

Erkenntnisse aus der Praxis - Betriebliche, ökologische und ökonomische Bewertung emissionsfreier Busse

Dr. Michael Faltenbacher
Koordinator

Abschlussposium
Begleitforschung Innovative Antriebe Bus

23. September 2021

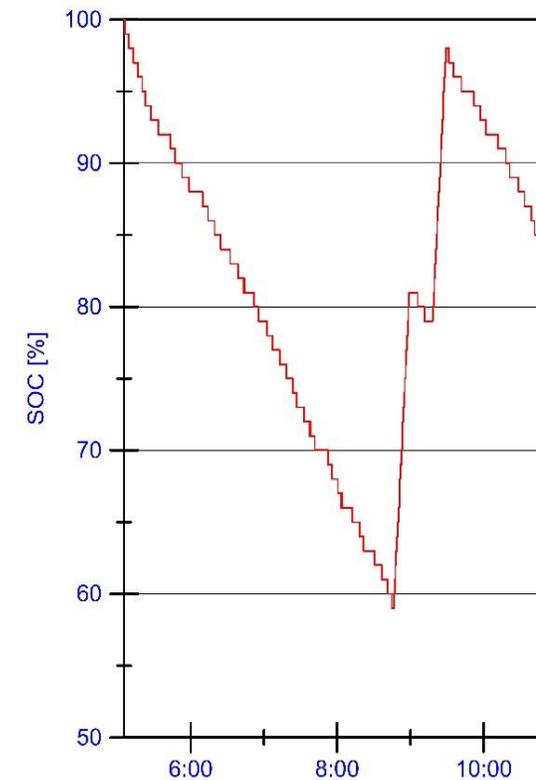
Quelle: Hagener
Straßenbahnen AG

Gefördert durch:

Koordiniert durch:

1. Überblick Begleitforschung Bus (BeFo Bus)

2. Status Einsatzreife E-Busse
3. Ökologische Bewertung
4. Ökonomische Bewertung
5. Zusammenfassung und Ausblick



Gefördert durch:



Koordiniert durch:



Begleitforschung Bus (BeFo Bus)

Überblick

Koordination: Sphera

6 Partner

Baut auf früheren Begleitforschungsaktivitäten/
Prüfprogramm für BMVI und BMU aus 2010-2016 auf



Laufzeit: 09/2018 – 09/2021



Bewertungskategorie	Bewertungskriterien
Praxistauglichkeit und Einsatzreife	Täglicher Einsatz (Laufleistung, Reichweite)
	Verfügbarkeit Fahrzeuge
	Verfügbarkeit Ladeinfrastruktur
	Einsatzreife/ Technology Readiness Level (TRL)
Effizienz	Energieverbrauch Fahrzeug
	Einfluss klimatischer Bedingungen
	Energieverbrauch Ladeinfrastruktur
Ökologie und Klimaschutz	Reduktion CO ₂
	Reduktion NO _x , Feinstaub/PM
	Sensitivitätsanalyse
Wirtschaftlichkeit	Lebenszykluskosten (TCO)
	Sensitivitätsanalyse

4 Bewertungskategorien

12 Evaluationskriterien

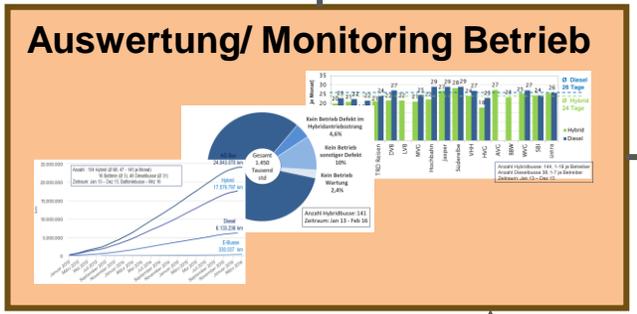
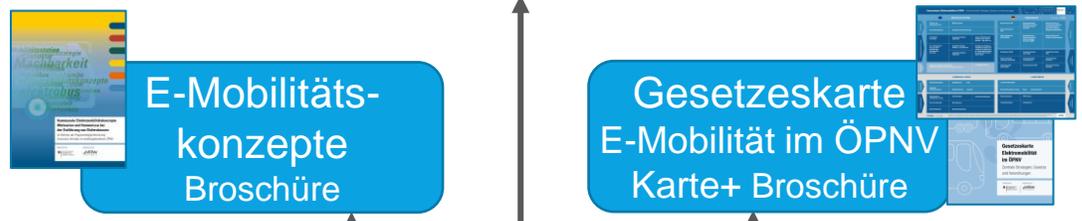
In vorangegangener AG Bus entwickelt und für die aktuelle Phase der BeFo Bus angepasst

BeFo Bus Überblick



Leitfaden zu E-Bussystemen + interaktive Entscheidungshilfe (Basis-/ Expertenversion)

- Erstinformation (Leitfaden + Basisversion)
- Entscheidungshilfe für Verkehrsunternehmen (Expertenversion)



Bewertung alternative Antriebe und zugehörige Infrastrukturen

- Technisch/ Betrieblich
- Wirtschaftlich
- Ökologisch

Spezifische Analysen:

- Techn. Weiterentwicklungen/ Marktpotenzial, Standardisierung Infrastruktur,

Detailberichte zur Technologiebewertung



Markt- + Förderübersicht Broschüren

Daten- und Informationssammlung

Stammdaten (einmalig)	Betriebsdaten (kontinuierlich)	Betreiberanforderungen (einmalig)	weitere Datenquellen (z.B. Mobilitätskonzepte, Sekundärdaten)
-----------------------	--------------------------------	-----------------------------------	---



AG Bus Treffen

Abschlussbericht Broschüre [in Vorbereitung]

Legende:



Verfügbar unter:
<https://starterset-elektromobilität.de/Bausteine/OEPNV/>

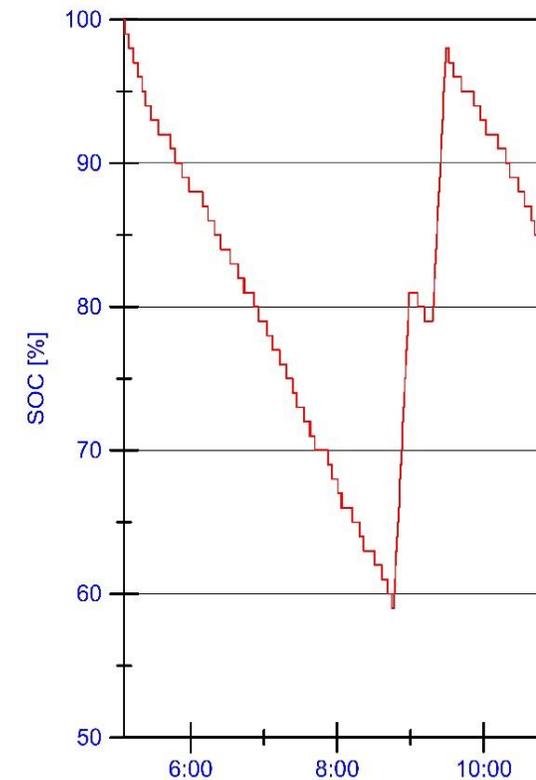
Gefördert durch:



Koordiniert durch:



1. Überblick Begleitforschung Bus (BeFo Bus)
2. Status Einsatzreife E-Busse
3. Ökologische Bewertung
4. Ökonomische Bewertung
5. Zusammenfassung und Ausblick



Gefördert durch:



Koordiniert durch:



Status Einsatzreife E-Busse

Datenbasis für Auswertungen



Einmalig erfasste Grunddaten

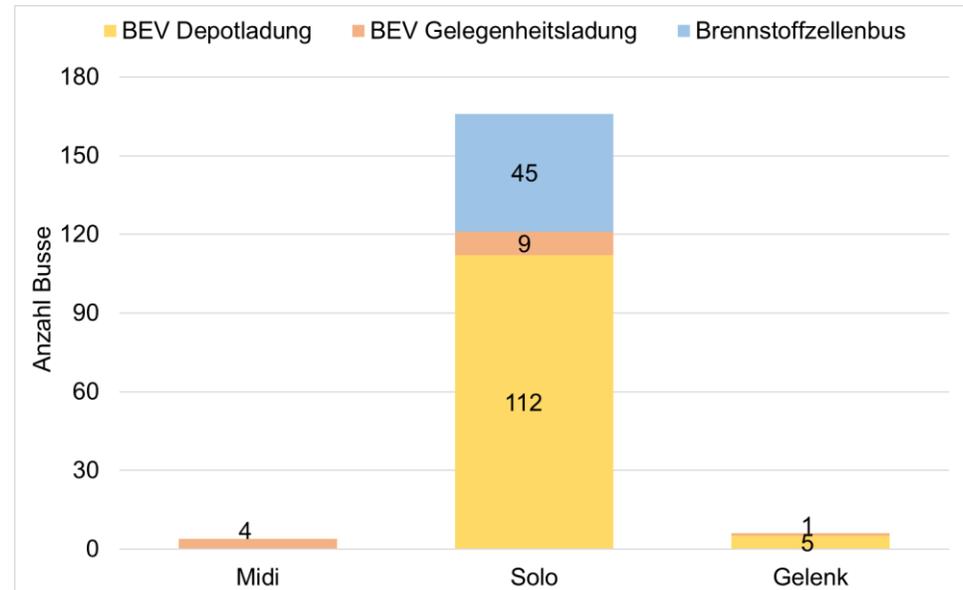
- Stammdaten zu Projekt
- Betreiberanforderungen

Kontinuierlich erfasste Betriebsdaten:

- 19 Verkehrsunternehmen
- 8 Bushersteller
- 176 Busse

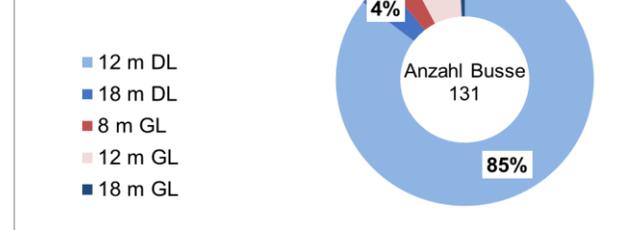
- Davon Midi: 4 (2%)
Solo: 166 (94%)
Gelenk: 6 (3%)
- Davon BEV: 131 (74%)
BZ: 45 (26%)

Erfassungszeitraum:
Jan 2019 – April 2021



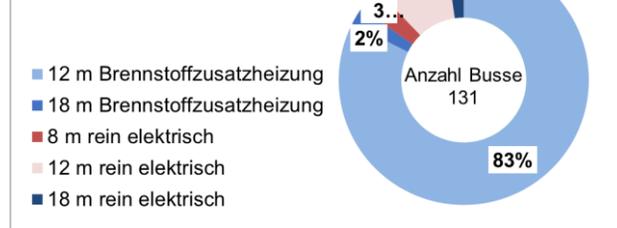
	Gesamt		BEV		BZ	
Midi	4	2%	4	3%		
Solo	166	94%	121	92%	45	100%
Gelenk	6	3%	6	5%		
Gesamt	176	100%	131	74%	45	26%

