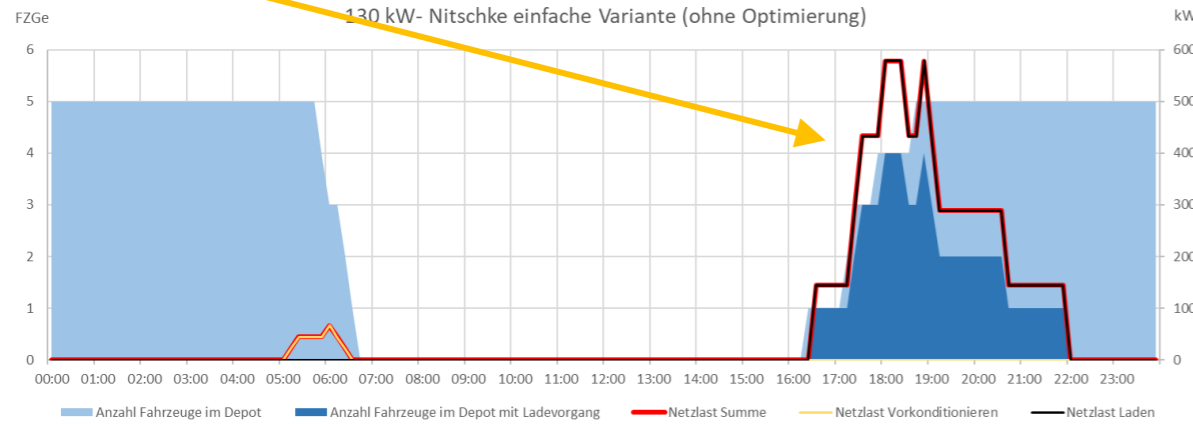
Nitschke Lastgangübersicht



PEAK 578 kW

- 75 %

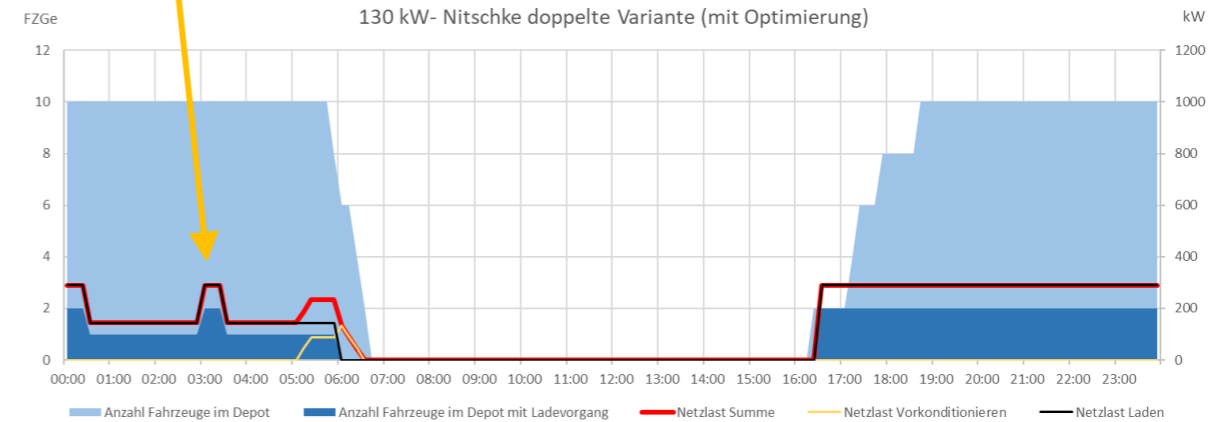
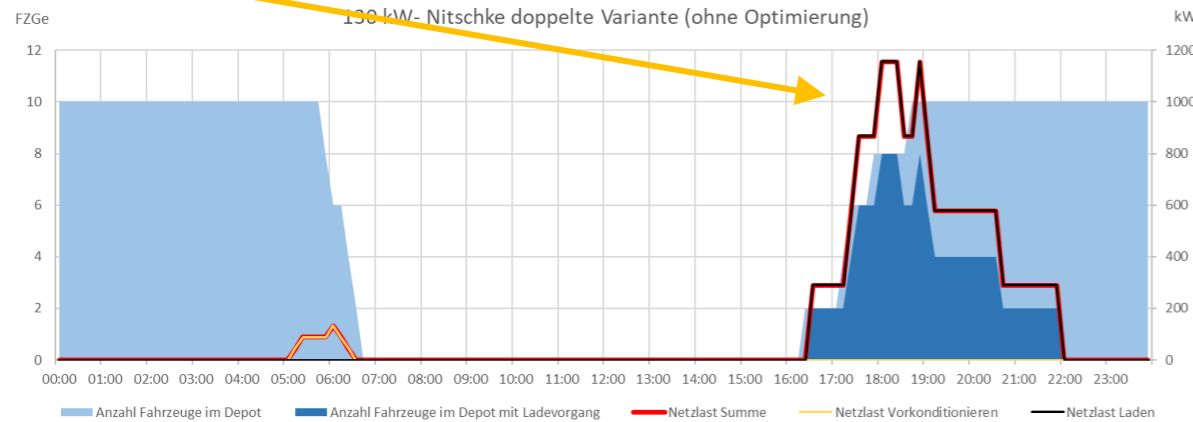
PEAK 144 kW



PEAK 1156 kW

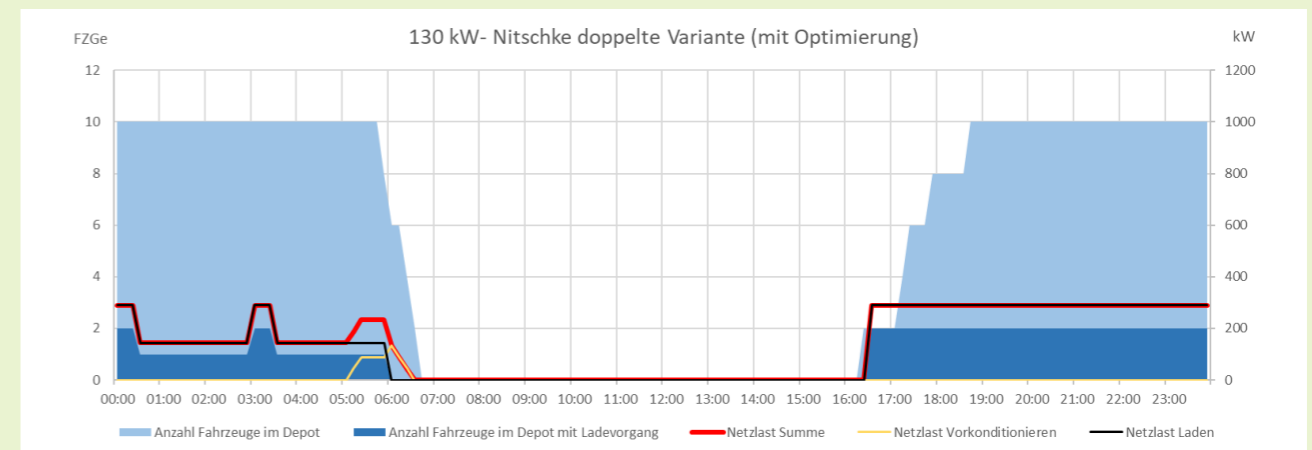
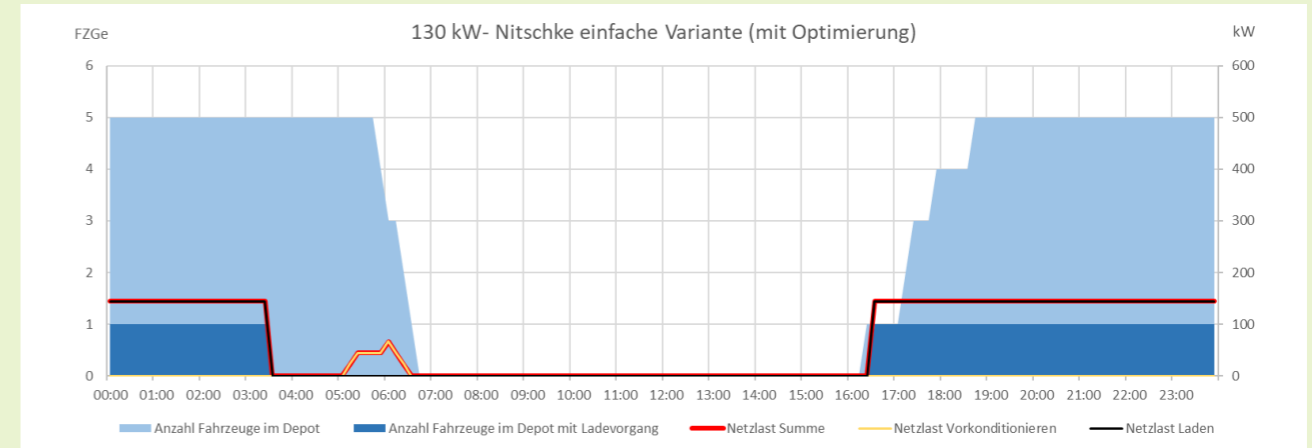
- 75 %

PEAK 289 kW



Nitschke Lastgang Besonderheiten

- Kein erhöhtes Optimierungspotential bei „doppelter“ Variante (Verdopplung des Lastganges)
- Einfache Variante optimiert: Max 1 Fahrzeug gleichzeitig am Laden
- Doppelte Variante optimiert: Max 2 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Vor und nach Optimierung 5 Busse erforderlich (einfache Variante)