BEV BUSSE NACH GEFÄßGRÖßE UND LADEKONZEPT
N = 17



Depotladung 89%
Gelegenheitsladung 11%

ANZAHL BEV NACH GEFÄßGRÖßE UND HEIZKONZEPT
N = 17



Brennstoffzusatzheizung 85%
Rein elektrische Heizung 15%

Gefördert durch:

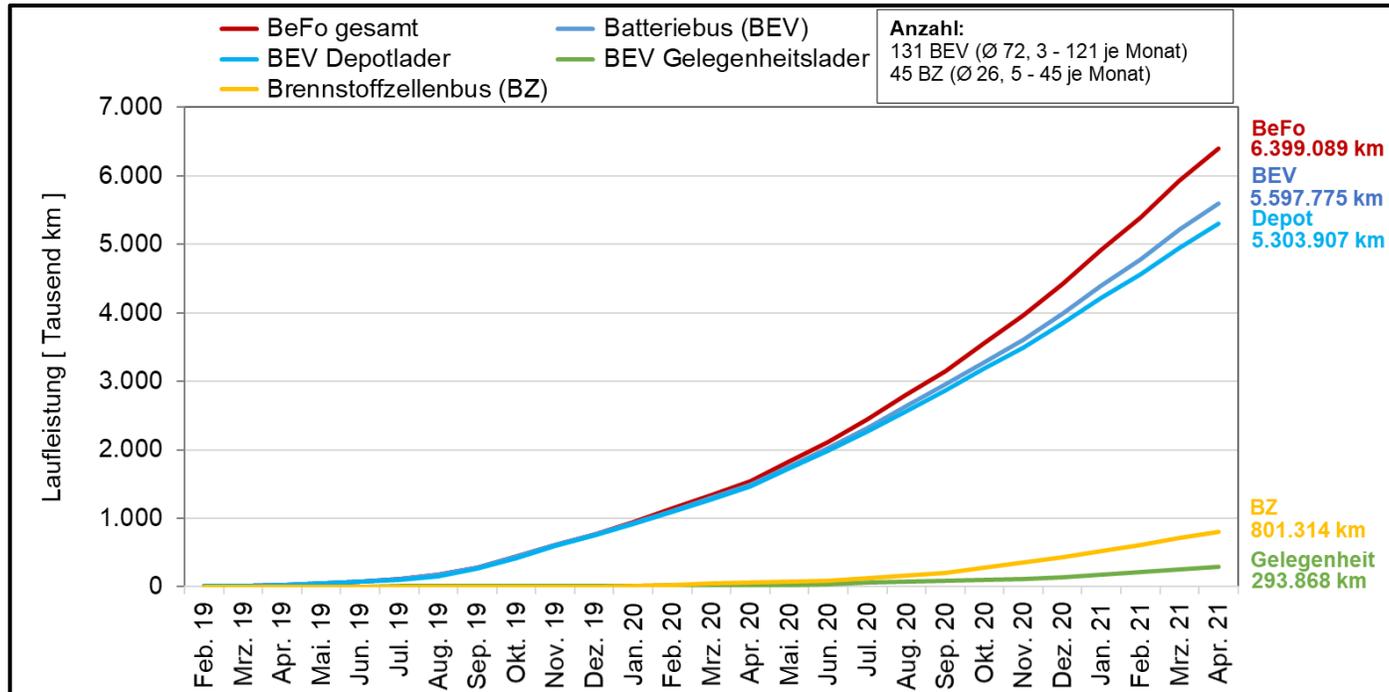


Koordiniert durch:



Status Einsatzreife E-Busse

Kumulierte Gesamtleistung



Erfasste Laufleistung in BeFo entspricht:

- 160 mal um die Erde
- 17 mal zum Mond

Wesentliche Verbreiterung der Datenbasis für BEV-Busse ggü. vorangegangener AG Bus (2013-2016)

- Anzahl Busse: Steigerung um Faktor ~8, Fahrleistung Faktor ~27
- 95% der erfassten Laufleistung mit Depotlader, 5 % mit Gelegenheitslader

Grundstein für Datenbasis BZ-Busse

(weiterer Anstieg auf Grund von anstehenden Inbetriebnahmen in 2021/22 erwartet)

Gefördert durch:

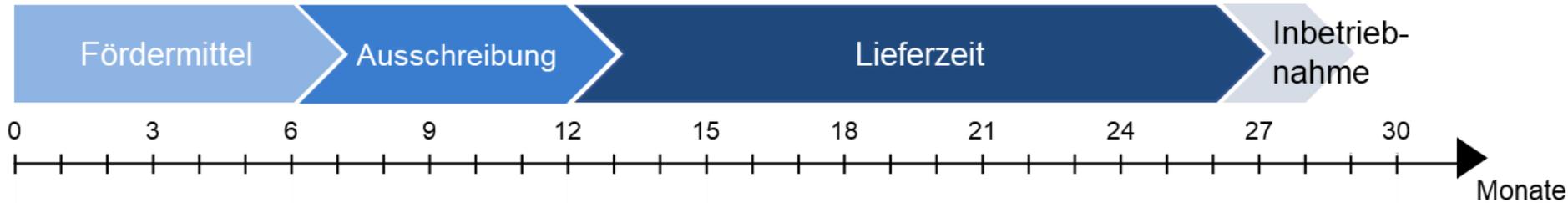


Koordiniert durch:



Status Einsatzreife E-Busse

Realisierungszeitleiste für Einführung emissionsfreier Busse



Beantragung und Bewilligung der Fördermittel ca. (3 –) 6 Monate

Für Ausschreibung von Erstellung Lastenhefte bis zur Vergabe ca. (4 –) 6 Monate, bei europaweiter Ausschreibung tendenziell länger (bis zu 8 Monate)

→ für komplette Beschaffung inkl. Fördermittelbeantragung und Ausschreibung ist Zeitraum von 9 – 14 Monaten einzurechnen.

Nach Vergabe zur Beschaffung bestimmt die Lieferzeit die weitere Dauer bis zur Inbetriebnahme. Derzeit Lieferzeiten für die Busse zwischen 9 und 14 Monaten, abhängig vom Lieferanten
Errichtung Lade-/Tankinfrastruktur: 12 - 24 Monate bzw. 18-24 Monate

Für Inbetriebnahme sind 2 Wochen bis 2 Monate einzuplanen.

→ Richtgröße für Umsetzungszeitraum: 18 – 28 Monate, stark abhängig von den Gegebenheiten vor Ort, Lieferzeit Lieferanten, Abnahmeregime VU etc.

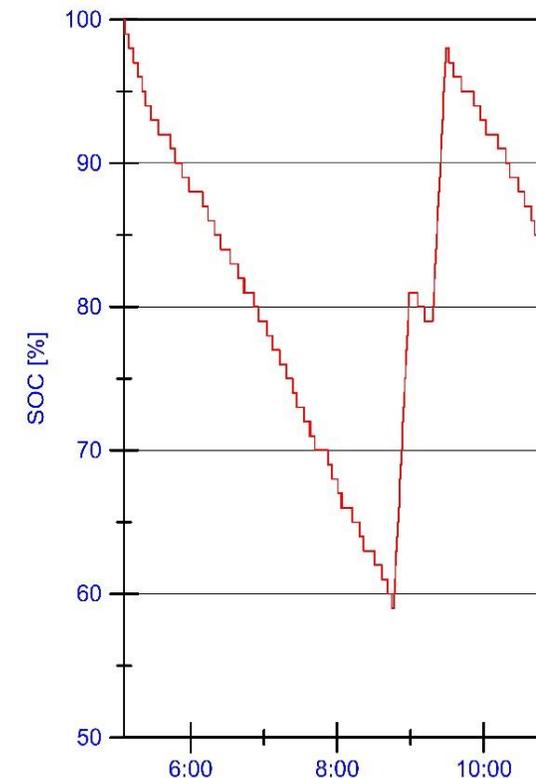
Gefördert durch:



Koordiniert durch:



1. Überblick Begleitforschung Bus (BeFo Bus)
2. Status Einsatzreife E-Busse
 - Batteriebusse (BEV)
 - Brennstoffzellenbusse (BZ)
3. Ökologische Bewertung
4. Ökonomische Bewertung
5. Zusammenfassung und Ausblick

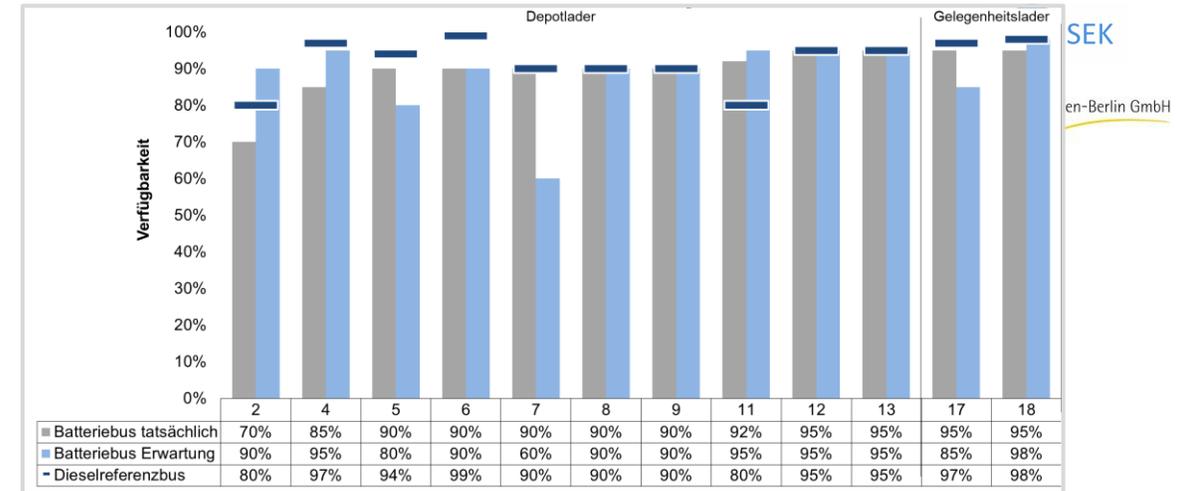
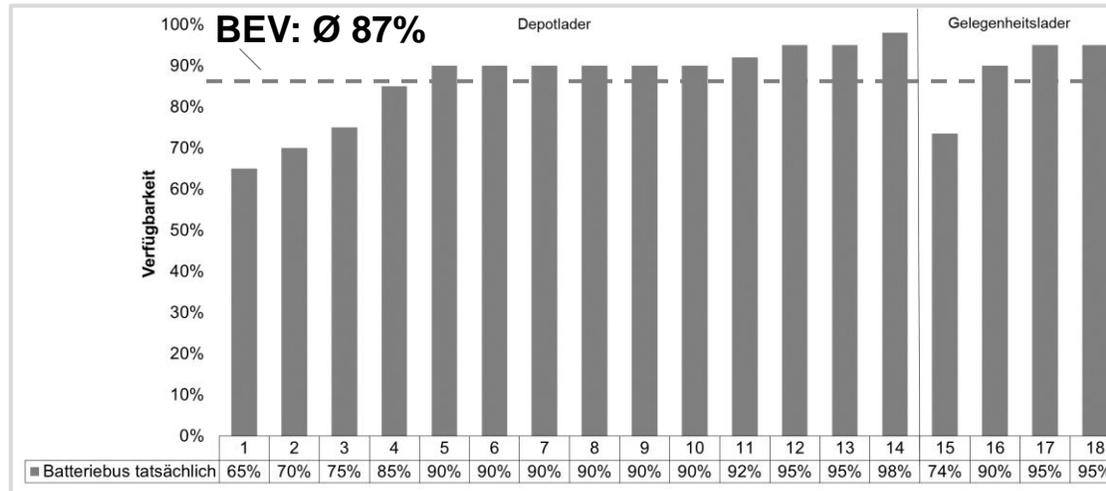


Gefördert durch:

Koordiniert durch:

Einsatzreife Batteriebusse

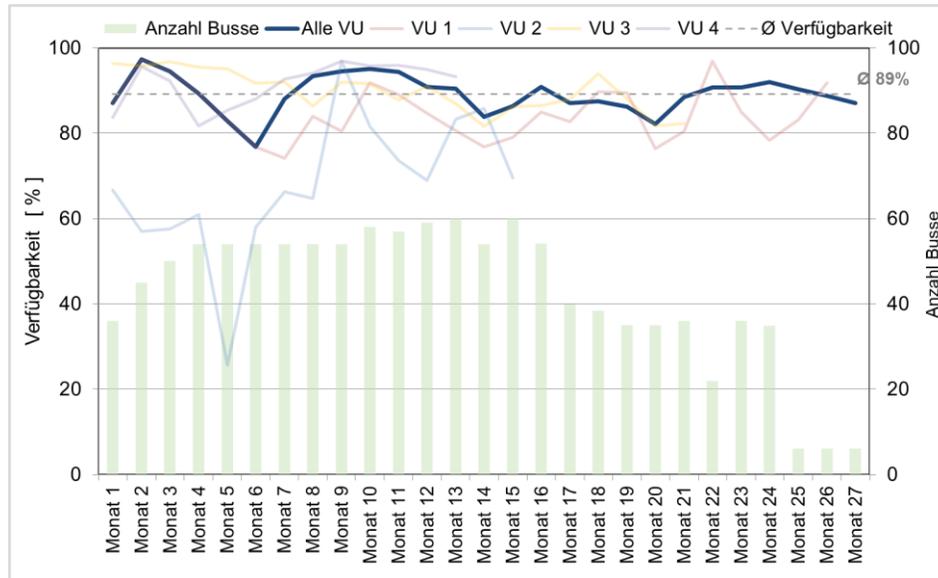
Verfügbarkeit



- Verfügbarkeit BEV: Ø 87% (Depotlader 87%, Gelegenheitslader 88%)
- Deutliche Verbesserung gegenüber dem letzten Statusbericht der AG (72% für Depotlader und 76% für den Gelegenheitslader)
- Erwartung an Verfügbarkeit wird bei 10 von 12 Verkehrsunternehmen bereits (nahezu) erfüllt
- Verfügbarkeiten der Dieselreferenzbusse wird bei 6 von 12 VU bereits erreicht (Ø Verfügbarkeit Diesel: 92%)
- Definitionen für Verfügbarkeit variiert zwischen Verkehrsunternehmen

Einsatzreife Batteriebusse

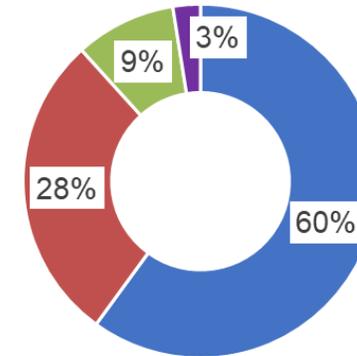
Verfügbarkeit



Ausfallgründe

Anzahl Busse:
Solo (6-36 je Monat, 2 VU)
Zeitraum:
Solo Feb. 2019 bis Okt. 2020

- Instandhaltung
- Instandsetzung Antriebsstrang
- Instandsetzung Unfälle
- Materialmängel



- Entwicklung Verfügbarkeit ab Betriebsbeginn am Beispiel von 4 VU's mit bis zu 60 Bussen
- Mittlere Verfügbarkeit für die betrachteten 4 VU's: 89% (alle BEV in BeFo: Ø 87%)
- Weitestgehend stabil über die Zeit, VU2 mit Problemen zu Beginn, aber insgesamt positiver Entwicklung der Verfügbarkeit
- Etwa ein Viertel der Ausfallgründe ist auf den Elektroantrieb zurückzuführen

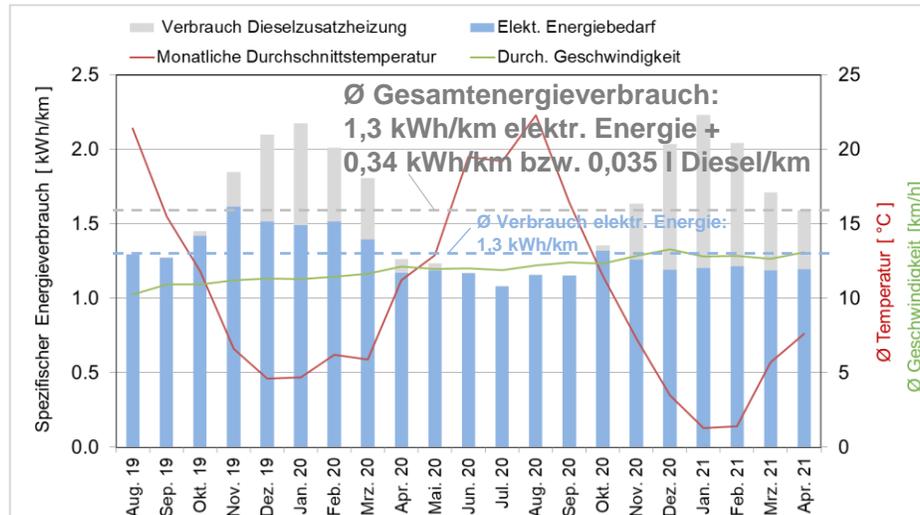
Gefördert durch:



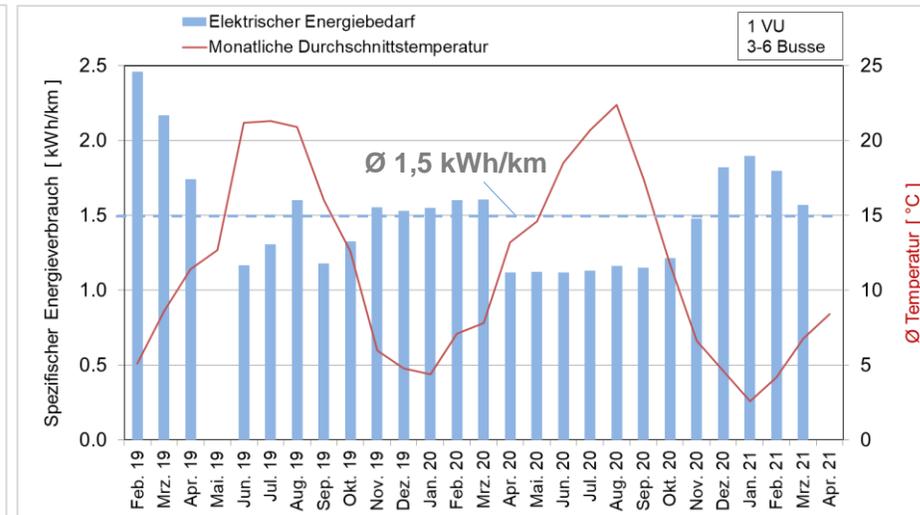
Koordiniert durch:



Dieselmotorschaltung (Solo)



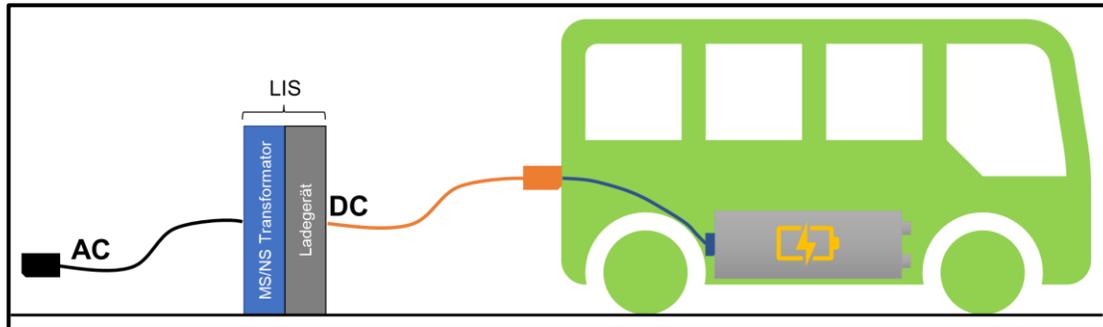
Vollelektrische Heizung (Solo)



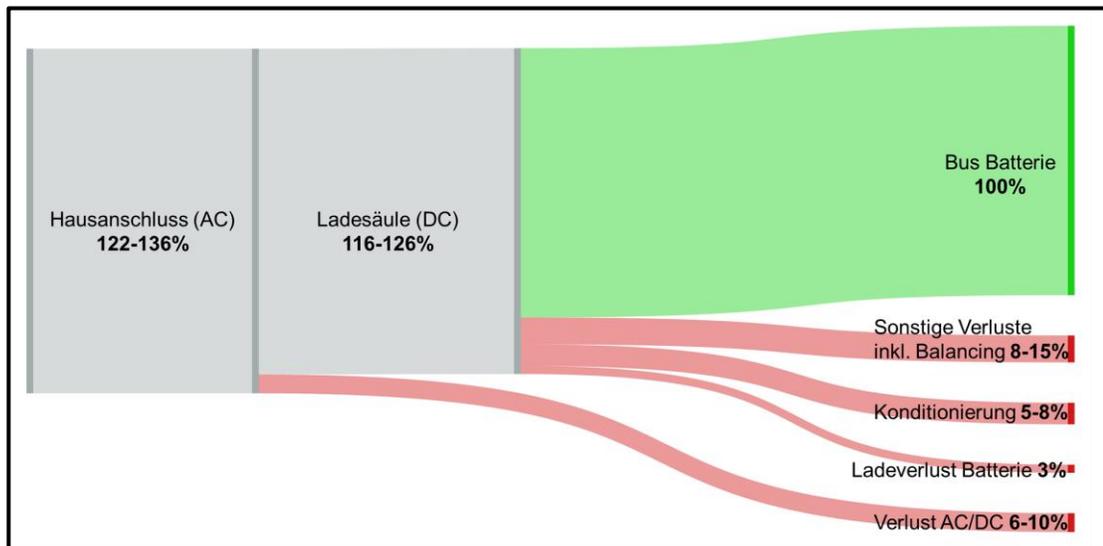
- Fahrzeuge ausgerüstet mit Wärmepumpe, Zuschaltung der Brennstoffzusatzheizung bei 5 °C bis 8 °C Außentemperatur (Hersteller abhängig)
- Mittlerer Energiebedarf der Zusatzheizung bezogen auf Gesamtenergieverbrauch: ca. 20% lag bei vorangegangener AG Bus noch bei 37% (klimatische Bedingungen nicht 1:1 vergleichbar) → Beitrag Wärmepumpe zur Reduktion Energiebedarf
- Mehrverbrauch der vollelektrischen Busse bis zu 70% in den „Heizmonaten“ (abhängig von Außentemperatur)