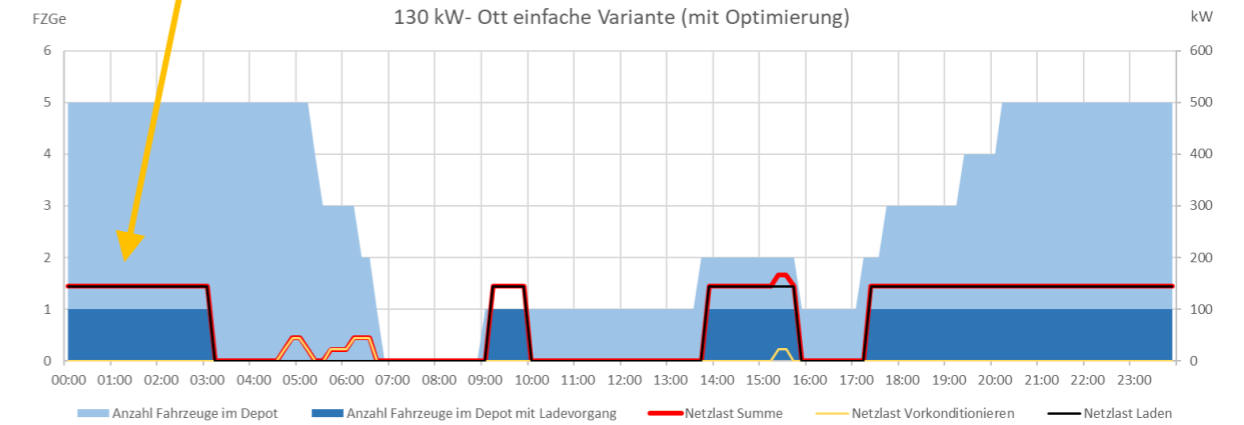
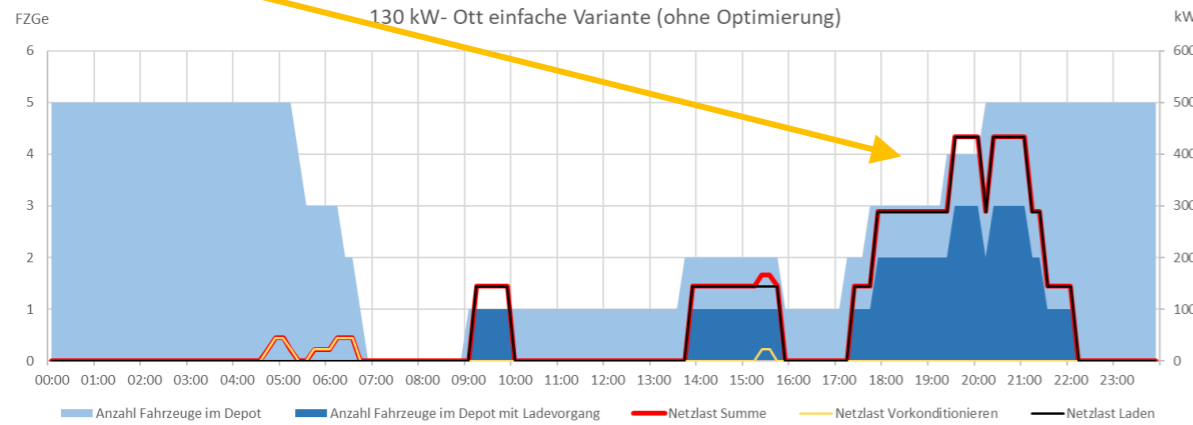


Ott Lastgangübersicht

PEAK 433 kW

- 67 %

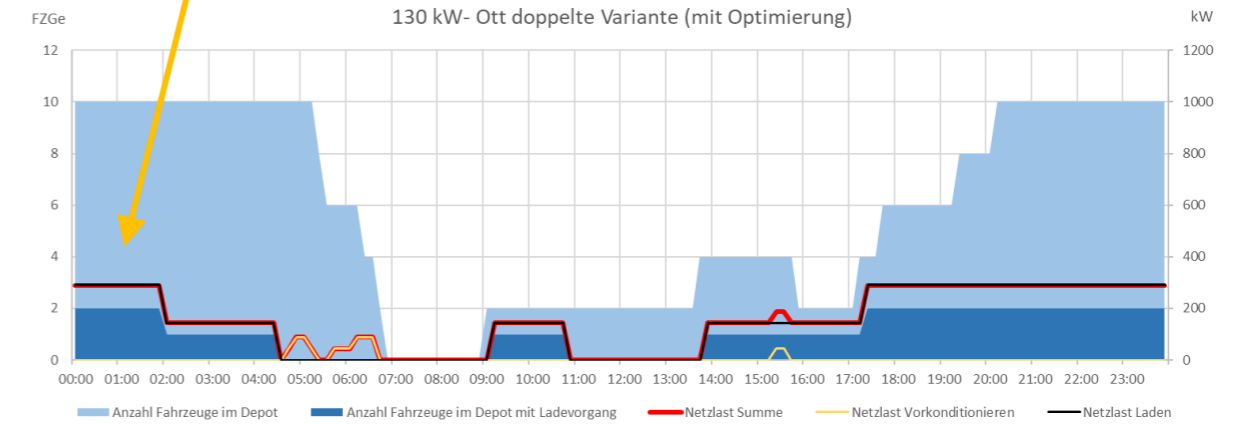
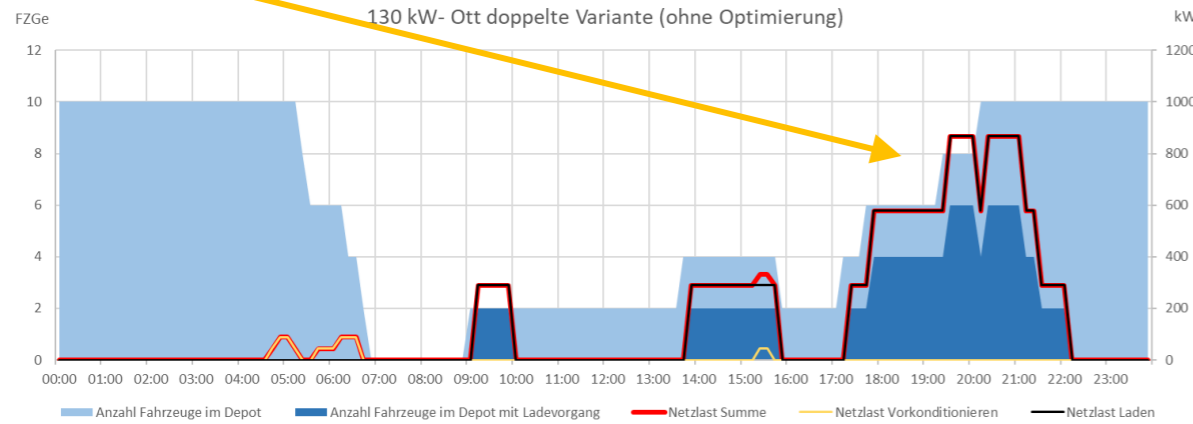
PEAK 144 kW



PEAK 867 kW

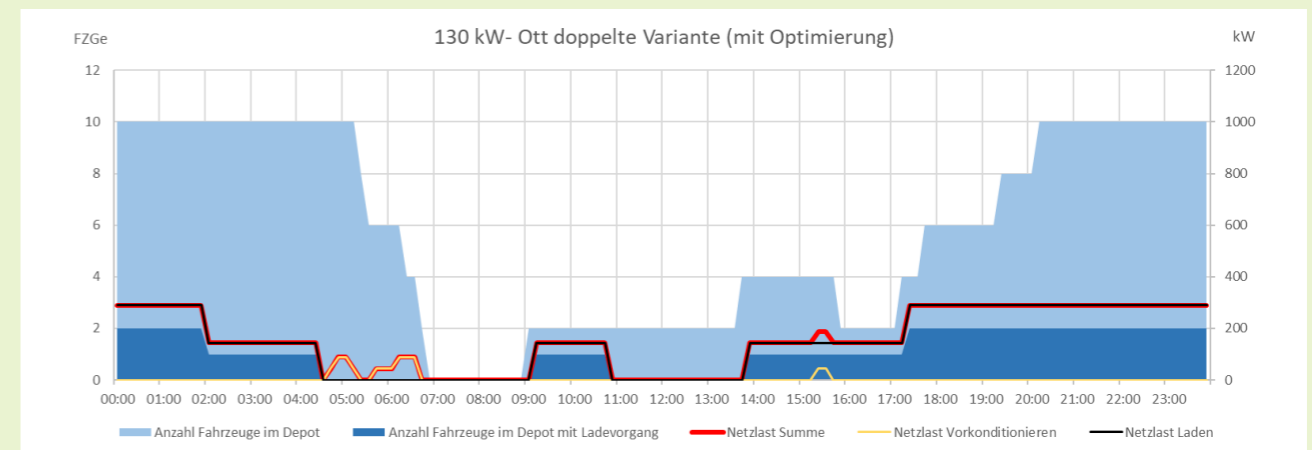
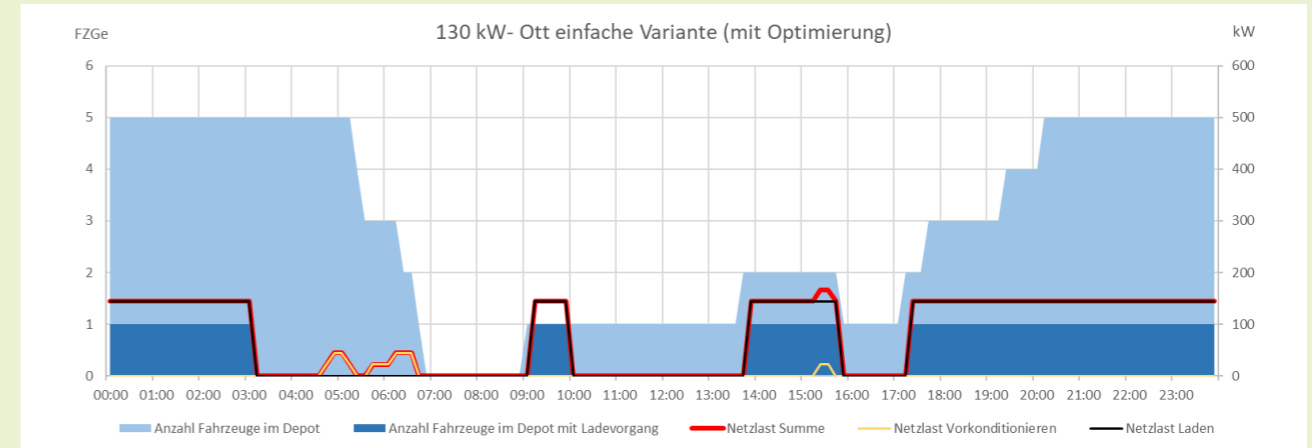
- 67 %

PEAK 289 kW



Ott Lastgang Besonderheiten

- Kein erhöhtes Optimierungspotential bei „doppelter“ Variante (Verdopplung des Lastganges)
- Einfache Variante optimiert: Max 1 Fahrzeug gleichzeitig am Laden
- Doppelte Variante optimiert: Max 2 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Vor und nach Optimierung 5 Busse erforderlich (einfache Variante)