Auswertung Batterieelektrischer Busse

Energieverbrauch Ladeinfrastruktur/ Fahrzeugversorgung

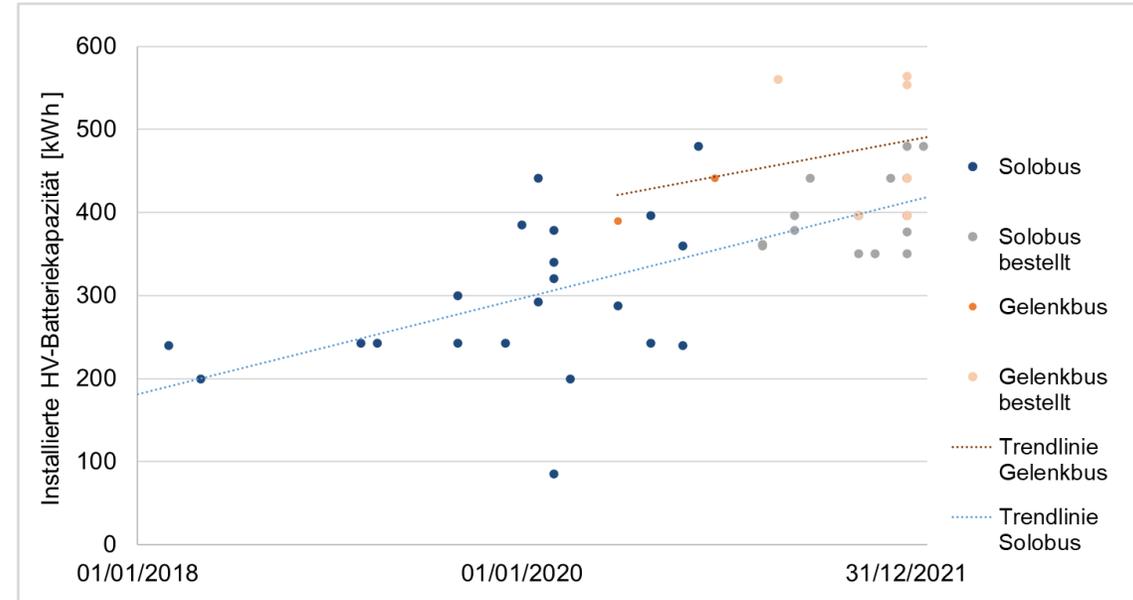
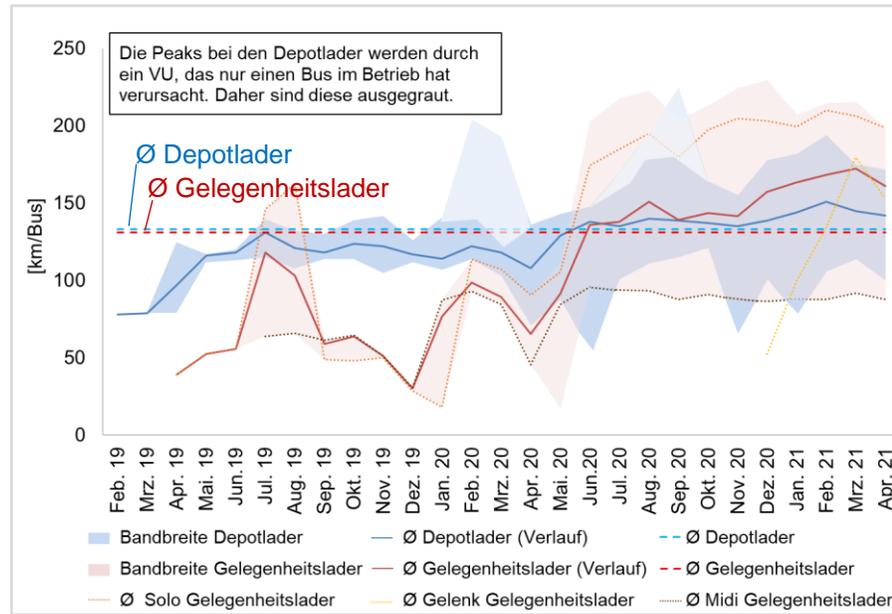


- Mehrverbrauch der Versorgung des Fahrzeuges mit elektr. Energie liegt zwischen 22-36 % bezogen auf Fahrzeugseitig ermittelten Energiebedarf
- Ladeverluste (MS/NS, AC/DC, Batterie) machen ca. 9-13 % Punkte des Mehrverbrauchs aus
- Vorkonditionierung, Sonstige Verluste und Batteriebalancing ca. 13-23 % des Mehrverbrauchs aus
- Zusätzlicher Stromverbrauch ist bei Kosten- und Umweltbetrachtung zu berücksichtigen



Einsatzreife Batteriebusse

Mittlere Laufleistung / Reichweite



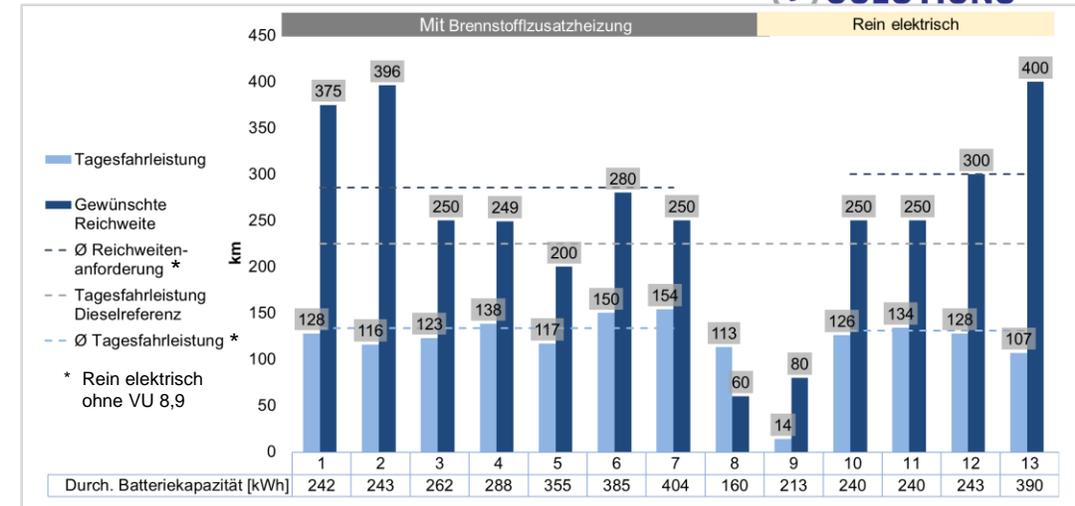
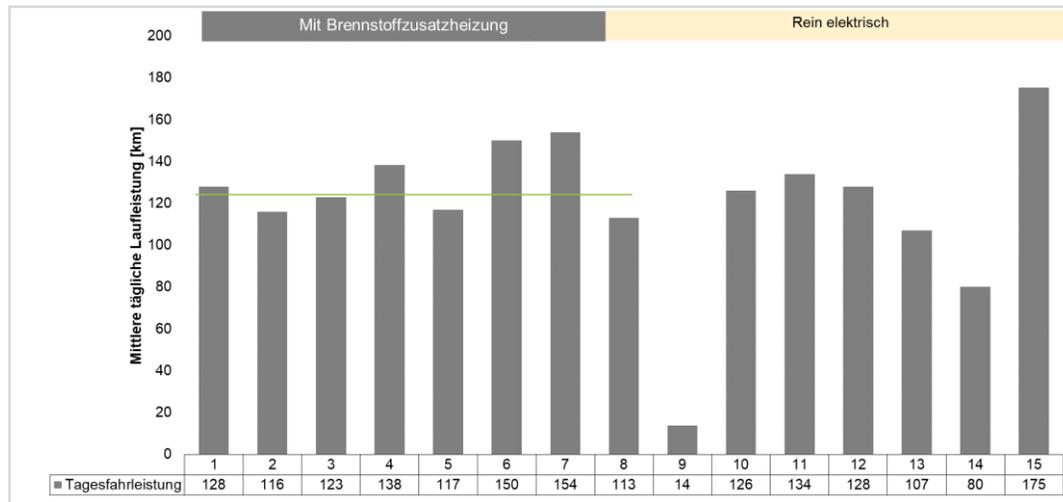
Depotlader: Ø 133 km/ Tag, mit über die Zeit ansteigender Tageslaufleistung korrespondierend zu steigender Kapazität der im Betrieb gehenden bzw. befindlichen BEV Busse

Gelegenheitslader: Ø 131 km/ Tag, mit deutlich über die Zeit steigender Tageslaufleistung, nachdem ab April '20 die LIS Probleme bei einem VU überwunden waren, generell noch geringe Datenlage

Installierte Batteriekapazität Solobusse/ Gelenkbusse: in Betrieb bis April 2021: 293 / 415 kWh
im Zulauf nach April 2021: 402 / 485 kWh

Einsatzreife Batteriebusse

Abgleich Anforderung



Einsatz der Busse auf kurzen Umläufen, für die verfügbare Reichweite ausreicht und ggf. untertägige Ladung im Depot für 2. Umlauf

Heizungskonzept keine erkennbare Relevanz für mittlere erzielte Fahrleistung (Brennstoffzusatzheizung: 133 und rein elektrisches Heizkonzept 131 km)

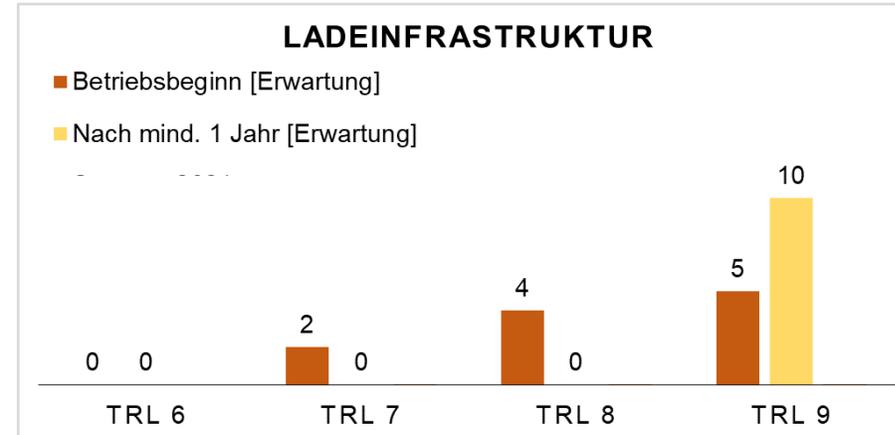
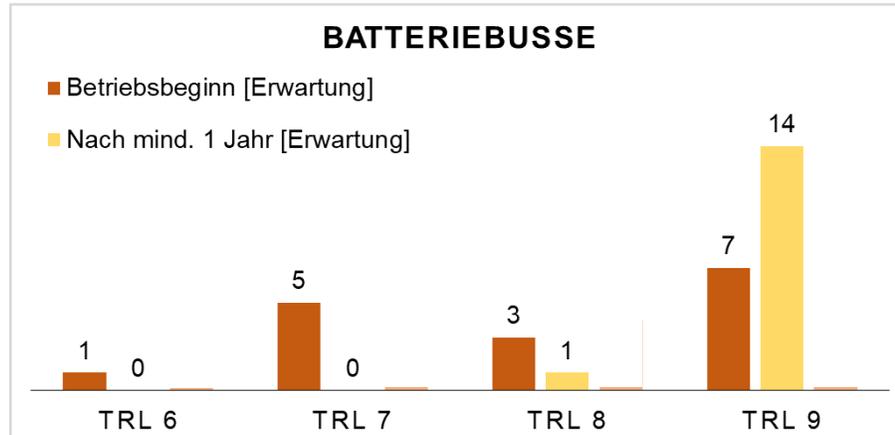
Abgleich mit geforderter Reichweite und mittlerer Tageslaufleistung von Dieseln zeigt noch deutliche Diskrepanz (Anforderungen liegen im Schnitt >Faktor 2 über der erzielten Tagesfahrleistung)

Gefördert durch:

Koordiniert durch:

Einsatzreife Batteriebusse

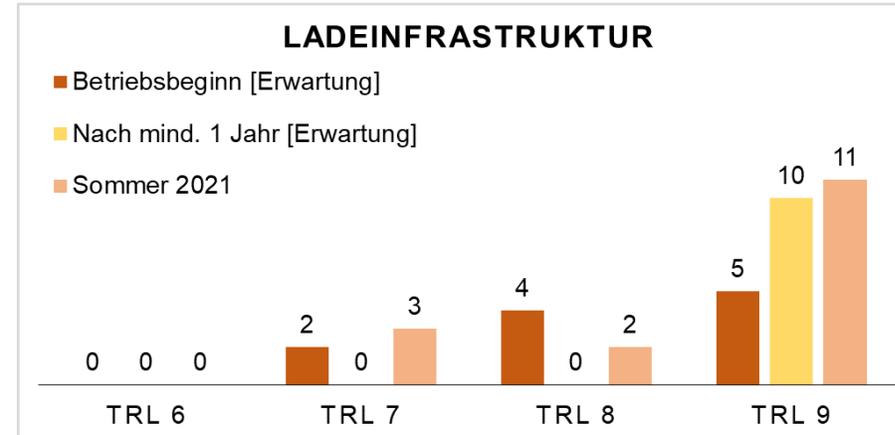
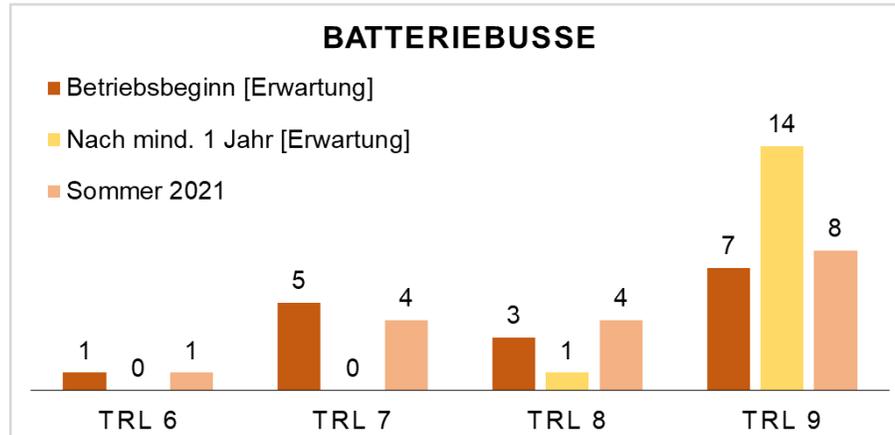
Technology Readiness Level (TRL)



- TRL: Bewertung des Entwicklungsstandes von neuen Technologien, auf Skala von 1 (Grundlagenforschung) bis 9 (serienreif) erfolgt Einschätzung wie weit entwickelt eine Technologie ist.
- BEV-Fahrzeuge: Erwartungshaltung zu Beginn TRL 7-9 (1 VU bei TRL 6), nach einem Jahr gehen 14 von 15 VU von einem serienreifen Produkt aus (TRL 9)
- Ladeinfrastruktur: Erwartungshaltung ähnlich zu den Fahrzeugen, zu Beginn TRL 7-9 nach einem Jahr erwarten alle Vus eine serienreife Infrastruktur (TRL 9)

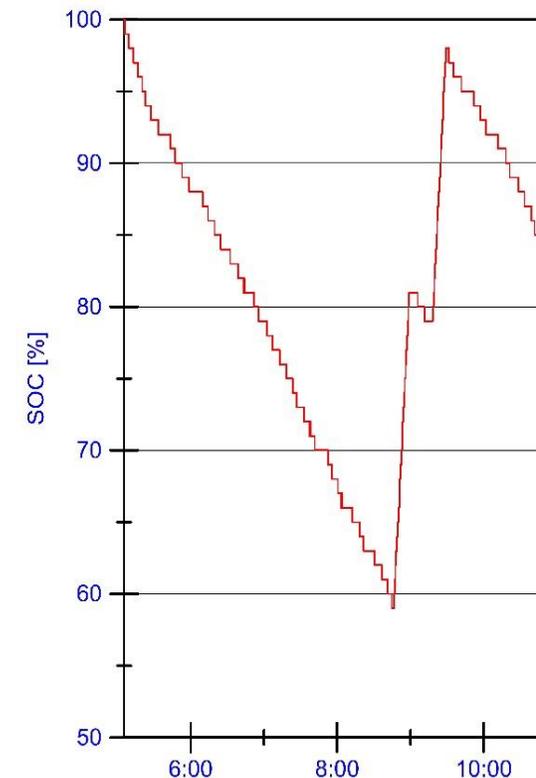
Status Einsatzreife E-Busse

Technology Readiness Level



- IST Einschätzung im Sommer 2021 (nach 0,5 bis 2,5 Jahre Betrieb, je nach Inbetriebnahmezeitpunkt)
- BEV-Fahrzeuge: TRL wird leicht höher eingeschätzt als zu Beginn erwartet, der erwartete Technologiestand „Serienreife“ (TRL 9) nach einem Jahr Betrieb ist noch nicht erreicht
→ Technologie hat noch weiteres Entwicklungspotential
- Ladeinfrastruktur: Erwartungshaltung nach einem Jahr Betrieb wurde weitgehend erfüllt (~70%, 11 von 16 VU ordnen LIS mit TRL 9 ein), weitere 5 VUs sehen LIS bei TRL 7-8
→ viel erreicht, auch hier noch Verbesserungspotential

1. Überblick Begleitforschung Bus (BeFo Bus)
2. Status Einsatzreife E-Busse
 - Batteriebusse (BEV)
 - Brennstoffzellenbusse (BZ)
3. Ökologische Bewertung
4. Ökonomische Bewertung
5. Zusammenfassung und Ausblick

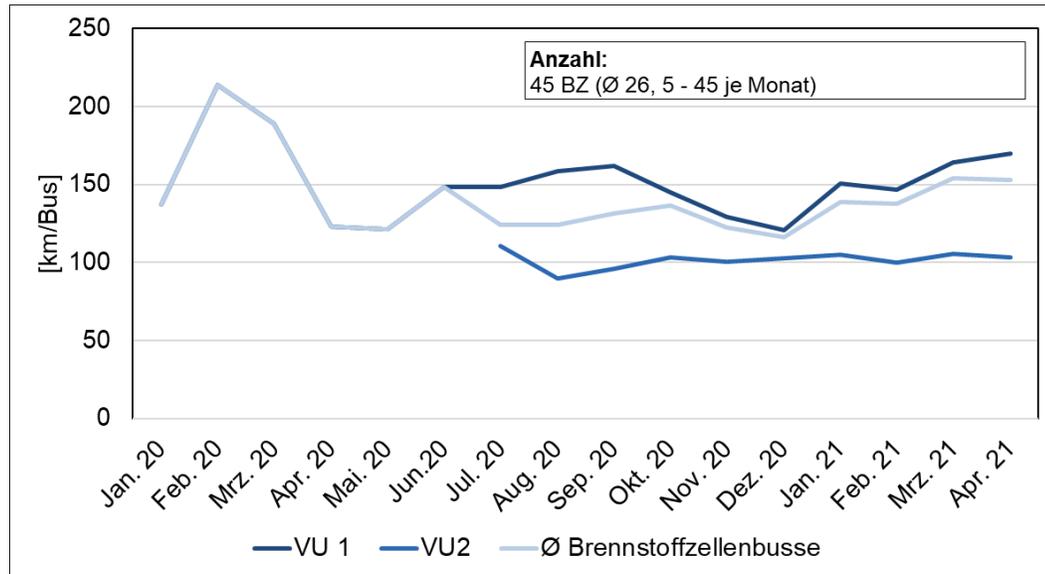


Gefördert durch:

Koordiniert durch:

Auswertung Brennstoffzellenbusse

Laufleistung



Datenbasis aktuell noch eingeschränkt (2 VU)

Ø tägliche Laufleistung aktuell bei ~150 km

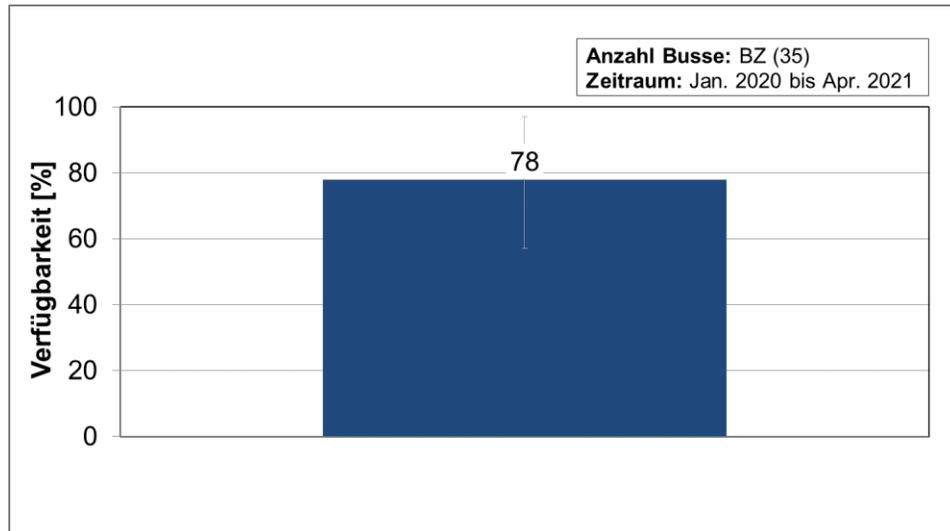
Verringerte Laufleistungen durch Einschränkungen bei der Betankung

- Abnahme aller H2-Tankstellen noch nicht erfolgt
- Noch geringe Anzahl an geschulten Mitarbeitern (für Betankung)
- H2-Tankstelle befindet sich außerhalb des Betriebshofs