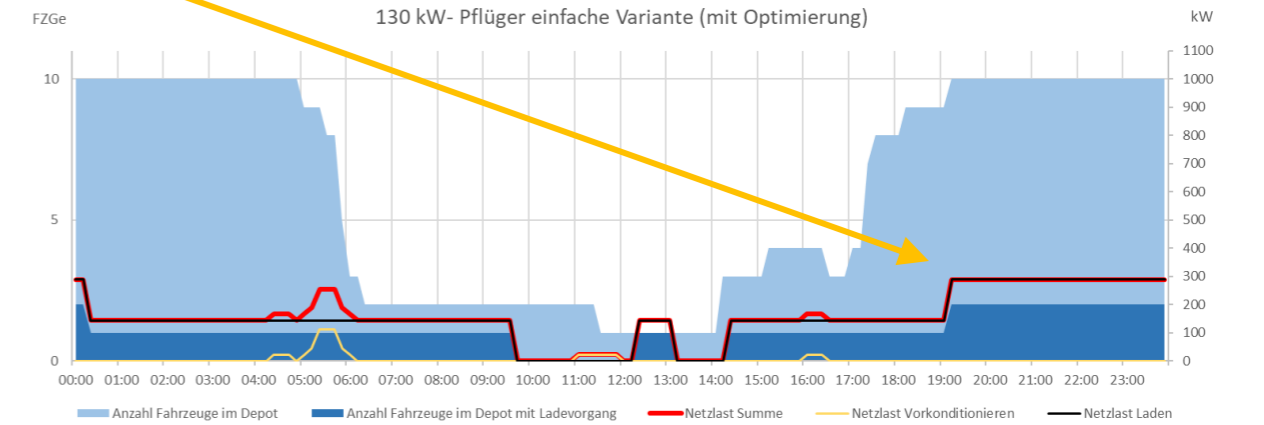
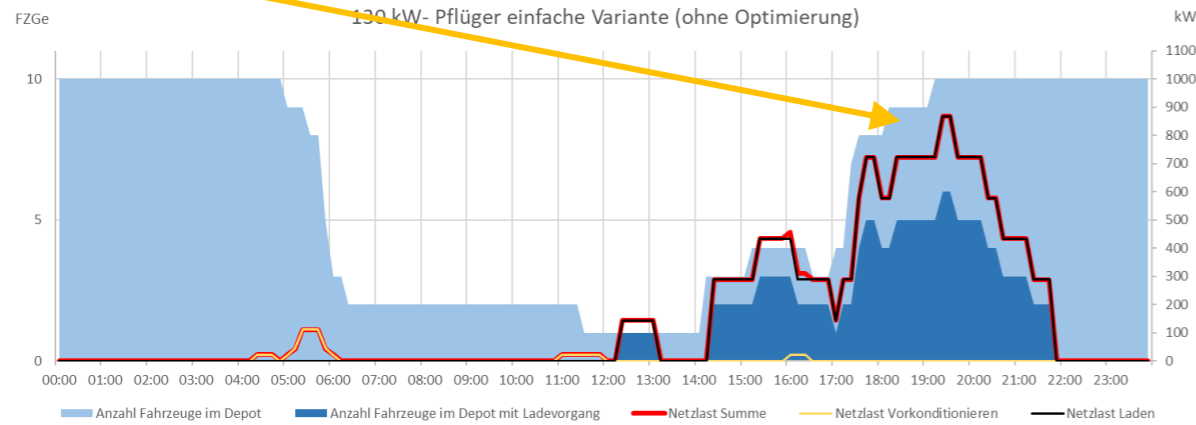


Pflüger Lastgangübersicht

PEAK 867 kW

- 67 %

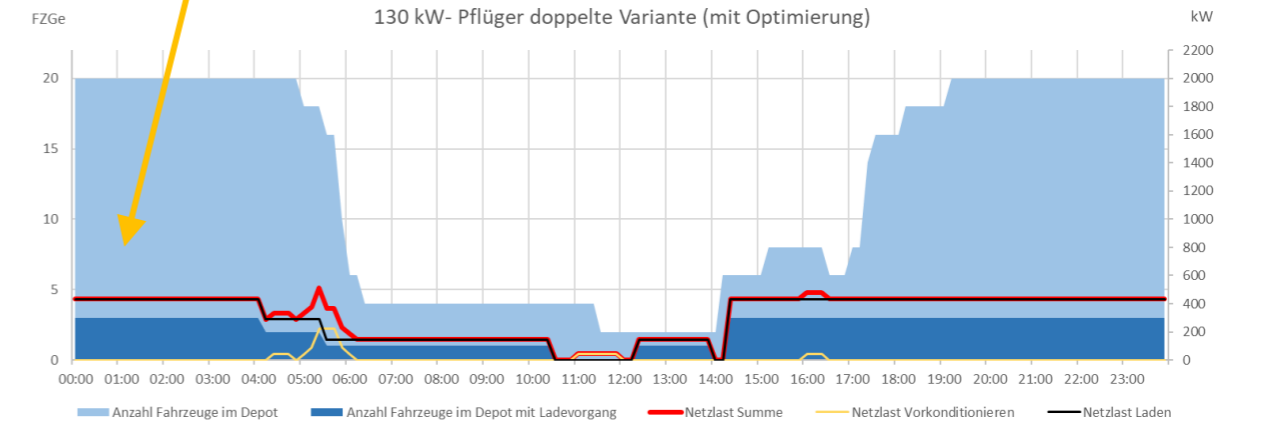
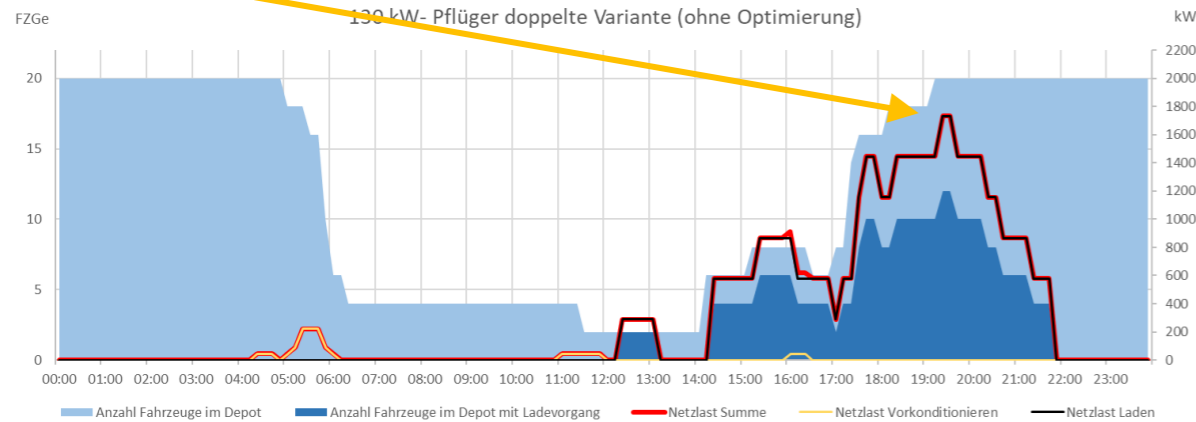
PEAK 289 kW



PEAK 1733 kW

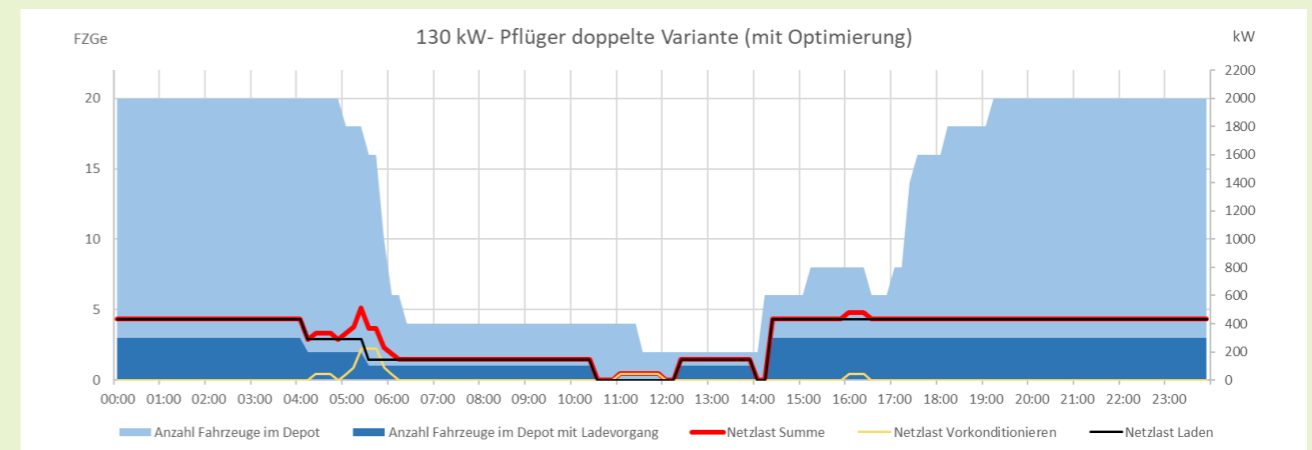
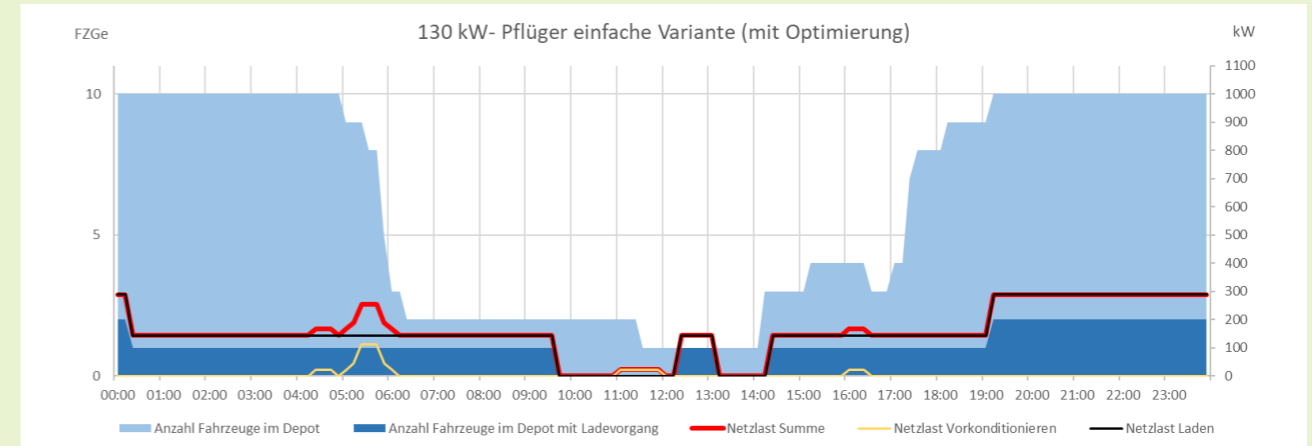
- 75 %

PEAK 433 kW



Pflüger Lastgang Besonderheiten

- Einfache Variante optimiert:
Max 2 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Doppelte Variante optimiert:
Max 3 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Vor und nach Optimierung 10 Busse erforderlich (einfache Variante)