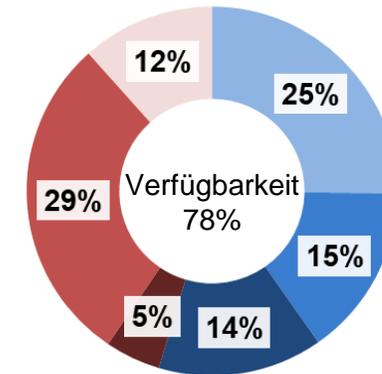
Auswertung Brennstoffzellenbusse

Verfügbarkeit



AUSFALLGRÜNDE

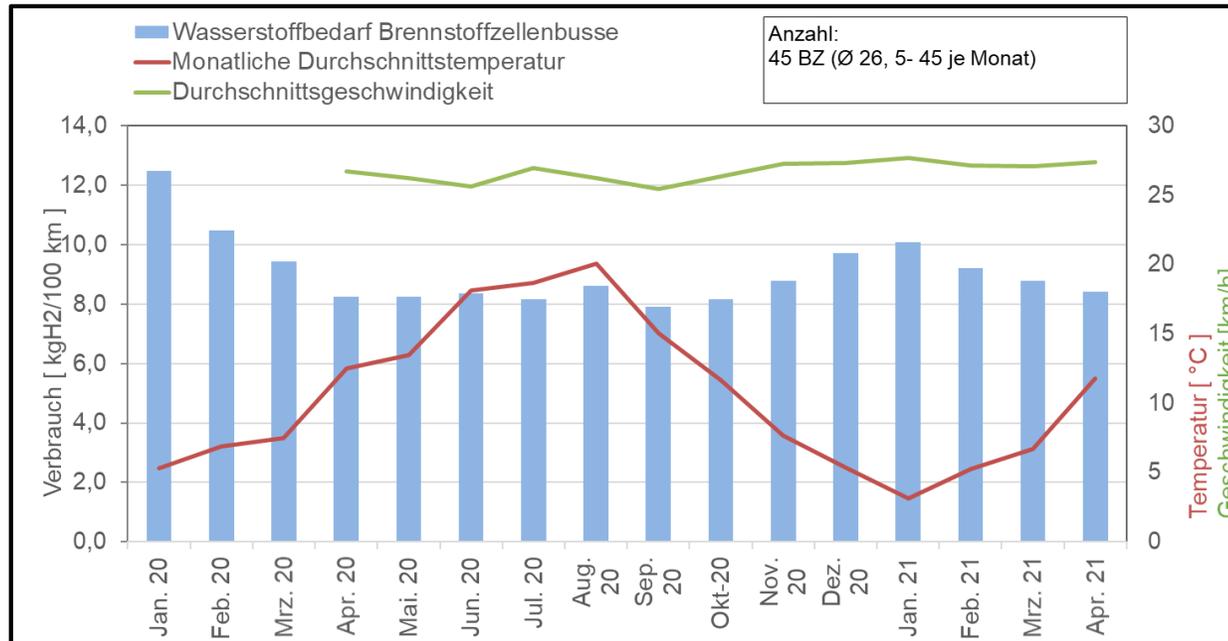
- Mechanische Bauteile
- Planmäßige Wartung
- Elektrische Komponenten
- Wasserstofftank
- Brennstoffzelle
- Batterie



- Verfügbarkeit anhand der Ausfallzeiten gemessen
- Verfügbarkeit von Ø 78 %
- Ausfallzeiten fallen durch momentan lange Lieferzeiten von Ersatzteilen (v.a. für konventionellen Teil des Busses) länger aus
- Etwa ein Drittel der Ausfallgründe ist BZ-Antrieb bedingt, inkl. E-Antriebsstrang knapp die Hälfte

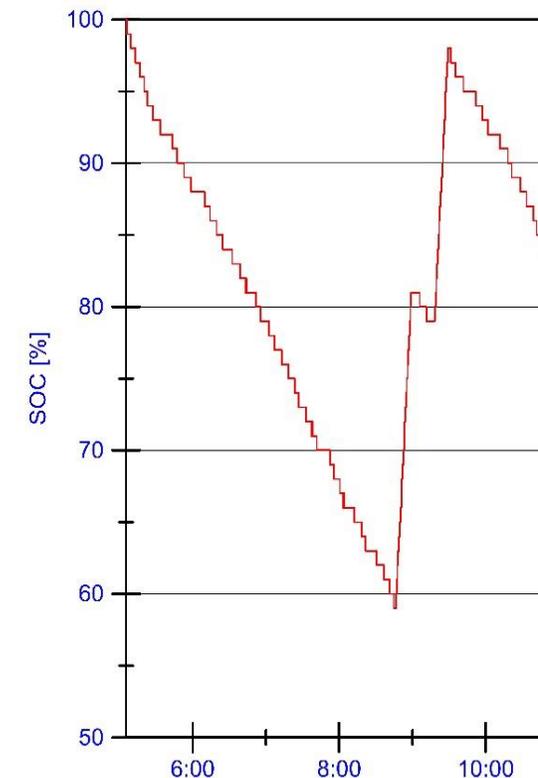
Auswertung Brennstoffzellenbusse

Energieeffizienz



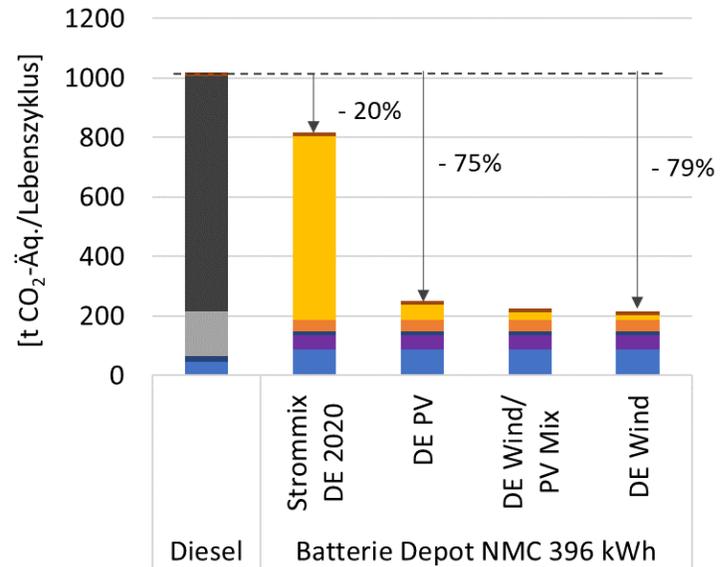
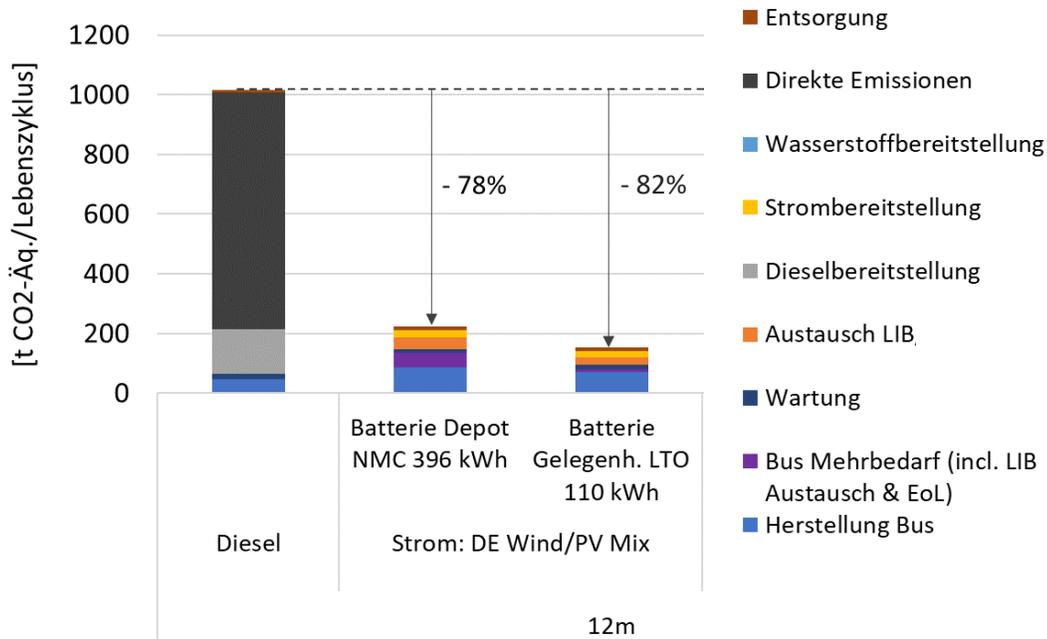
- Daten von 2 VU, Energiebedarf im Bereich 8 - 10 kg H₂/ 100 km
- Erhöhter Energieverbrauch während den Wintermonaten erkennbar
- Niedrigerer Energieverbrauch in der zweiten Heizperiode (Winter 2020/21) voraussichtlich primär bedingt durch manuelle, noch nicht systematisierte Datenerfassung, Lernkurve des Fahrpersonals aber ebenfalls positiver Faktor

1. Überblick Begleitforschung Bus (BeFo Bus)
2. Status Einsatzreife E-Busse
 - Batteriebusse (BEV)
 - Brennstoffzellenbusse (BZ)
3. **Ökologische Bewertung**
4. Ökonomische Bewertung
5. Zusammenfassung und Ausblick



Gefördert durch:

Koordiniert durch:



Annahmen (Auswahl):

Lebensdauer: 12 Jahre

Verbrauch:

Diesel: 43,7 l Diesel/ 100 km

BEV: 160 kWh/ 100 km

(rein elektrische Heizung)

Ersatz HV-Batterie nach 6 Jahren

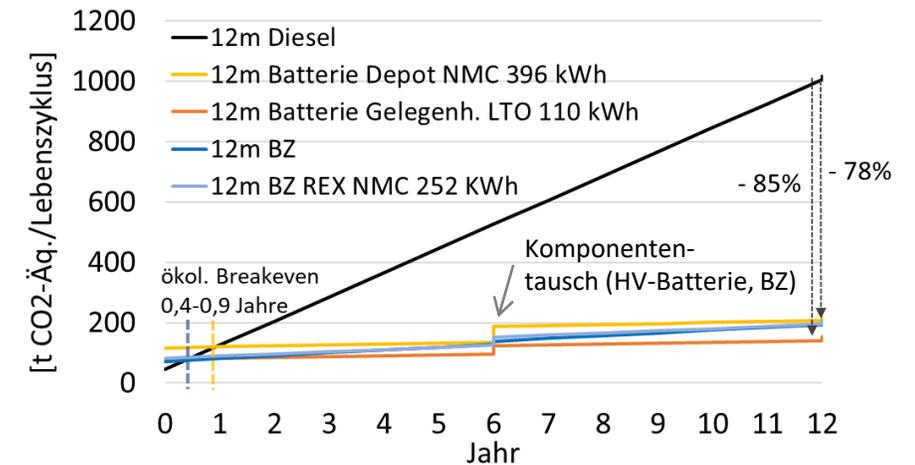
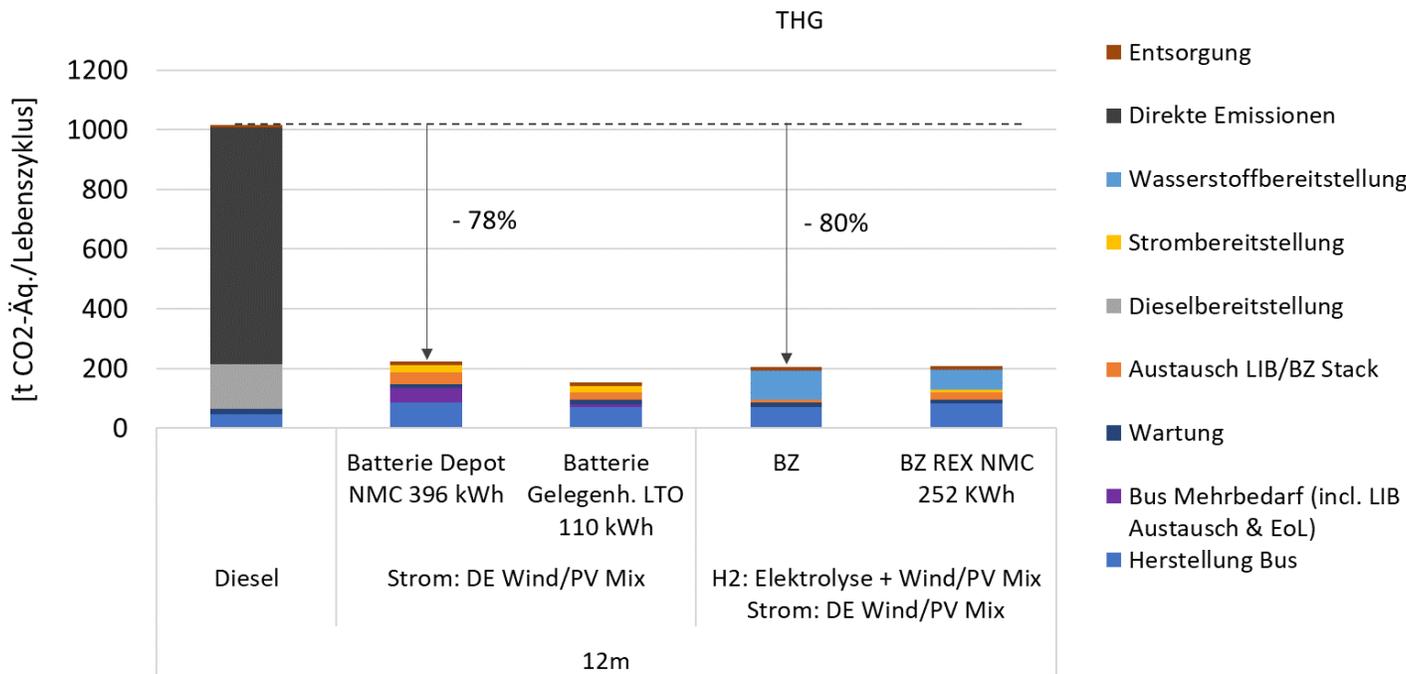
THG Einsparungspotenzial bis zu ~ 80%, mit lokal emissionsfreien und leiserem Betrieb

Einsatz erneuerbarer Energien für Strombereitstellung Grundvoraussetzung um relevante Treibhausgas (THG)-Einsparungen zu erzielen

Relevanz HV-Batterie/ E-Antriebsstrang für Herstellung Fahrzeug:
 Depotlader vs. Diesel: Faktor 1,9 bzw. Faktor 2,7 bei Berücksichtigung Tauschbatterie
 Gelegenheitslader vs. Diesel: Faktor 1,5 bzw. Faktor 2,1

Ökologische Bewertung

THG Emissionen über Lebenszyklus 12 m E-Busse

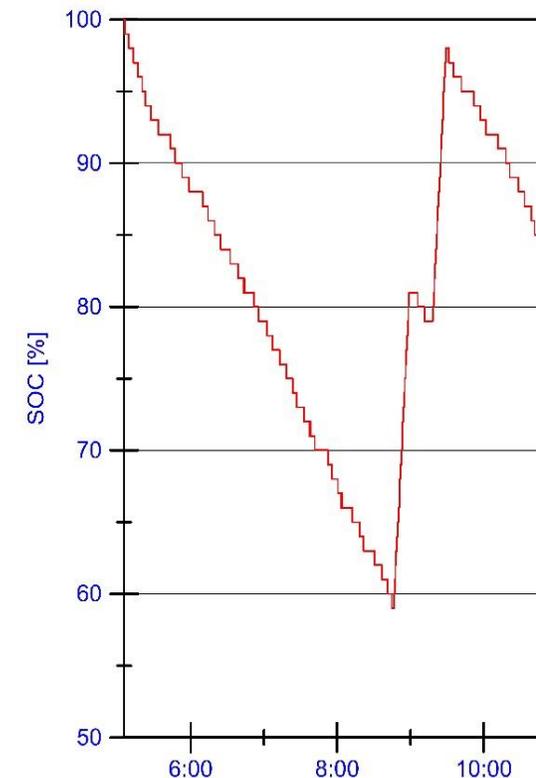


Analog zu BEV Einsatz erneuerbarer Energien (EE) für H₂ Bereitstellung
Grundvoraussetzung um relevante Treibhausgaseinsparungen zu erzielen

Vergleichbare Einsparungen für BEV und BZ Fahrzeug
(Fahrzeugmehrbedarf BEV kompensiert Effizienz Nachteile H₂/BZ)

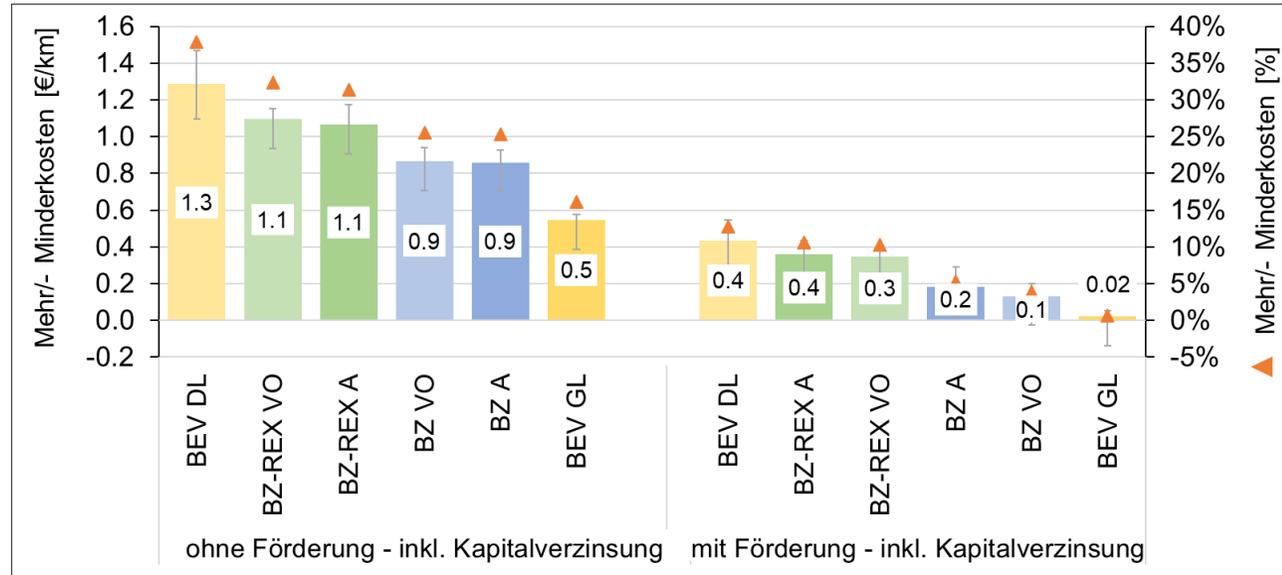
Ökologische Amortisationsdauer Herstellung Bus: 0,9 (BEV) bzw. 0,4 (BZ) Jahre
bei Einsatz EE (Herstellung Faktor 2,7 (BEV) bzw. 1,8 (BZ) höher vs. Diesel)

1. Überblick Begleitforschung Bus (BeFo Bus)
2. Status Einsatzreife E-Busse
 - Batteriebusse (BEV)
 - Brennstoffzellenbusse (BZ)
3. Ökologische Bewertung
4. **Ökonomische Bewertung**
5. Zusammenfassung und Ausblick



Gefördert durch:

Koordiniert durch:



Bezugsbasis: Musterflotte mit 50 Bussen
mit Diesel Euro VI Antrieb
(27 Solo- und 23 Gelenkbusse)

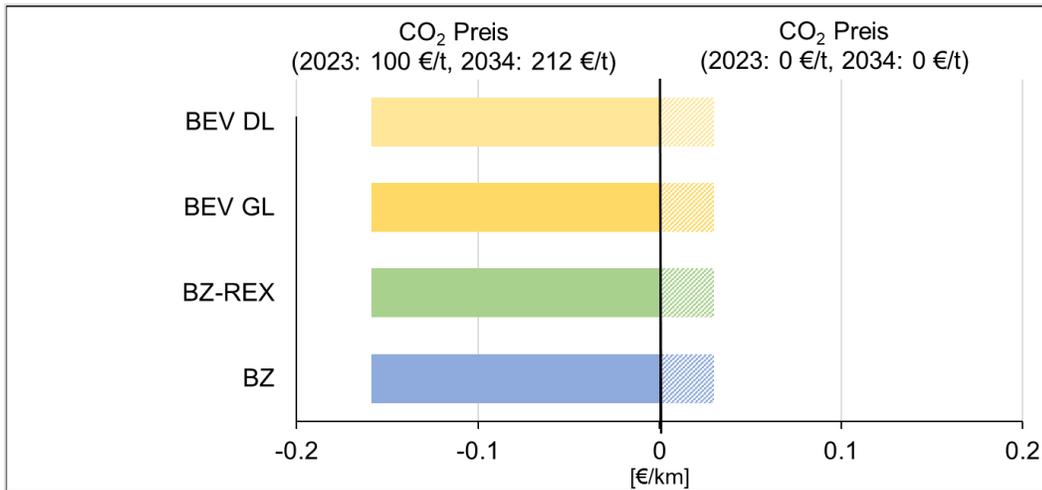
Vollständige Dokumentation der verwendeten
Eingangsparameter findet sich im Detailbericht zur
Wirtschaftlichkeitsanalyse unter [https://www.starterset-
elektromobilität.de/Bausteine/OEPNV/](https://www.starterset-elektromobilität.de/Bausteine/OEPNV/)
[in Vorbereitung]

Alle E-Antriebskonzepte sind mit Mehrkosten verbunden (Referenz Dieselflotte: 3,39 €/km)

- Bandbreite ohne Förderung: 16 – 38 % (0,55 – 1,29 €/km Mehrkosten)
- Bandbreite mit Förderung: 1 – 13 % (0,02 – 0,44 €/km Mehrkosten)

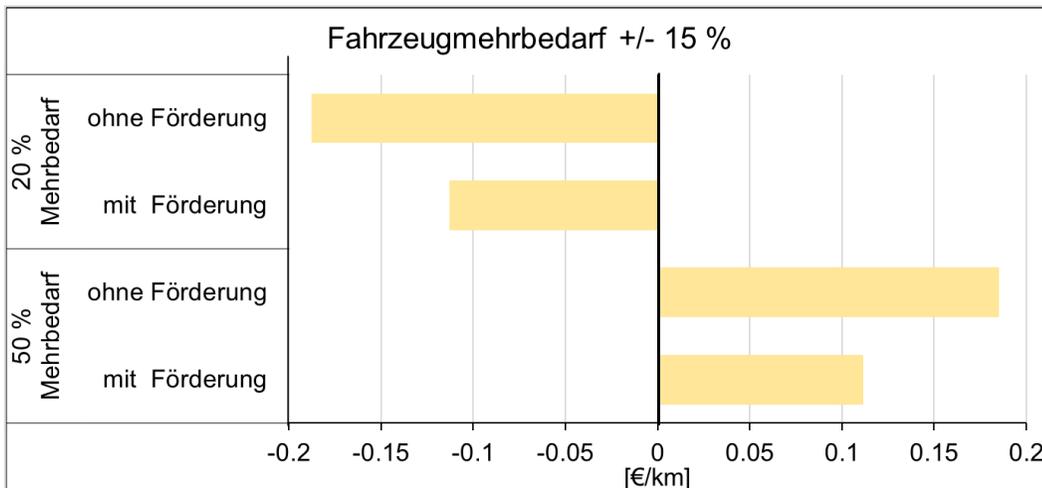
Ermittelte Kosten ergeben sich auf Basis der verwendeten Eingangsgrößen, gezeigte Bandbreite zeigt Sensitivität für einen ausgewählten Parameter, tatsächliche Bandbreite (Sensitivität) deutlich größer

Tatsächliche Mehrkosten abhängig von mehreren Faktoren (betrieblicher Einsatzkontext, Marktentwicklung (Fahrzeug- Infrastruktur-, Energieträgerkosten etc.), regulatorische Rahmenbedingungen etc.)