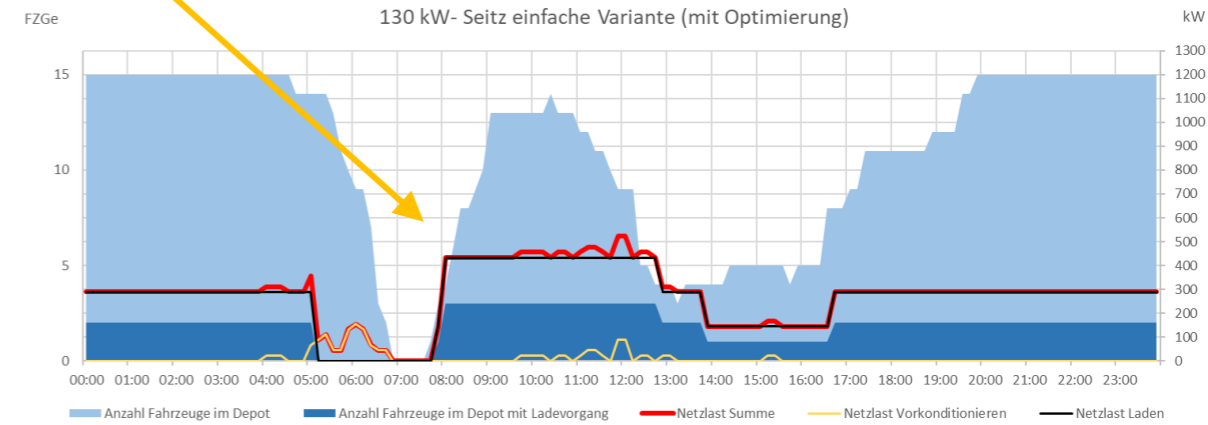
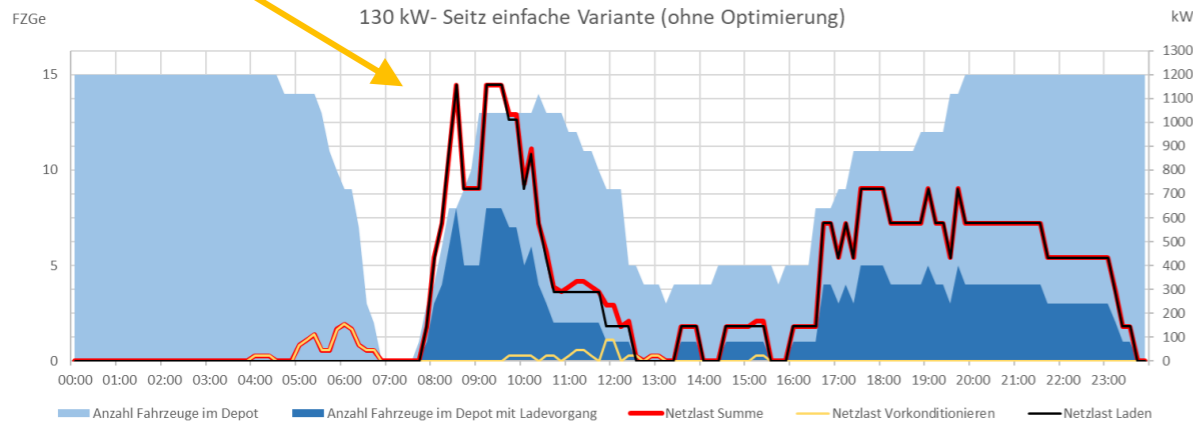


Seitz Lastgangübersicht

PEAK 1156 kW

- 63 %

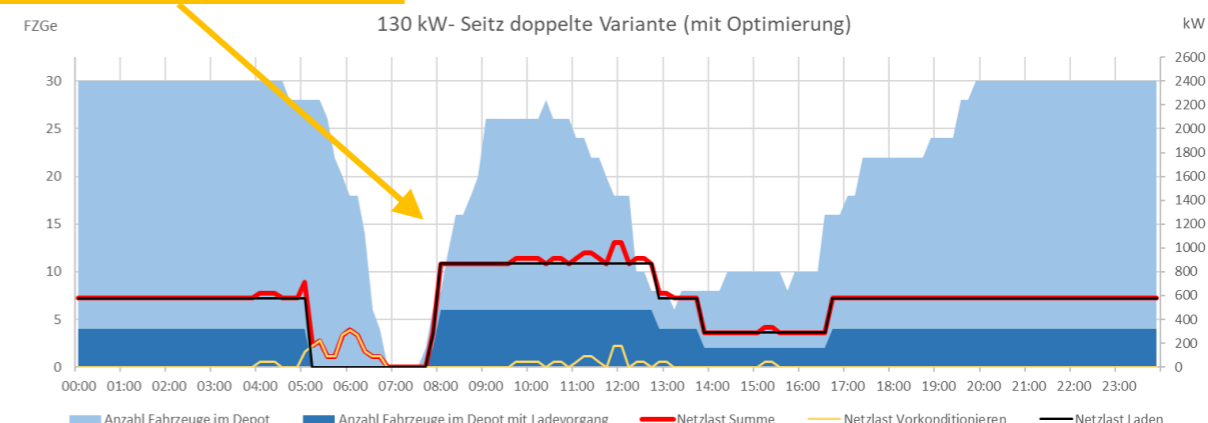
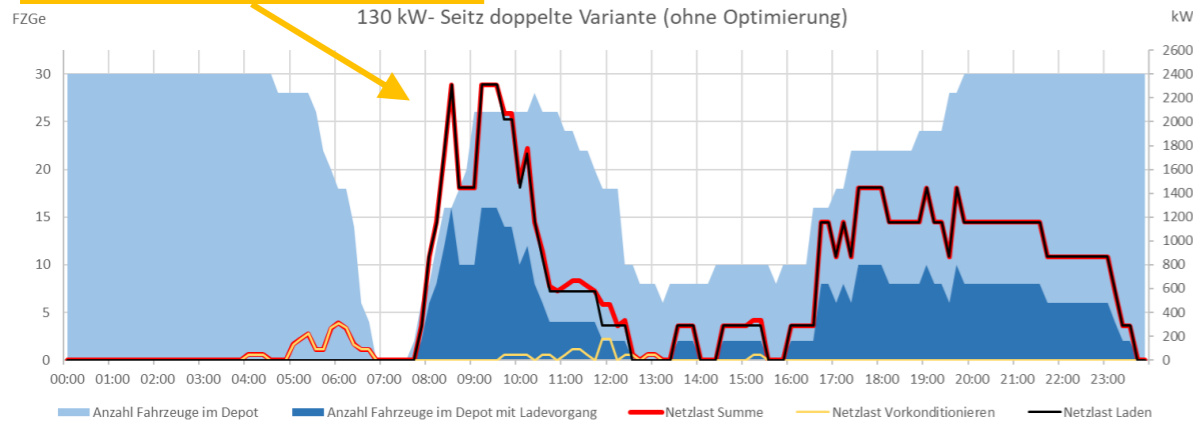
PEAK 433 kW



PEAK 2311 kW

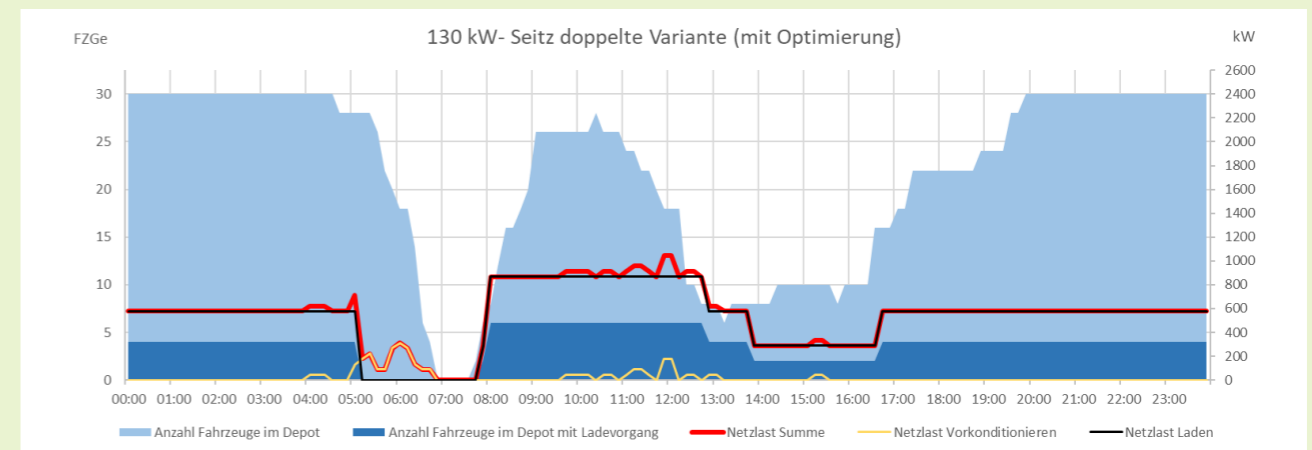
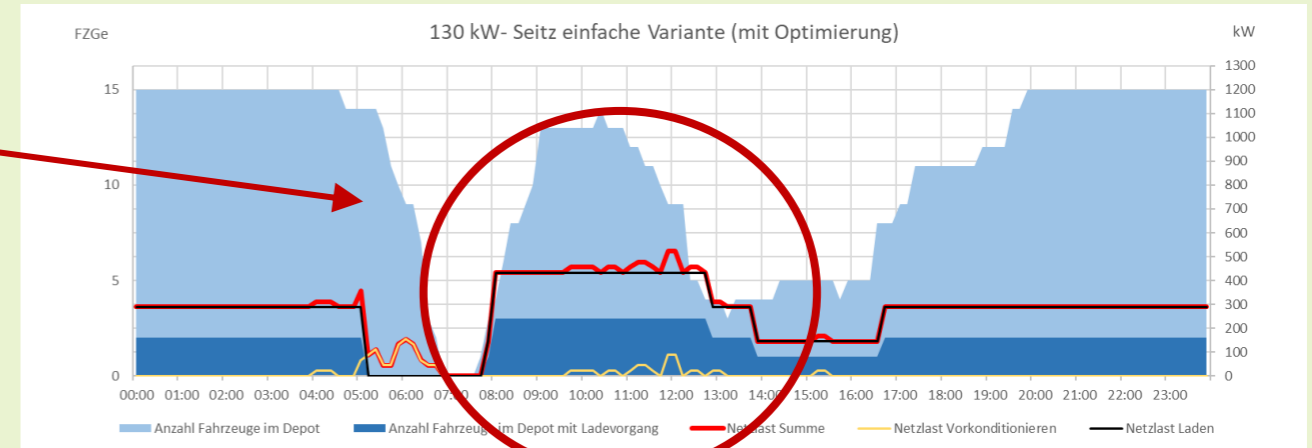
- 63 %

PEAK 867 kW



Seitz Lastgang Besonderheiten

- Lastspitze wird am Tag (Zwischenladen im Depot) ausgelöst
- Kein erhöhtes Optimierungspotential bei „doppelter“ Variante
- Einfache Variante optimiert:
Max 3 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Doppelte Variante optimiert:
Max 6 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Vor und nach Optimierung 15 Busse erforderlich (einfache Variante)

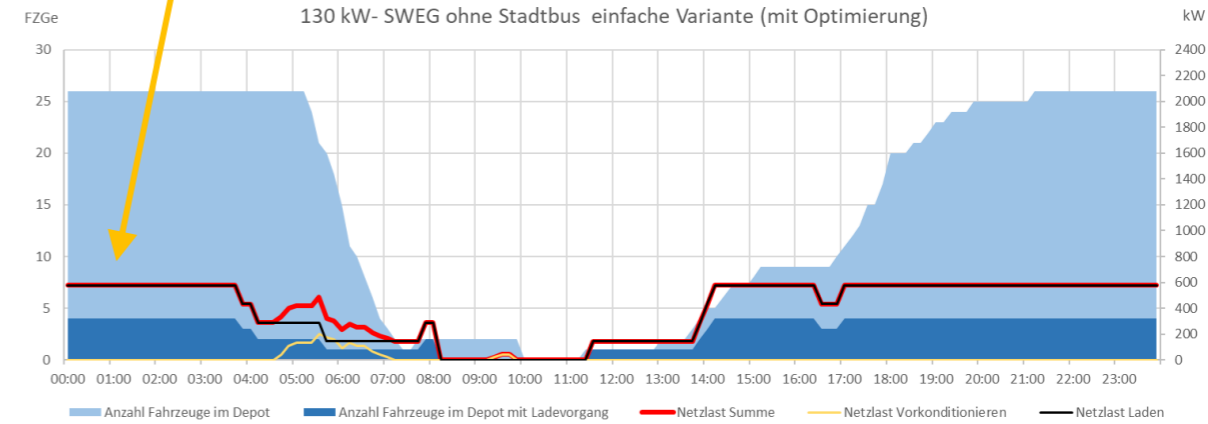
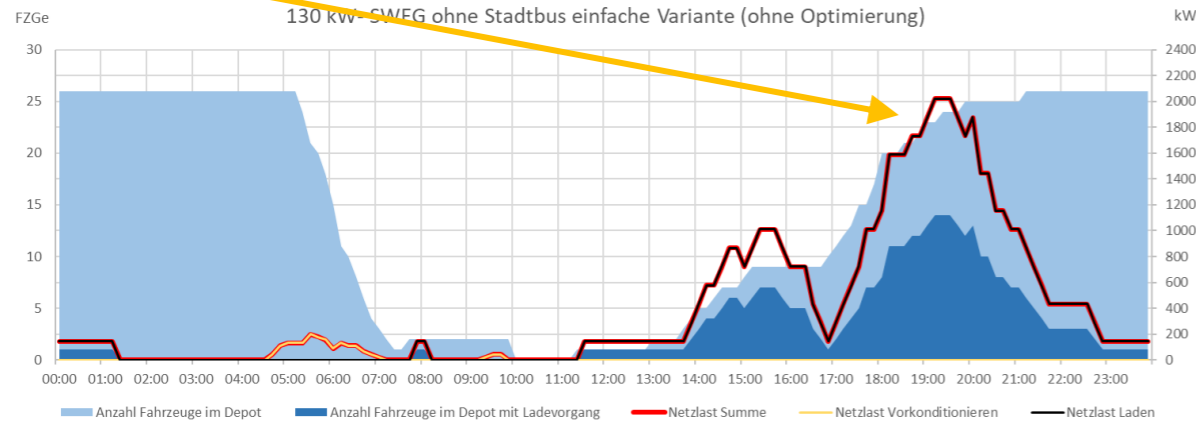


SWEG (ohne Stadtbus) Lastgangübersicht

PEAK 2022 kW

- 71 %

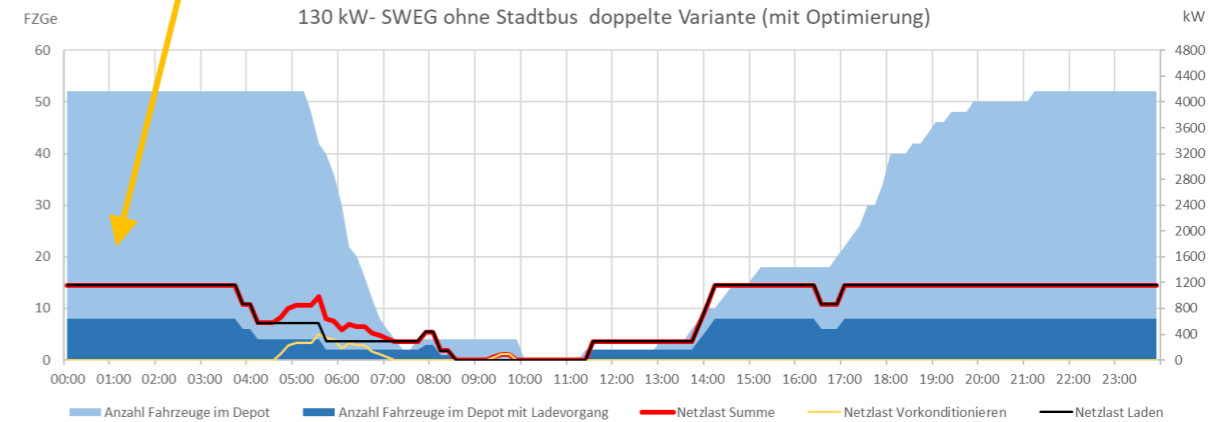
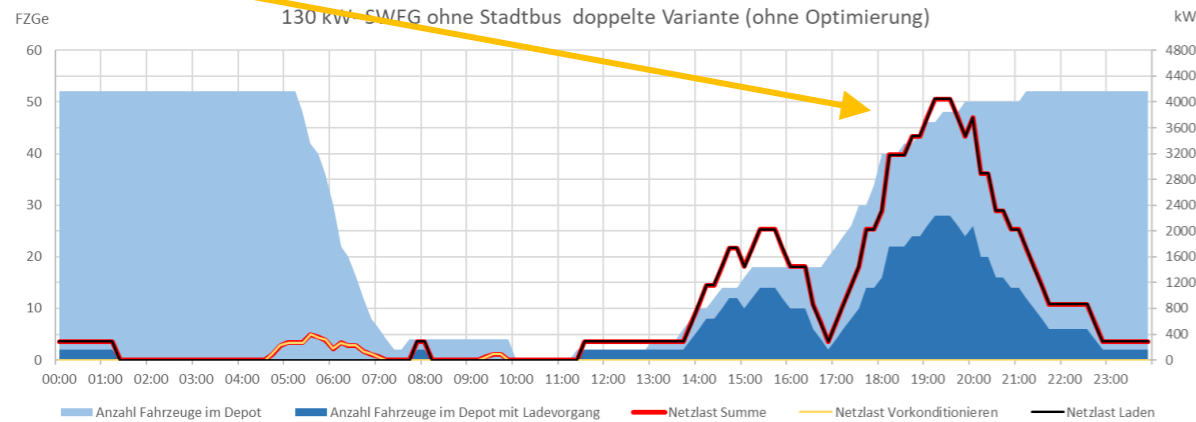
PEAK 578 kW



PEAK 4044 kW

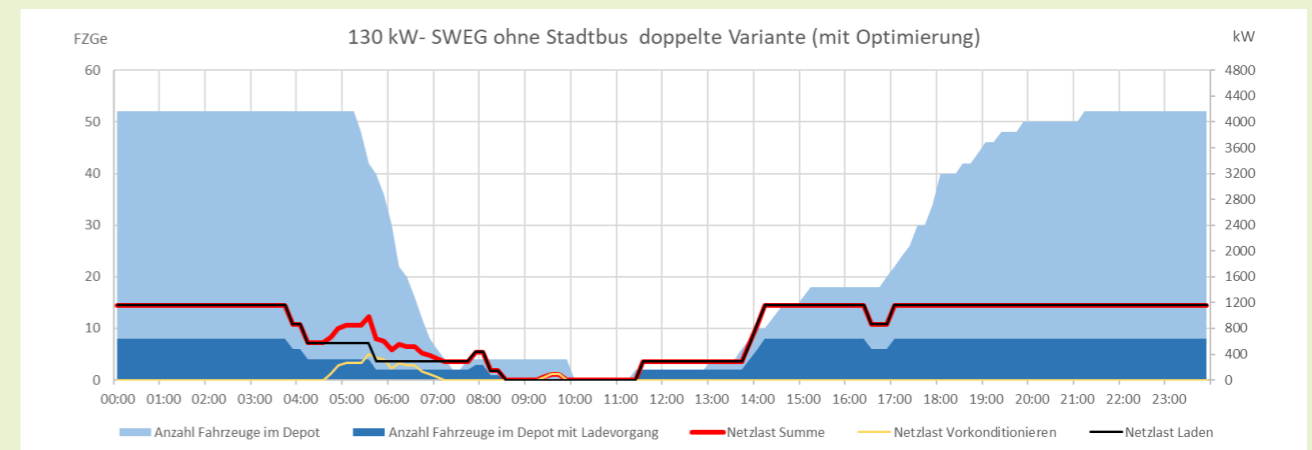
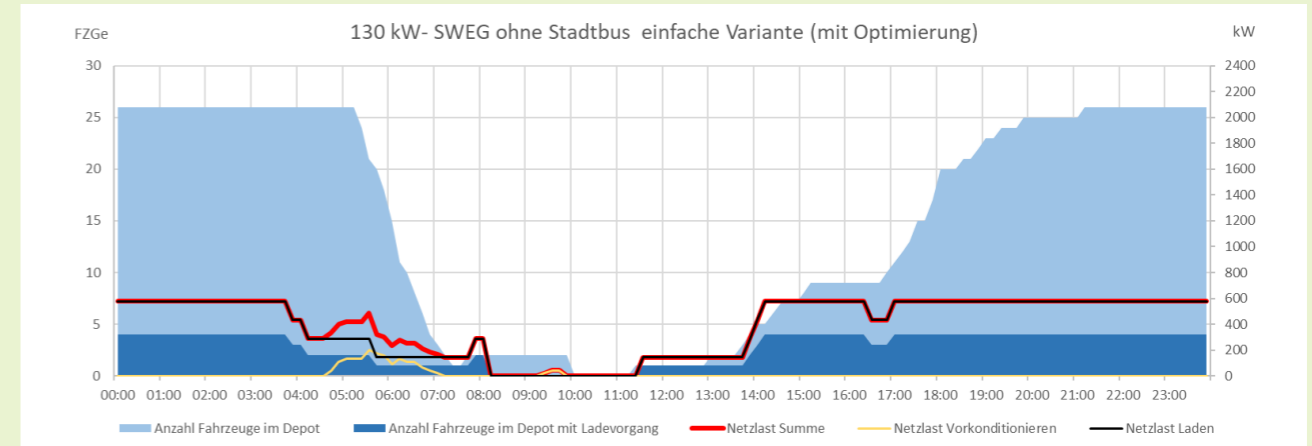
- 71 %

PEAK 1157 kW



SWEG Lastgang Besonderheiten

- Kein erhöhtes Optimierungspotential bei „doppelter“ Variante
- Einfache Variante optimiert: Max 4 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Doppelte Variante optimiert: Max 8 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Nach Optimierung 26 Busse erforderlich (einfache Variante)
- ➔ Mehrbedarf (+1 Fahrzeug) wegen Zwischenladen im Depot

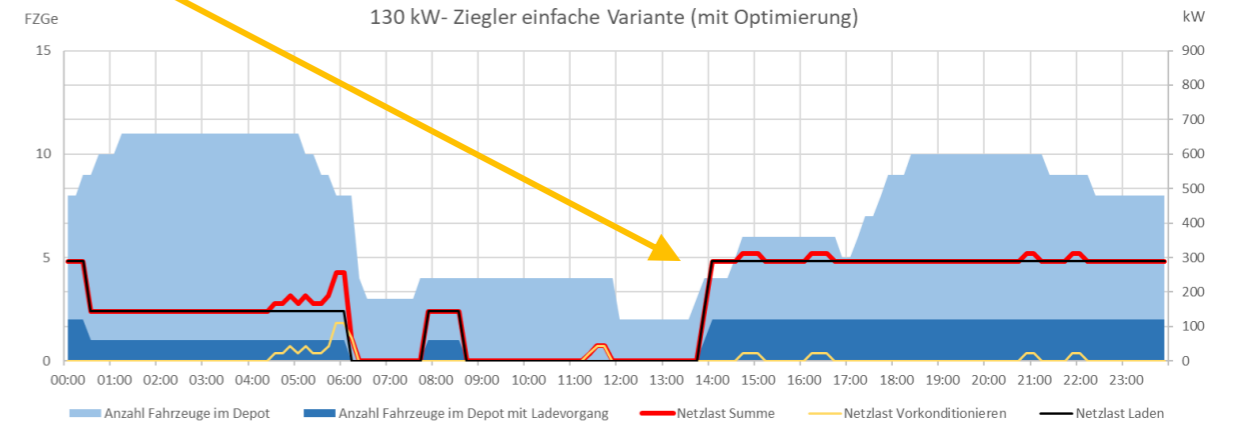
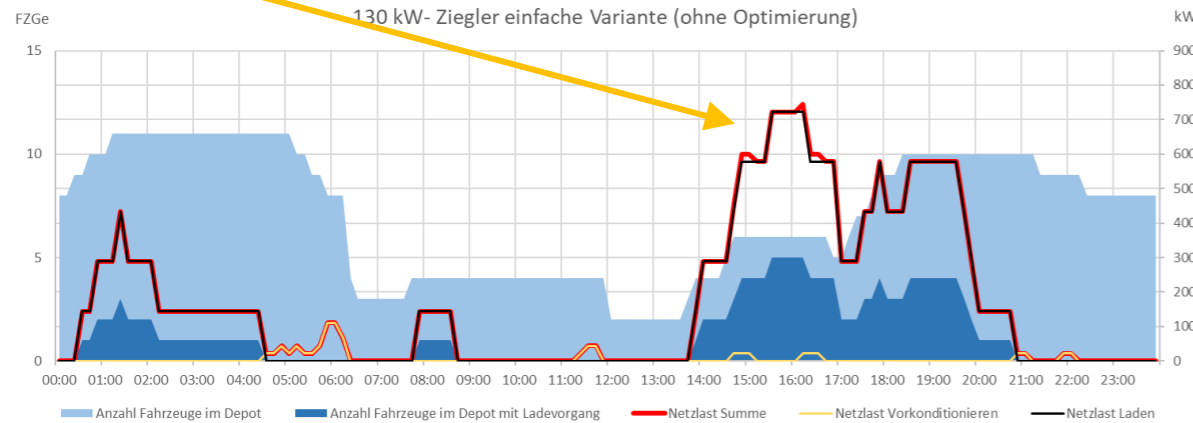


Ziegler Lastgangübersicht

PEAK 722 kW

- 60 %

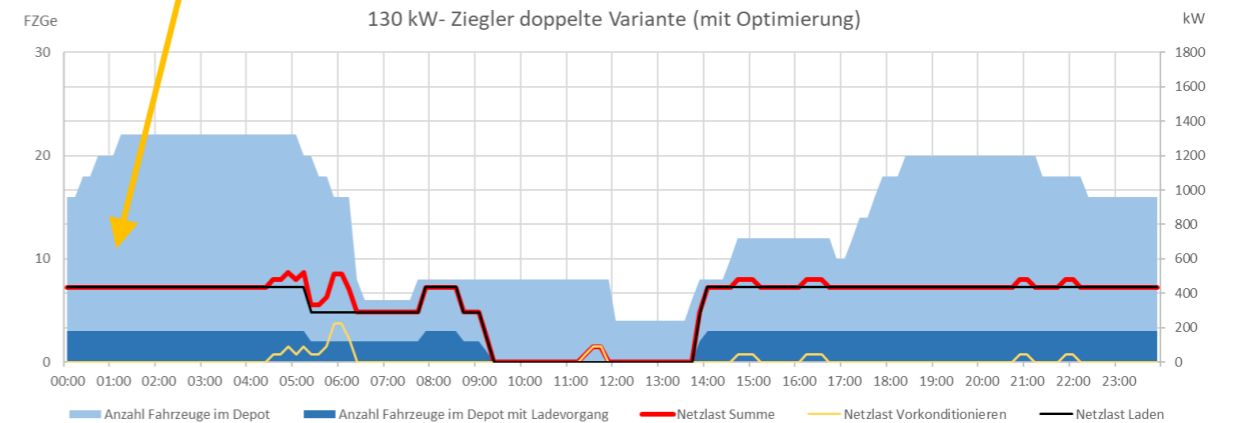
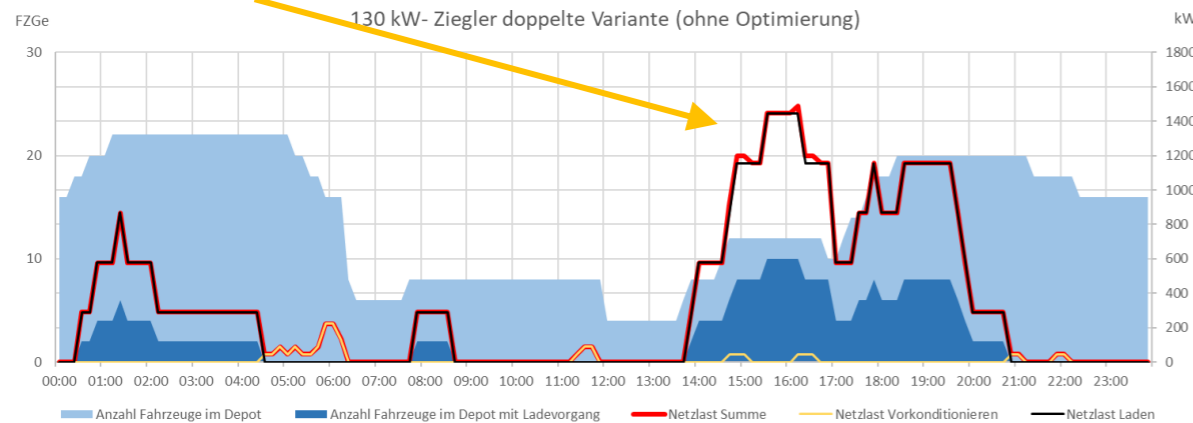
PEAK 289 kW



PEAK 1444 kW

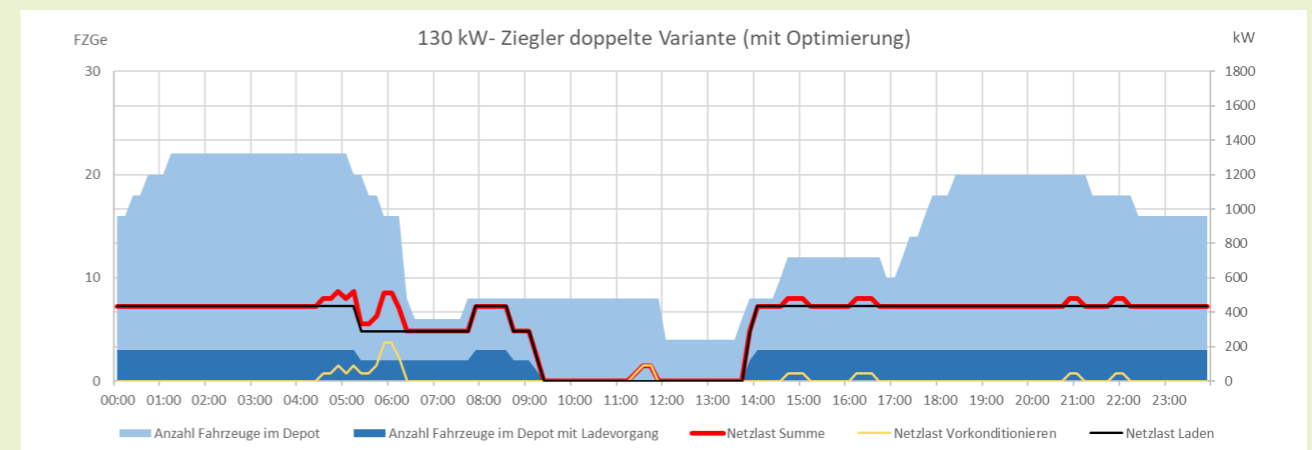
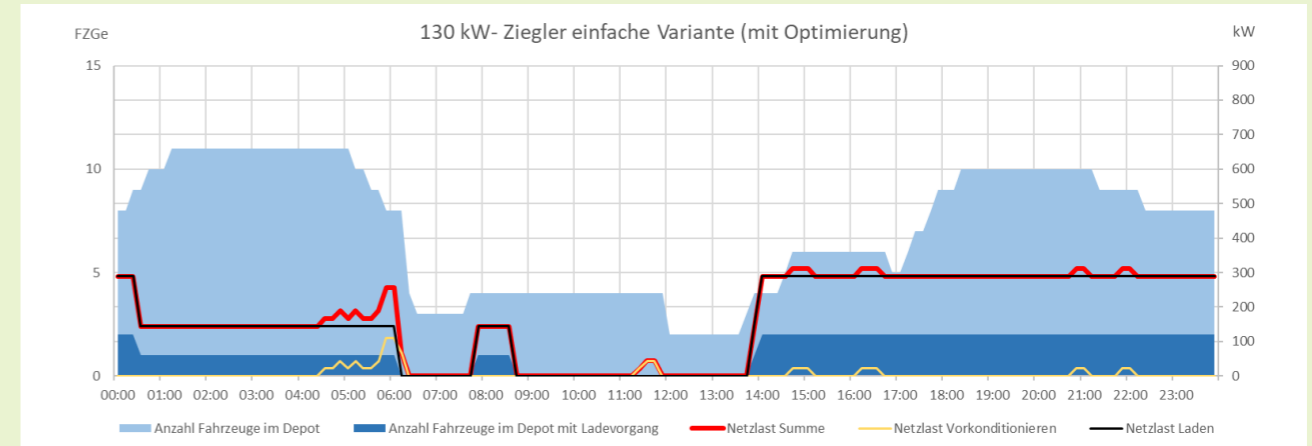
- 70 %

PEAK 433 kW



Ziegler Lastgang Besonderheiten

- Einfache Variante optimiert:
Max 2 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Doppelte Variante optimiert:
Max 3 Fahrzeuge gleichzeitig am Laden
- Nach Optimierung 11 Busse erforderlich
(einfache Variante)
- ➔ Mehrbedarf (+2 Fahrzeuge) wegen
Zwischenladen im Depot

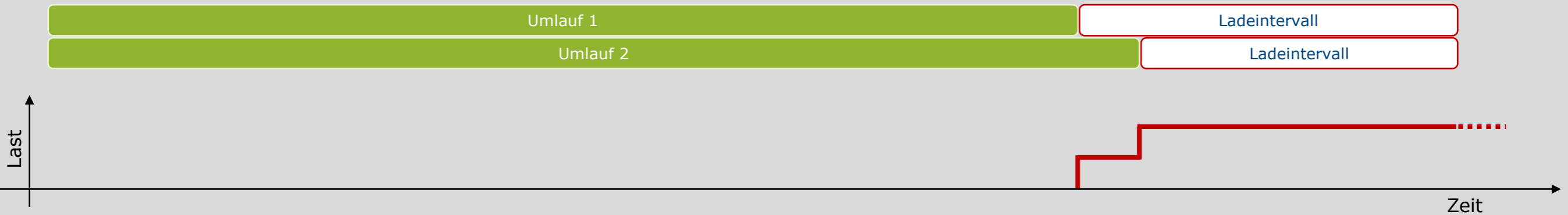


Zusammenfassung Lastgangoptimierung

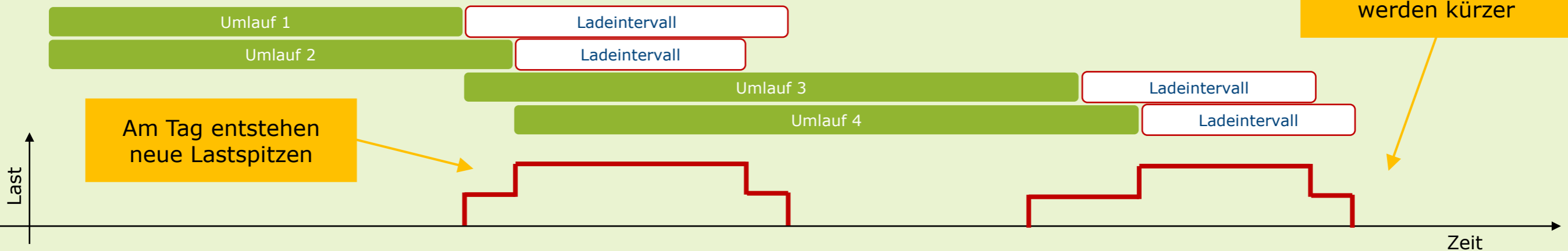
	Einfache Variante				Doppelte Variante			
Betreiber	Lastspitze vor Optimierung	Lastspitze nach Optimierung	Max. Anzahl Fzg. am Laden	Reduktion in Prozent	Lastspitze vor Optimierung	Lastspitze nach Optimierung	Max. Anzahl Fzg. am Laden	Reduktion in Prozent
BEV	289 kW	144 kW	1	- 50 %	578 kW	144 kW	1	- 75 %
Ehrlich	867 kW	289 kW	2	- 67 %	1734 kW	578 kW	4	- 67 %
Eisenhauer	1.300 kW	578 kW	4	- 56 %	2.600 kW	1.011 kW	7	- 61 %
Hettinger	433 kW	144 kW	1	- 67 %	867 kW	289 kW	2	- 67 %
Lillig	289 kW	144 kW	1	- 50 %	578 kW	144 kW	1	- 75 %
Nitschke	578 kW	144 kW	1	- 75 %	1.156 kW	289 kW	2	- 75 %
Ott	433 kW	144 kW	1	- 67 %	867 kW	289 kW	2	- 67 %
Pflüger	867 kW	289 kW	2	- 67 %	1.733 kW	433 kW	3	- 75 %
Seitz	1.156 kW	433 kW	3	- 63 %	2.311 kW	867 kW	6	- 63 %
SWEG ohne Stadtbus	2.022 kW	578 kW	4	- 71 %	4.044 kW	1157 kW	8	- 71 %
Ziegler	722 kW	289 kW	2	- 60 %	1.444 kW	433 kW	3	- 70 %

Lastgänge werden durch „Umlaufbrechen“ beeinflusst!

Lastgang ohne „Umlaufbrechen“



Lastgang mit „Umlaufbrechen“



Dimension der Wasserstoff-Versorgung

- Mindestens 3 Tankstellen (≈ 35 Busse pro Tankstelle)
- Tankvorgang ca. 10 min plus Regenerationszeit $\approx 10-15$ min pro Bus
- Belegung pro Tankstelle etwa $35 \text{ Busse} \times 10-15 \text{ min} = 5,8 - 8,75 \text{ h (!)}$
- ➔ Mindestens 2 Zapfstellen pro Tankstelle
 - $< 4,5 \text{ h}$ Belegungszeit pro Tag
 - Ausfallsicherheit
- Ein **betriebsübergreifendes** Tankmanagement ist zwingend erforderlich
 - Alle Busse müssen nachts nachgetankt werden
(ca. 6 - 8 Zeitslot vs. 3 - 4,5 h Belegung pro Nacht und Zapfstelle)
 - Zusätzlich ggf. „Zwischentanken“ am Tag

Bild: ESWE Verkehr

Dimension der Wasserstoff-Versorgung

- Wasserstoffbedarf Gesamtflotte VGMT inkl. Zwischentanken am Tag
 - Wochentag Jahresmittel: ca. 2.210 kg
 - Wochentag „Worst Case“: ca. 2.320 kg
- Bezug per Trailer-Anlieferung (aktuell ca. 500 kg per Trailer)
 - Etwa 4 bis 5 Trailer **jeden Wochentag** (1 bis 2 Trailer pro Tankstelle!)
- Bezug durch Eigenerzeugung
 - Elektrolyse mit grünem Strom
 - Zwei bis dreifache Strommenge erforderlich als für E-Bus Flotte
 - Anlagenkosten für Elektrolyseur pro Tankstelle

Inhalt

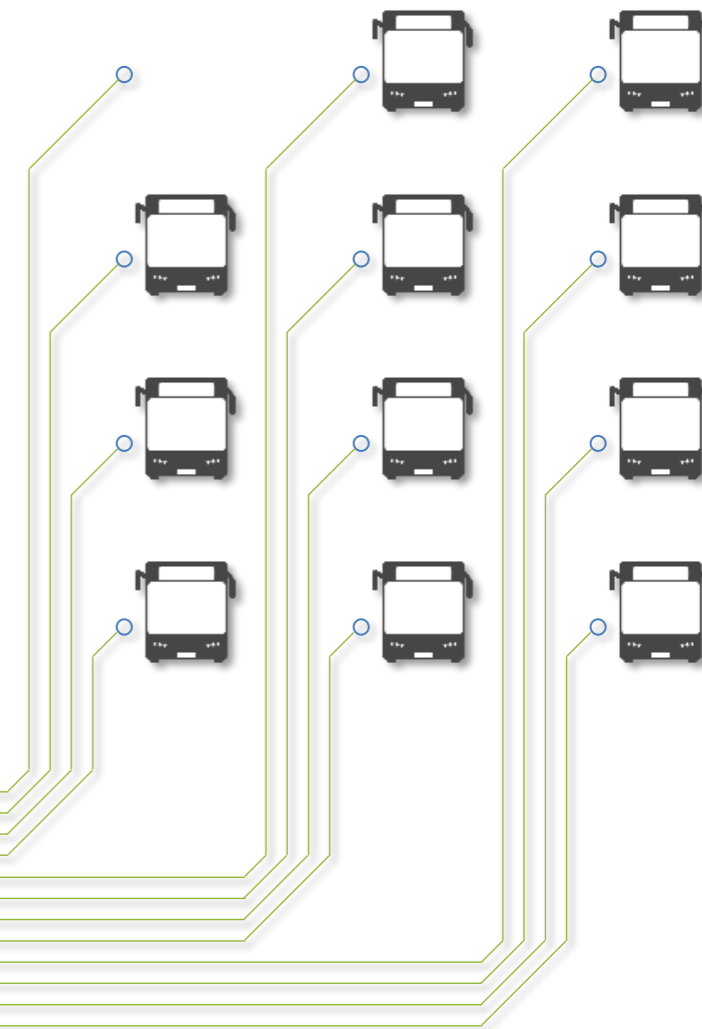
AP 2: Rahmenbedingungen und Grundlagen

AP 3: Bewertung saubere Antriebe

AP 4: Bewertung emissionsfreie Antriebe

AP 5: Kostenübersicht Vorzugstechnologie

AP 6: Handlungsempfehlung



Kostenannahme Elektrobus mit Depotladung

Kostenannahmen	
Thema	Kosten
Baukostenzuschuss pro kVA	90 €
Transformator Grundkosten	40.000 €
Transformator pro kVA	60 €
LIS optimiert pro Fzg.	40.000 €
LIS ohne Optimierung pro Fzg.	70.000 €
Fahrzeugmehrkosten E-Solobus	340.000 €
Fahrzeugmehrkosten H2-Solobus	360.000 €

- Netzbetreiber verlangt Baukostenzuschuss für Stromanschluss (Netzausbaukosten)
- Kosten für Transformatorstation sind vornehmlich durch Grundkosten für Gebäude, Schaltanlage etc. bestimmt
- Ladeinfrastruktur ohne Optimierung: 150 kW Einzel-Ladestation
- Ladeinfrastruktur optimiert: Mehrfach-Ladeinfrastruktur mit Verschaltung
- Bauarbeiten sind grob abgeschätzt

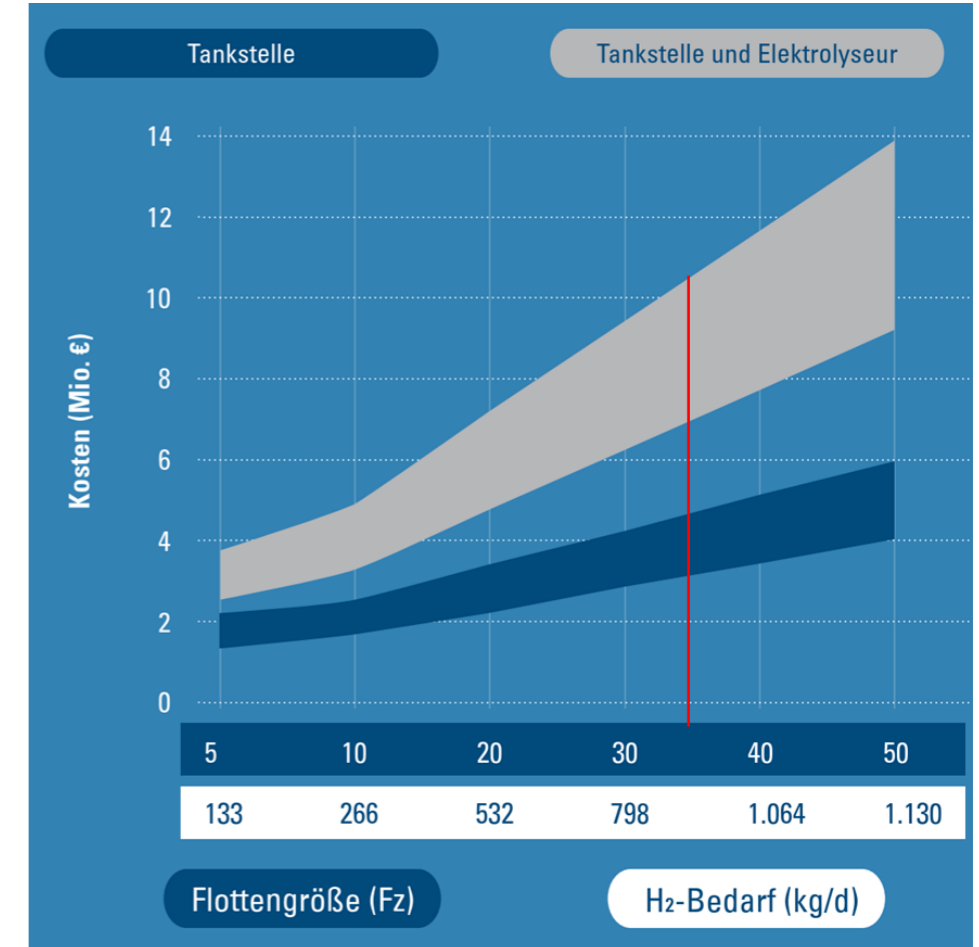
Kostenübersicht Elektrobus mit Depotladung

Betreiber	Anzahl Fahrzeuge	Fahrzeugmehrkosten	Stromanschluss + Transformator	Bauarbeiten	Ladeinfrastruktur 1:1	Ladeinfrastruktur optimiert
BEV	3	1.020.000 €	73.000 €	50.000 €	210.000 €	120.000 €
Ehrlich	9	3.060.000 €	106.000 €	100.000 €	630.000 €	360.000 €
Eisenhauer	14	4.760.000 €	171.000 €	150.000 €	980.000 €	560.000 €
Hettinger	3	1.020.000 €	73.000 €	50.000 €	210.000 €	120.000 €
Lillig	4	1.360.000 €	73.000 €	50.000 €	280.000 €	160.000 €
Nitschke	5	1.700.000 €	73.000 €	50.000 €	350.000 €	200.000 €
Ott	5	1.700.000 €	73.000 €	50.000 €	350.000 €	200.000 €
Pflüger	10	3.400.000 €	106.000 €	100.000 €	700.000 €	400.000 €
Seitz	15	5.100.000 €	138.000 €	150.000 €	1.050.000 €	600.000 €
SWEG ohne Stadtbus	26	8.840.000 €	171.000 €	250.000 €	1.820.000 €	1.040.000 €
Ziegler	11	3.740.000 €	106.000 €	100.000 €	770.000 €	440.000 €

Fahrzeugmehrkosten: 35.700.000 € LIS ohne Optimierung: 9.613.000 € mit Optimierung: 6.463.000 €

Kostenübersicht Brennstoffzellenbus

Betreiber	Anzahl Fahrzeuge	Fahrzeugmehrkosten	Bauarbeiten	Wasserstoff-Tankstelle
BEV	3	1.080.000 €	?	?
Ehrlich	9	3.240.000 €	?	?
Eisenhauer	14	5.040.000 €	?	?
Hettinger	3	1.080.000 €	?	?
Lillig	4	1.440.000 €	?	?
Nitschke	5	1.800.000 €	?	?
Ott	5	1.800.000 €	?	?
Pflüger	10	3.600.000 €	?	?
Seitz	15	5.400.000 €	?	?
SWEG ohne Stadtbus	26	9.360.000 €	?	?
Ziegler	11	3.960.000 €	?	?



Fahrzeugmehrkosten: 37.800.000 €

Typische Kosten einer H₂-Tankstelle

Kostenverteilung

- Investitionskosten fallen nicht auf einen Schlag an, sondern verteilt auf die nächsten x Jahre
- Typisch: Erneuerung von 10% der Busflotte pro Jahr, d.h. rund 10 Fahrzeuge pro Jahr
- CVD-Mindestquote: 45% bzw. 65%, d.h. 5 – 7 emissionsfreie Fahrzeuge pro Jahr
 - ➔ Ist von der Politik eine schnellere Umsetzung gewünscht?!
- ➔ Linienbündel können z.B. mit gestaffelter emissionsfreier Quote ausgeschrieben werden
- ➔ Investment beim Busbetreiber oder beim Aufgabenträger oder Pay-per-Use

Überschlagsberechnung für Gruppen à 5 Elektrobusse

- Einmalkosten (pro 5 Busse): $\approx 120.000 - 150.000 \text{ €}$
- Mehrkosten pro Solobus inkl. LIS (ggü. Dieselbus): $\approx 400.000 - 420.000 \text{ €}$

Pay-per-Use Finanzierungsmodell

- Ladeinfrastruktur wird von externen Partnern zur Verfügung gestellt
 - Auf dem Betreibergelände
 - Mit erforderlicher Hard- und Software
 - Inkl. Konzeption / Planung / Installation / Service
- Der Betreiber bezieht nur den Ladestrom
 - Mit langfristig festgelegte Konditionen
 - Ohne technisches Betriebsrisiko
- ➔ Statt Investitionskosten fallen nur Betriebskosten an



Pay-per-Use Key Facts

- Langfristige Vertragsgestaltung mit Mindestabnahmemenge
(Dauer \approx Lebensdauer Ladeinfrastruktur [15-20 Jahre])
- Vertraglich zugesicherte Verfügbarkeit
(Service vom Provider)
- Transparente und langfristige Kostengestaltung
- Erstellung Ladeinfrastrukturkonzept
 - Auf Basis detaillierter Untersuchungen
 - In direkter Abstimmung mit dem Nutzer



Pay-per-Use Vorteile für Aufgabenträger im ÖPNV

- Ladeinfrastruktur (LIS) kann vom Aufgabenträger beigestellt werden ohne die Investition erbringen zu müssen
- Die technische Ausführung der LIS und dem E-Bus System wird vom Aufgabenträger vorgegeben
 - Keine Abhängigkeit von den Lösungen der (marktbeherrschenden) Anbieter bei Linienkonzessionen
- Kleine regionale Anbieter können Linienkonzessionen übernehmen, ohne LIS aufzubauen
 - Anbieter müssen nur kompatible E-Busse aufweisen
- Konzessionslaufzeiten und LIS Lebensdauer werden entkoppelt
- Alle Anbieter zahlen dieselben Energiekosten ➔ bessere Vergleichbarkeit der Angebote

Inhalt

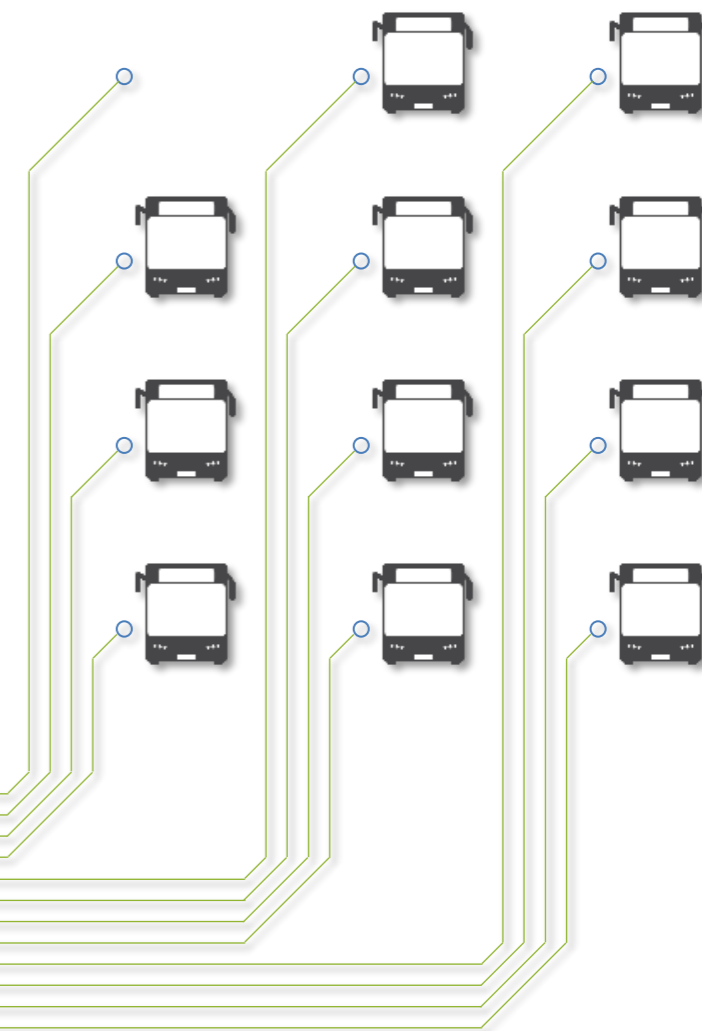
AP 2: Rahmenbedingungen und Grundlagen

AP 3: Bewertung saubere Antriebe

AP 4: Bewertung emissionsfreie Antriebe

AP 5: Kostenübersicht Vorzugstechnologie

AP 6: Handlungsempfehlung



Handlungsempfehlung

1

Umlaufanpassung prüfen

Grundvoraussetzungen für E-Busse und H₂-Busse optimieren

- Wiederholte Energiebedarfsprognose (Ergebnisse aktualisieren)
- Ggf. in mehreren Iterationen
- Geringer Aufwand aber starke Auswirkung auf Machbarkeit

2

Präferenz H₂-Bus festlegen

Ist die (umfassende) Investition in H₂-Technik eine Alternative im VGMT?

- Können die Investitionen gestemmt werden?
- Rechtfertigen die höheren Betriebskosten die einfachere Betriebsintegration?

Handlungsempfehlung

3

Technologie oder Technologiemix definieren

Typisch: E-Busse als Basis, H₂-Busse ggf. für „Härtefälle“

- Abhängig von Schritt 1) und 2)
- Wo sind die „Grenzen“ der E-Busse nach Umlaufoptimierung?
- Was ist im Detail günstiger: H₂ Technik oder Anpassung und Fzg.-Mehrbedarf (E-Bus)?

4

Handlungsbedarf zeitlich definieren

Wann sollen/müssen wie viele emissionsfreie Busse beschafft werden?

- Kurzfristig: E-Busse für unkritische Umläufe
- Langfristig: Abhängig von H₂ Präferenz (E-Bus mit Anpassung oder H₂-Bus)

Handlungsempfehlung

5

Schrittweisen Ausbau planen

Insbesondere Aufbau von Ladeinfrastruktur in sinnvollen Schrittweiten

- Kombination von Baumaßnahmen (Minimierung Beeinträchtigungen)
- Erweiterungsfähige Ladeinfrastruktur
- Baukonzept und Bauplanung

6

Fördermittel beantragen

Hohe Subventionen z.B. im aktuellen BMVI Förderprogramm verfügbar

- Förderprogramme sind stark nachgefragt
- Aktuell gilt: Große Projekte sind im Bewertungsprozess priorisiert

Kurzfristige Implementierung



- E-Busse können (fast) immer kurzfristig implementiert werden
 - Meistens sind kurze Umläufe vorhanden, die mit E-Bussen unproblematisch sind
- Der limitierende Faktor ist primär die Ladeinfrastruktur
- Einfache Ladesäulen können i.d.R gut in den Betriebshof integriert werden (bei kleinen Flotten)
- Ladesäulen sind als mobile Lösungen verfügbar
- Ladesäulen können mit geringem Aufwand versetzt werden
- Sehr gute schrittweise Einführung möglich mit überschaubaren Investitionen

Bild: Amsterdam Schiphol Airport

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

EEBC European Electrical Bus Company GmbH

Bessie-Coleman-Straße 7

60549 Frankfurt am Main

Telefon: + 49 (0) 69 - 68 60 23 60

Email: service@eebc.gmbh

Internet: www.eebc.gmbh

Persönlicher Kontakt



Jürgen Langwost

j.langwost@eebc.gmbh

+49 172 401 66 55



Thomas Mang

t.mang@eebc.gmbh

+49 171 240 83 05

© 2021 EEBC European Electrical Bus Company GmbH