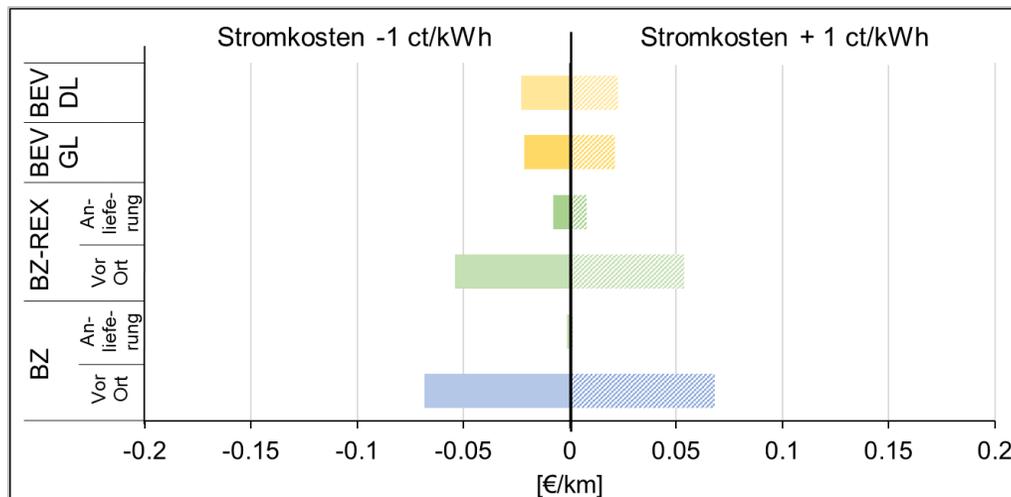
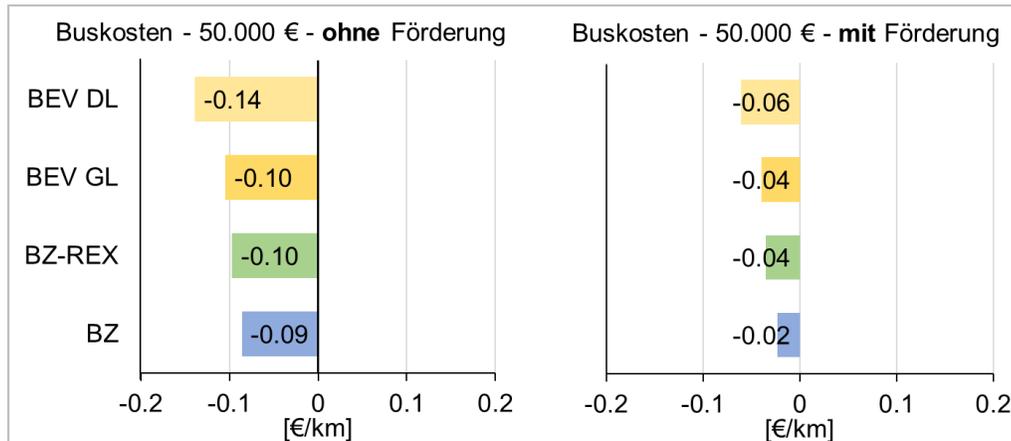
CO₂ Preis

- Annahme: CO₂ Preis stärker steigt wie aktuell beschlossen (Orientierung an CO₂ Umweltkosten nach UBA Methodenkonvention)
- Auswirkung auf alle E-Antriebe gleichermaßen aufgrund Verteuerung des Dieselbusbetriebs
- Verminderung um 0,16 €/km
- Bei 0 €/t CO₂: Steigerung Mehrkosten um 0,03 €/km



Mehrbedarf Depotlader

- Basisannahme Mehrbedarf von 35% für Depotlader (mit rein elektrischer Heizung)
- Reduktion um 15%-Punkte auf 20% Mehrbedarf: Verminderung um 0,19 €/km (-15% Mehrkosten) ohne Förderung
0,11 €/km (-26% Mehrkosten) mit Förderung (bei Förderquote: 80% der Mehrkosten)
- Analog führt Steigerung um 15% führt zu entsprechenden Steigerung der Mehrkosten



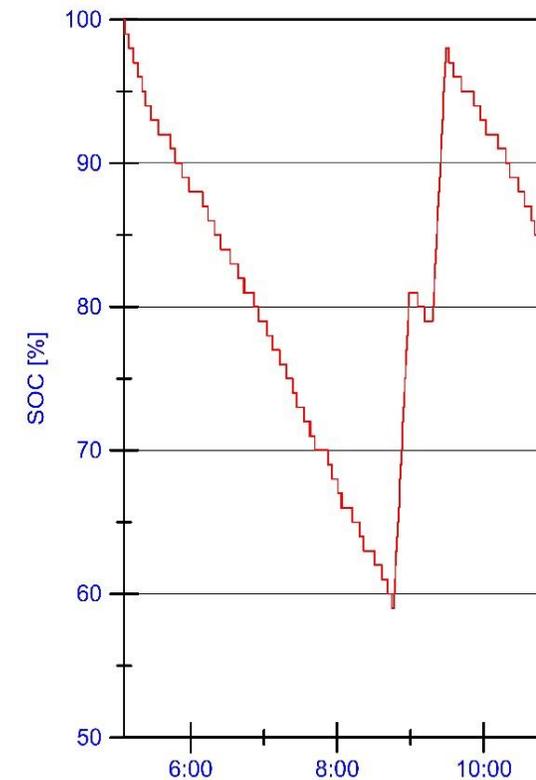
Kostenminderung Buskosten

- Reduktion der Busbeschaffungskosten um -50.000 € (z.B. sinkende Komponentenkosten durch Skaleneffekte etc.)
→ Reduktion TCO Kosten um -0,09 € bis -0,14 €/km ohne Förderg
- größte Reduktion bei BEV DL aufgrund angesetzten Fahrzeugmehrbedarf
- niedrigsten Einsparungen bei BZ, da mit niedrigsten Komponententauschkosten

Energieträgerkosten: Variation Stromkosten ±1ct/kWh:

- BEV DL/GL: ± 0,02 €/km (abhängig vom Verbrauch)
- BZ-REX:
 - H2 Anlieferung: ±0,01 €/km (aufgrund geringem Strombedarf)
 - H2 Vor-Ort-Erzeugung: ± 0,05 €/km (aufgrund erhöhtem Strombedarf für H2 Erzeugung)
- BZ:
 - H2 Anlieferung irrelevant, da nur Strom für Verdichtung
 - H2 Vor-Ort Erzeugung: ± 0,07 €/km (aufgrund höherem Wasserstoffverbrauch).

1. Überblick Begleitforschung Bus (BeFo Bus)
2. Status Einsatzreife E-Busse
 - Batteriebusse (BEV)
 - Brennstoffzellenbusse (BZ)
3. Ökologische Bewertung
4. Ökonomische Bewertung
5. Zusammenfassung und Ausblick



Gefördert durch:



Koordiniert durch:



Datenbasis deutlich erweitert

Praxistauglichkeit und Energieeffizienz der Technologie konnte weiter gesteigert

- Verfügbarkeit BEV bei $\emptyset \sim 87\%$, BZ bei $\emptyset \sim 78\%$ mit 28% bzw. 48% Antriebstechnologiebedingten Ausfällen
- Einsatz BEV Depotlader aufgrund Reichweite (Speichergröße) derzeit auf kürzere Umläufe begrenzt (BEV DL \emptyset 133 km vs. Diesel \emptyset 225 km) und mindestens Faktor 2 unter geforderter Reichweite, rein elektrische Betrieb zusätzliche Herausforderung
- Reduktion des Energiebedarfs durch verbesserte Klimatisierungs- und Heizkonzepte, und weitere Verbesserungen an Energiemanagement etc.

Ökologie

- Einsatz erneuerbarer Energieträger Grundvoraussetzung für angestrebten relevanten Beitrag zu Klimaschutz
- Herstellung mit Faktor 2-3 vs. Dieselbus, ökologischer Breakeven im ersten Betriebsjahr aber

Wirtschaftlichkeit

- Mehrkosten E-Antriebstechnologien im Bereich von 16 - 38%, mit Förderung wirksam minimiert (1-13%)

Markthochlauf hat begonnen, CVD hier ein wesentlicher Impuls

BZ, BEV: Weitere Verbesserung der Technologie (Fahrzeuge und Infrastruktur) erforderlich (Verfügbarkeit, TRL)

BEV: Verbesserung der Reichweite durch steigende Batteriekapazitäten absehbar

Alle E-Busse: Förderung zur Verminderung der Mehrkosten ist kurz- bis mittelfristig erforderlich, weitere Kostenreduktionen gerade bei Investkosten sind zu erwarten (Skaleneffekte bei Komponenten)

CO₂ Bepreisung wirksame Maßnahme um Mehrkostenlücke zu reduzieren

Sektorenkopplung vorantreiben, gerade bei H₂ Synergien bei H₂ Versorgung durch zusätzliche Nutzung in anderen Bereichen und Sektoren

Regulatorik Energiemarkt vereinheitlichen und vereinfachen

Längere Umsetzungszeitleisten für emissionsfreie Technologien wegen Infrastruktur Aufbau und Fahrzeugbeschaffung, aber auch Fördermittelbeschaffung
→ Ausschreibungszeiträume darauf anpassen

Aufgrund Mehrkosten von Fahrzeugen und Infrastruktur Verlängerung der Abschreibungs- / Vergabezeiträume

Begleitforschung Bus

Ihr Ansprechpartner



Dr. Michael Faltenbacher

Sphera Solutions GmbH
(vormals thinkstep AG)

+49 711 341817-29

mfaltenbacher@sphera.com



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Gefördert durch:



Koordiniert durch:

