



Vergleich des Energiebedarfs von Busantriebssystemen

*Vorstellung der wichtigsten Ergebnisse einer
an der ETH Zürich durchgeführten Forschungsarbeit*

Dr. sc. ETH Michael Schwertner

6. Internationale E-Bus-Konferenz, Solingen



Inhalt

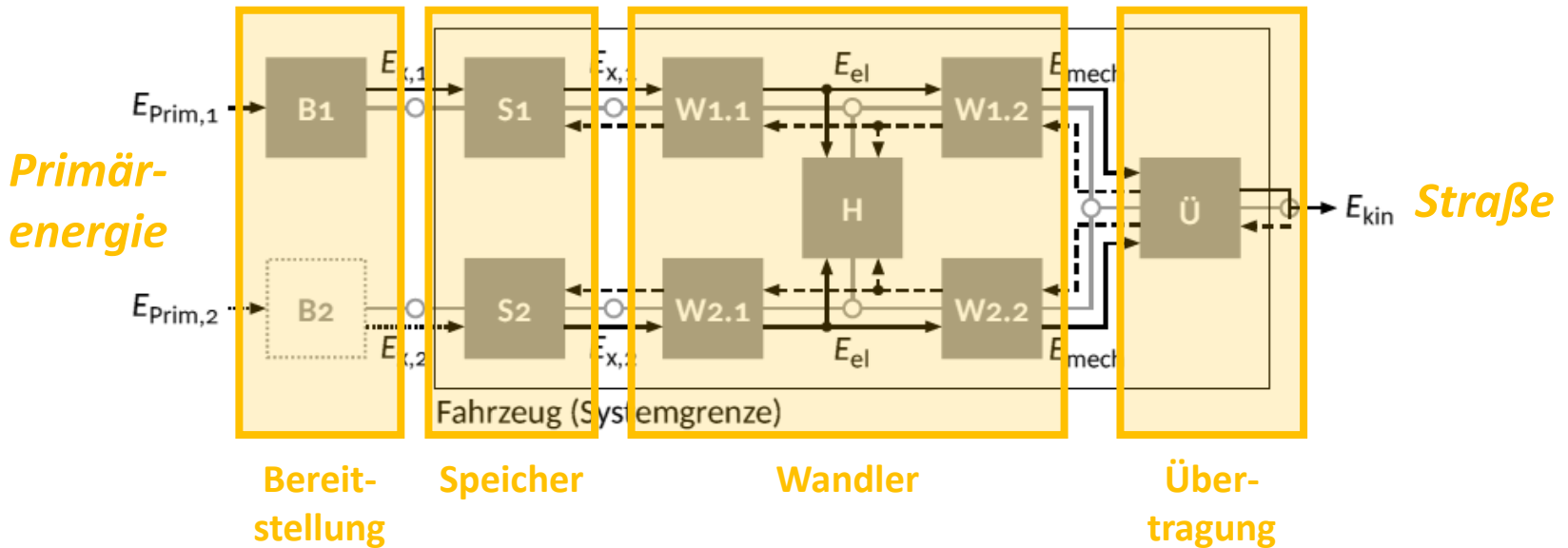
- Vorgehensweise
- Modellierung
- Generische Fallstudien
- Fallstudie Gotland
- Fazit

Vorgehensweise

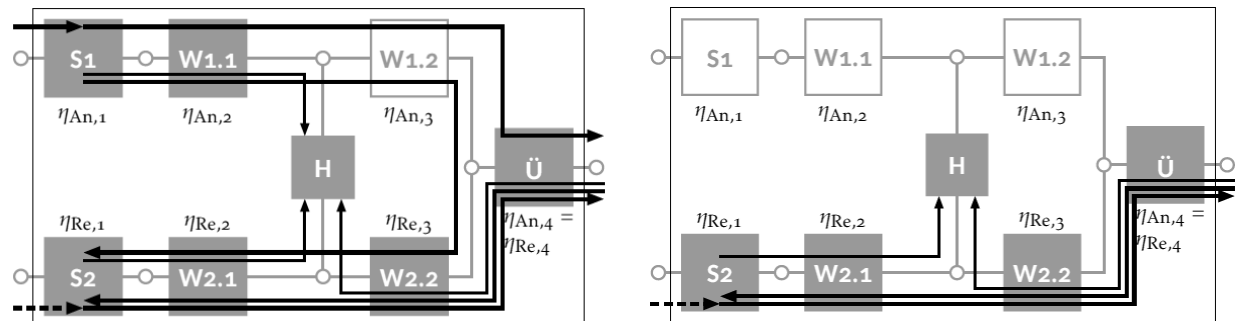
- Motivation: Zunehmende Bedeutung des Energiebedarfs
- Vorbereitung
 - Finden der „Forschungslücke“
 - Finanzierung durch das Schweizer *Bundesamt für Energie* (BfE)
- Durchführung
 - Schrifttumsanalyse
 - Methodik: Wie soll der Energiebedarf berechnet werden?
 - 1. Ansatz: SORT-Zyklen -> einfach, aber nicht zweckdienlich
 - 2. Ansatz: Simulation der Fahrzyklen -> brauchbar, aber aufwändig
 - Modellierung
 - Programmierung eines Simulationswerkzeugs
 - Anwendung desselben in generischen und realen Fallstudien

Modellierung

- Basismodell des Antriebsstrangs -> *Well-to-wheel*-Analyse

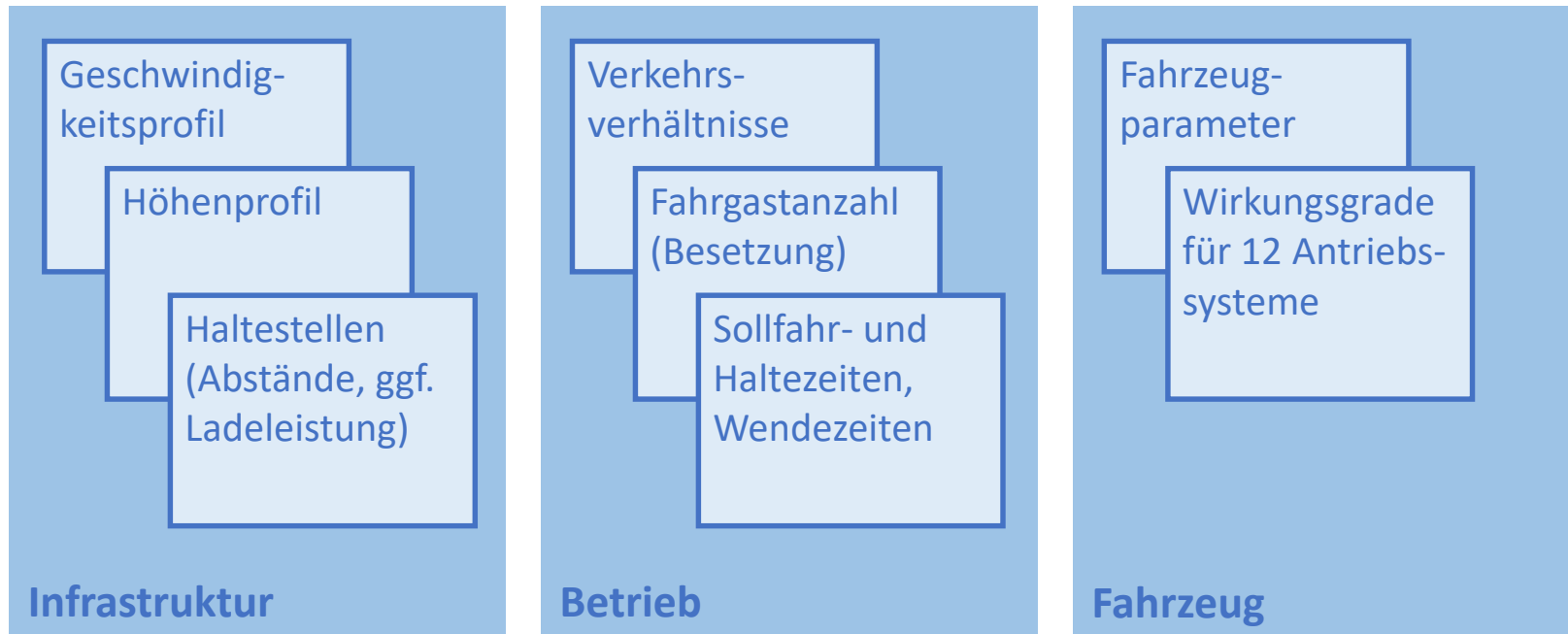


- Energie-
flüsse:
P-Hybrid (li.)
Batterie (re.)



Modellierung

- Eingangsgrößen:



- Berechnungsansatz:

- Zeitschrittverfahren, $\Delta t \ll 1 \text{ s}$
- Zugkraft am Radumfang $\rightarrow$ Antriebsleistung $\rightarrow$ Energiebedarf

Generische Fallstudien

- Untersuchung des Einflusses folgender Parameter:
 - Halteabstand = Häufigkeit von Beschleunigung und Bremsung
 - Neigung = Leistungsbedarf für Neigungswiderstand
 - Besetzung = Variation der Fahrzeuggesamtmasse
 - Außentemperatur = Variation des Heizenergiebedarfs
- Vergleich von 12 Antriebssystemen

Nichtelektrisch

Dieselbus
Erdgasbus

Teilelektrisch/hybrid

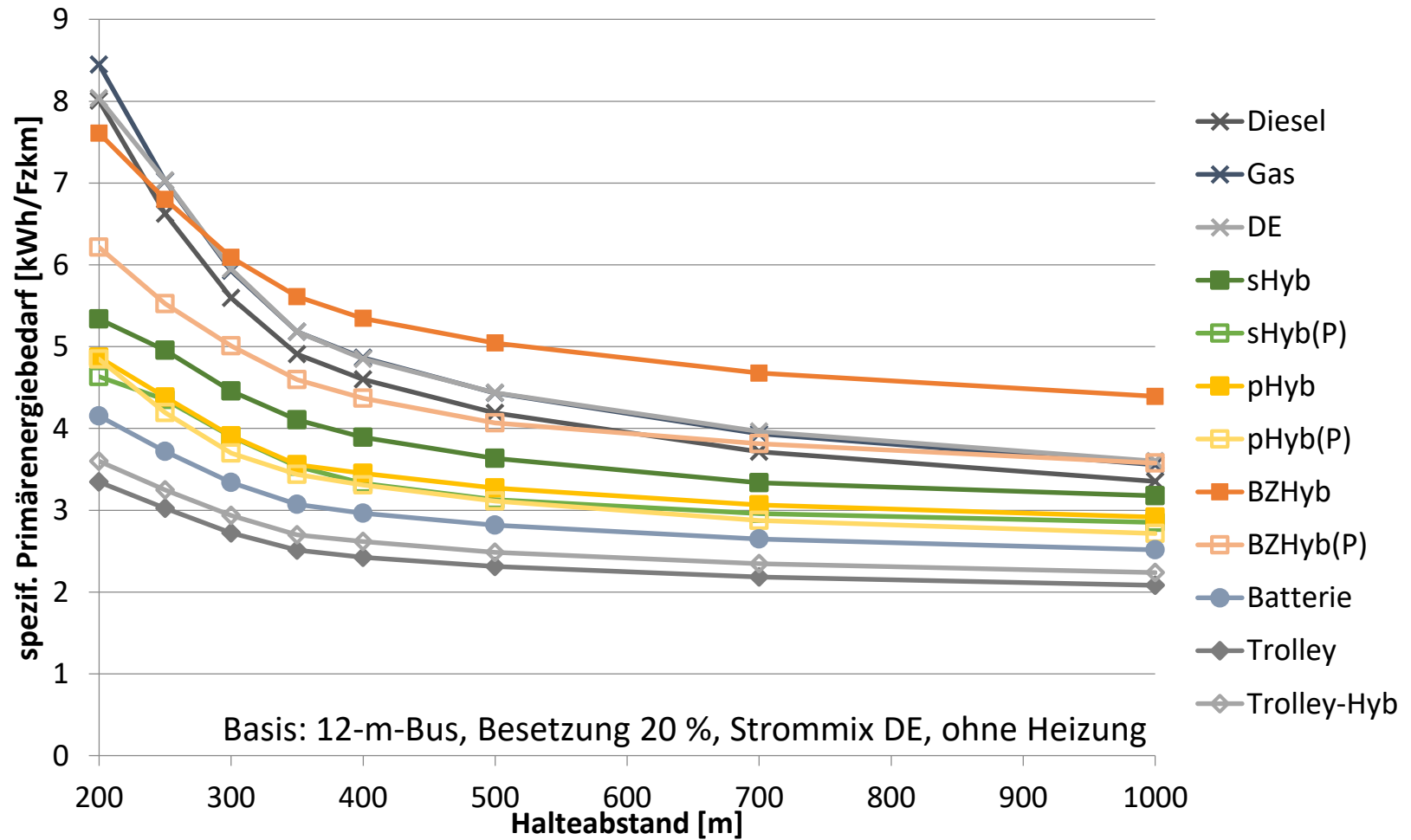
Dieselelektrischer Bus
Serieller Dieselhybrid*
Paralleler Dieselhybrid*
Brennstoffzellenhybrid*

** jeweils ohne und mit
Zwischenaufladung*

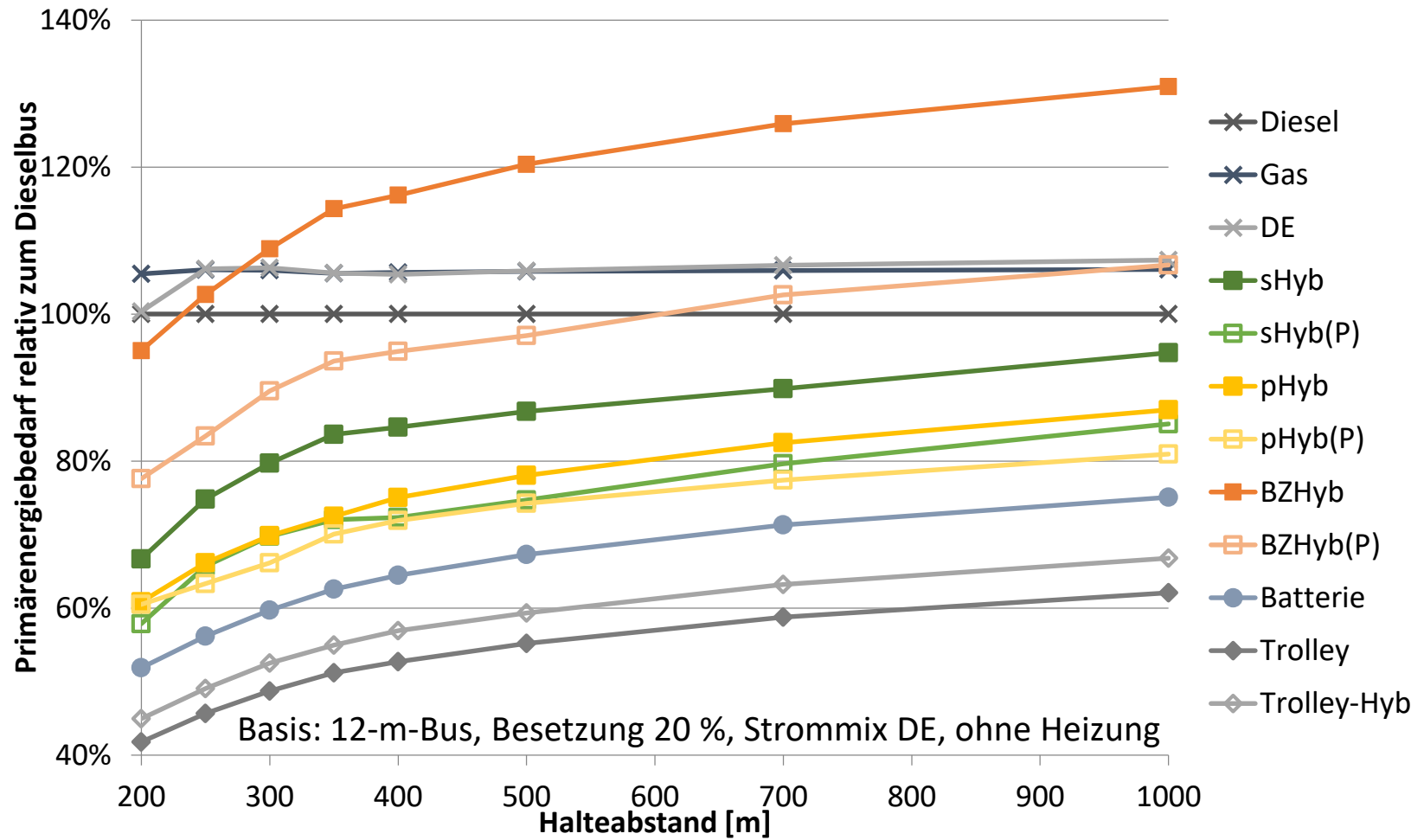
Vollelektrisch

Batteriebus
Trolleybus
Trolley-Hybridbus

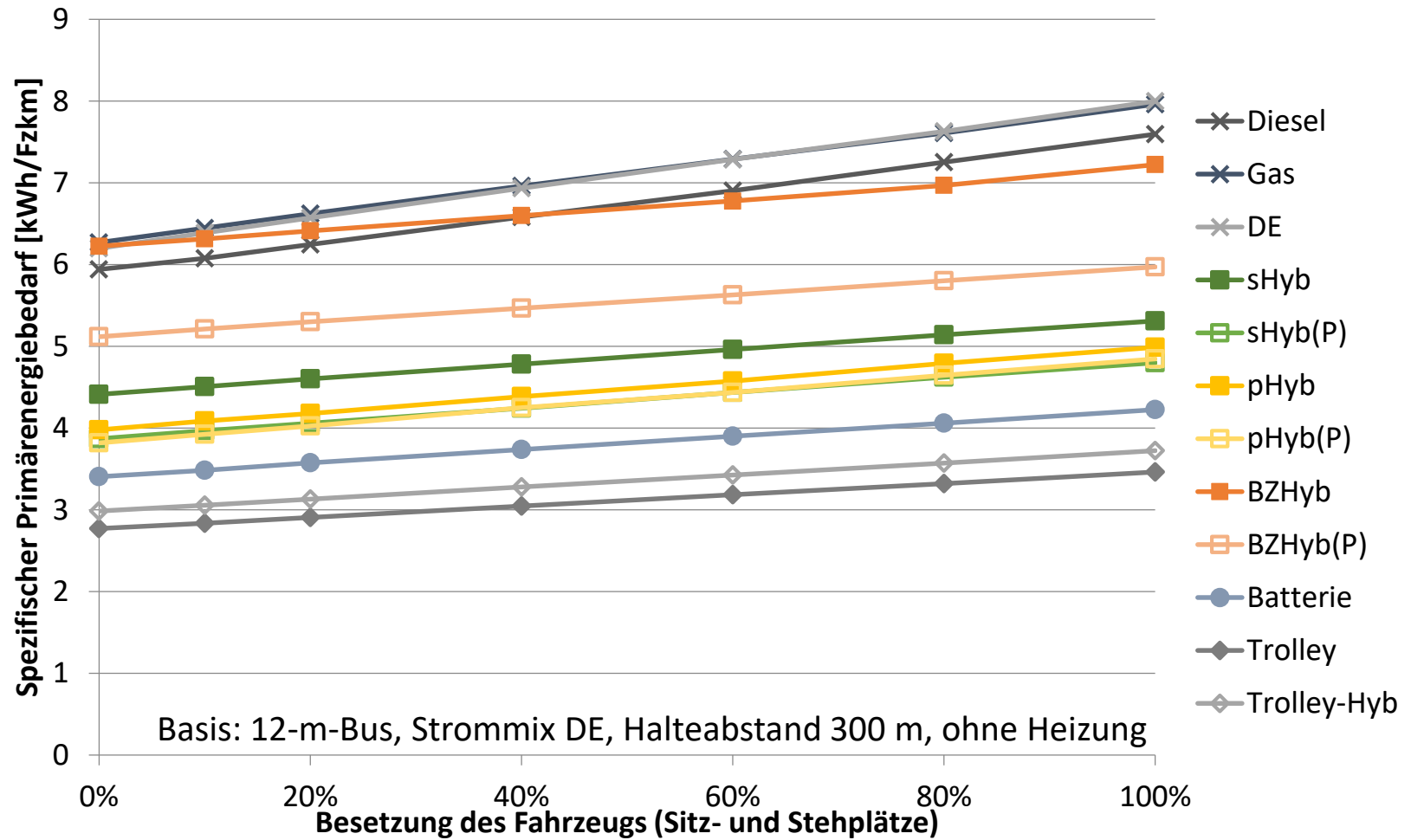
Einfluss des Halteabstands (1)



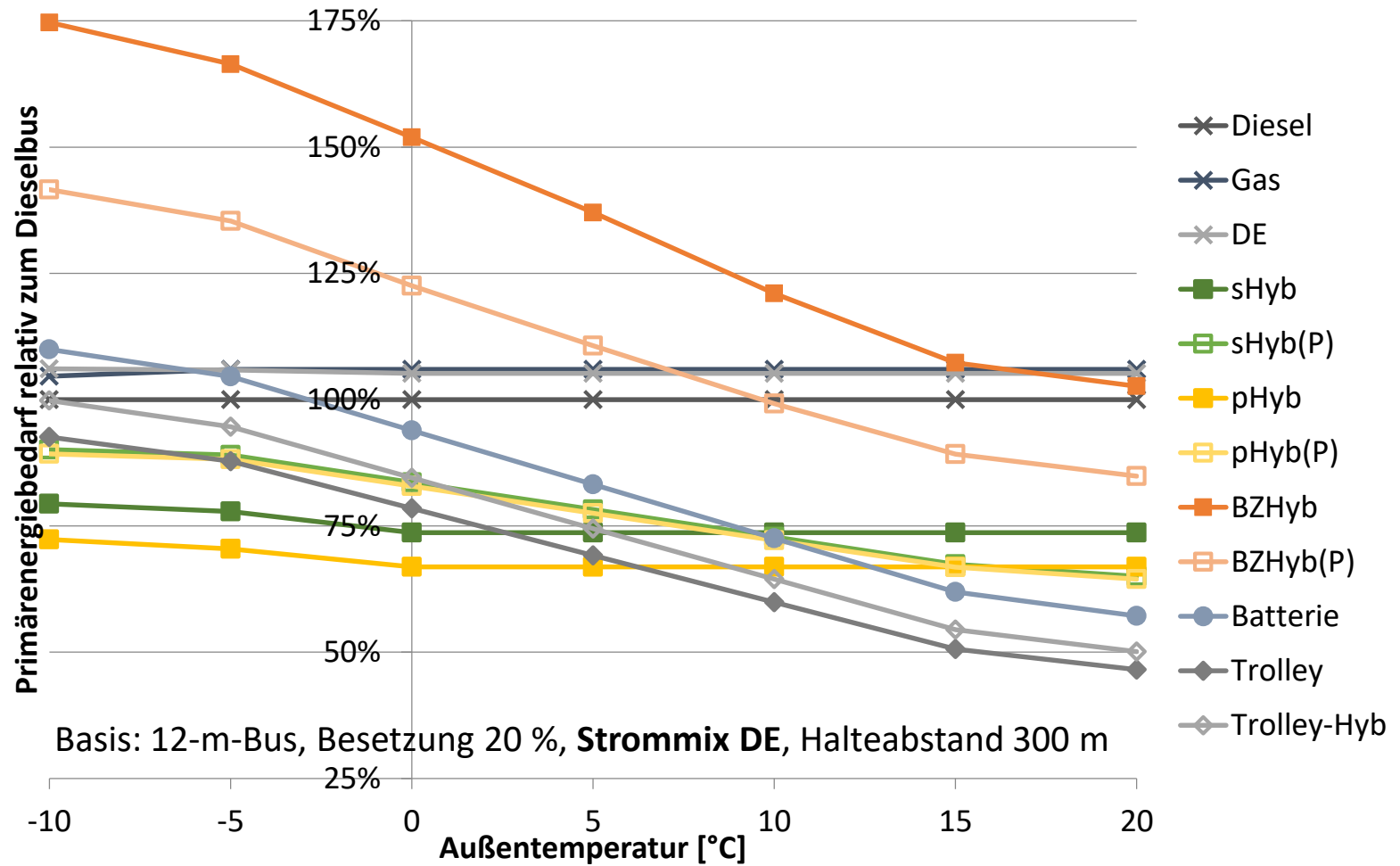
Einfluss des Halteabstands (2)



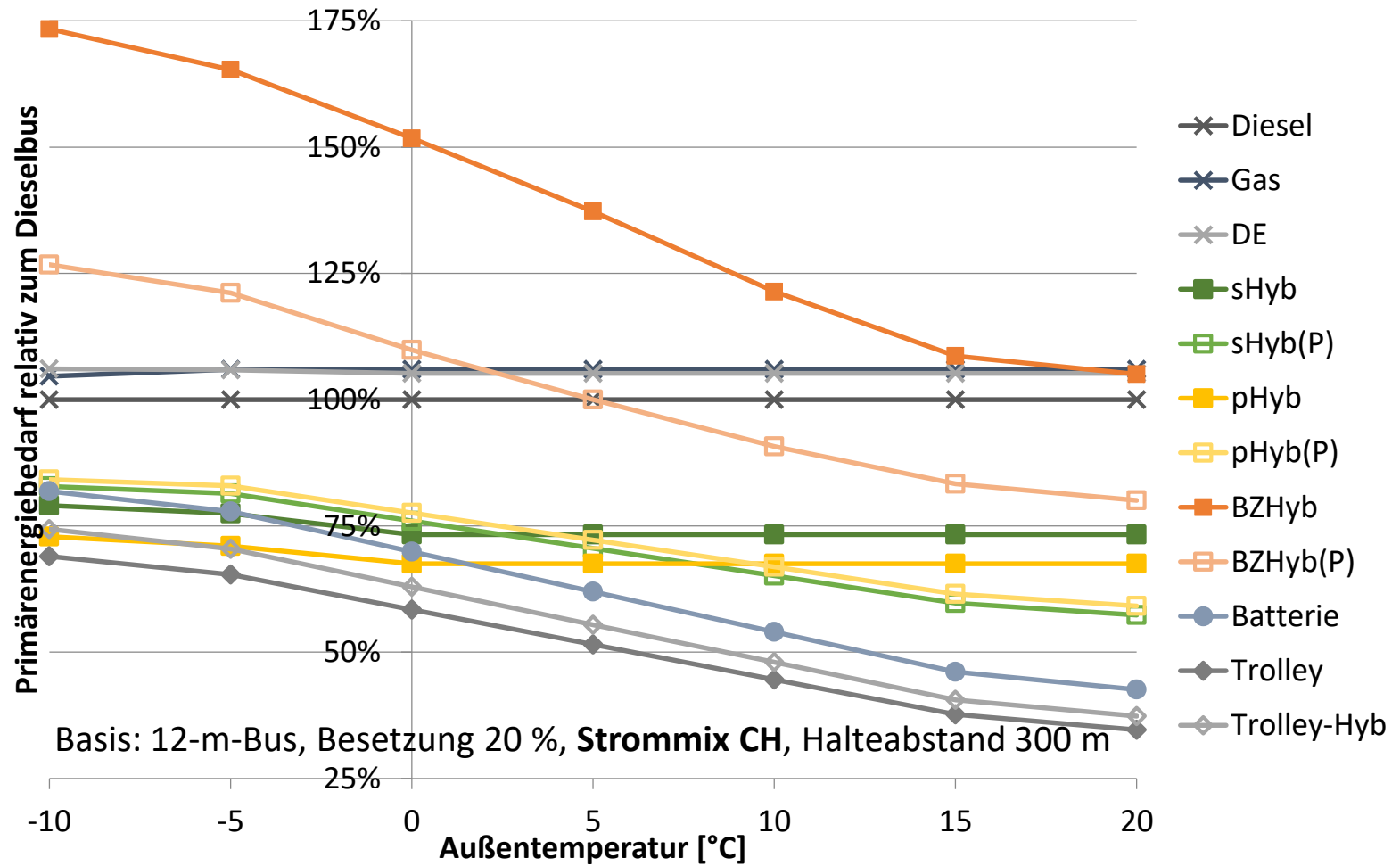
Einfluss der Besetzung



Einfluss der Außentemperatur (1)

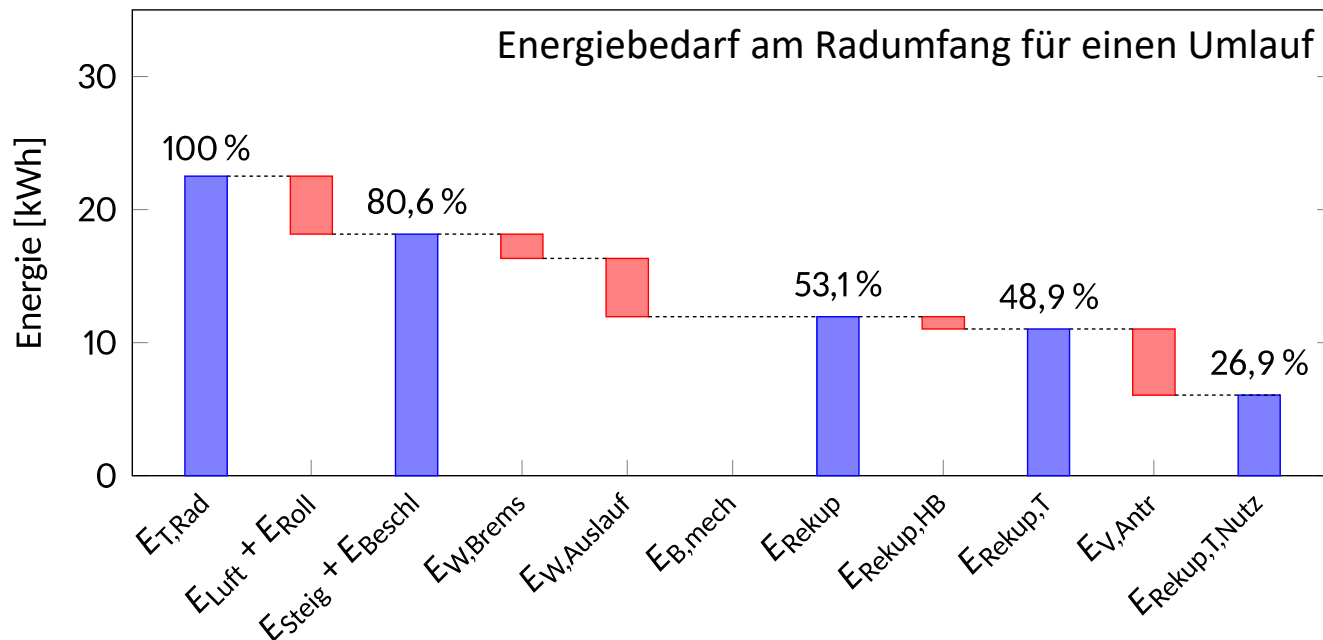


Einfluss der Außentemperatur (2)



Rekuperationspotenzial

- Beispiel: Linie 61 der Verkehrsbetriebe Zürich
 - Gelenkbus (18 m), mittlere Besetzung Mo-Fr (Betriebsjahr) 20,6 %
 - Linienlänge 7,4 km, nahezu ebenes Profil, Außentemperatur 10,6 °C
 - Diesel-Parallelhybridbus



Fallstudie Gotland

Linie 1 (Gråbo – Lasarettet) des Stadtverkehrs Visby

Länge: 10,0 km (8,3 km)
Fahrzeit: 30 min (25 min)



32 Haltestellen (mittlerer
Haltestellenabstand: 313 m)

Fallstudie Gotland

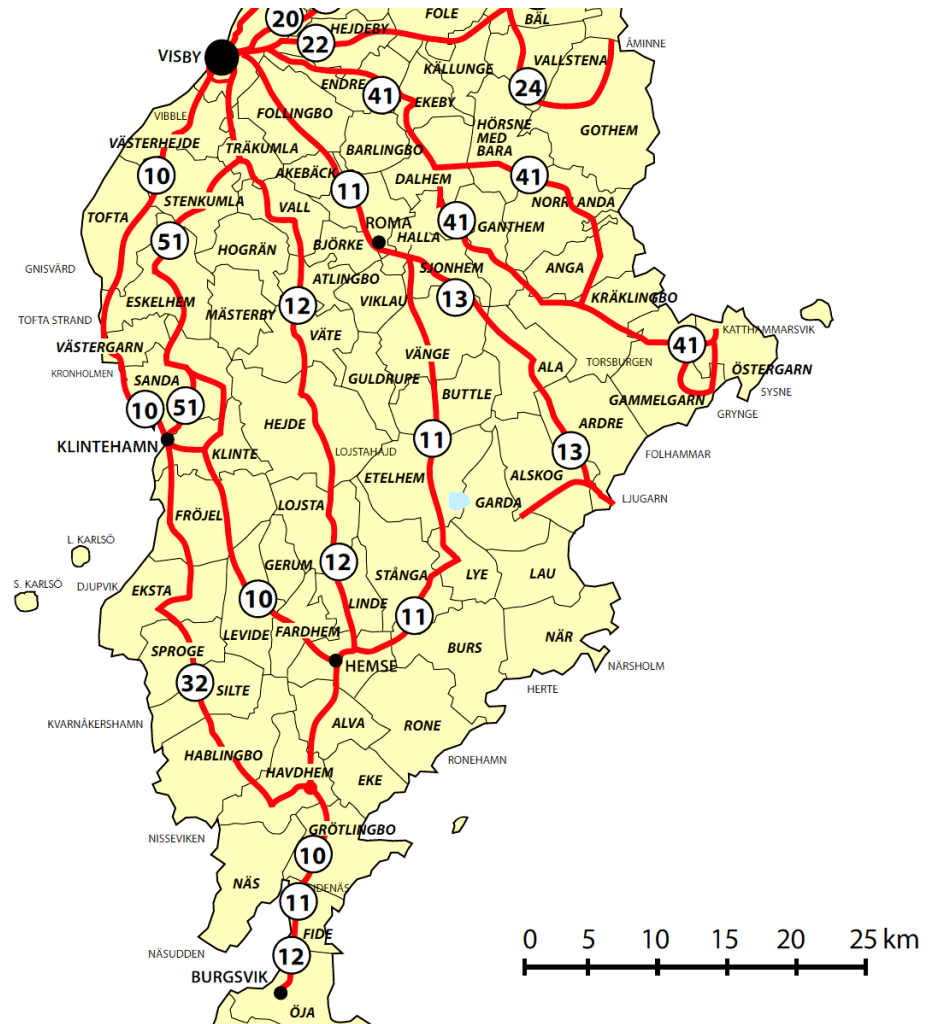
Linie 11 (Visby – Burgsvik
via Roma – Hemse)
des Überlandverkehrs

Länge: 83,4 km

Fahrzeit: 90 min

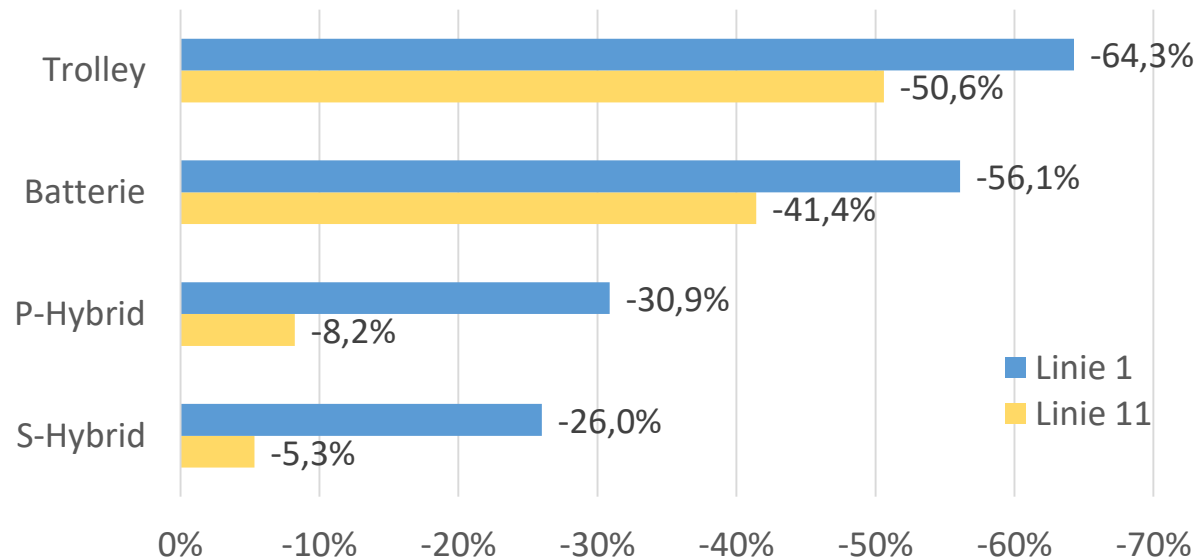
55 Haltestellen

Mittlerer Haltestellen-
abstand: 1517 m
(213 ... 6201 m)



Fallstudie Gotland – Ergebnis

- Vergleich des Primärenergiebedarfs:



- Hybridbusse lohnen sich nur im Stadtverkehr
- Elektrobusse: gute Energieeffizienz, aber wirtschaftliche Nutzung der Energieversorgungsinfrastruktur schwierig

Fallstudie Gotland – Ergebnis

Berechneter Traktionsenergiebedarf	Linie 1	Linie 11
Dieselbus: Kraftstoffverbrauch	44,7 l/100 Fzkm	33,8 l/100 Fzkm
Batteriebus: Spezifischer Energiebedarf	1,35 kWh/Fzkm	1,37 kWh/Fzkm
Batteriebus: Energiebedarf ab Speicher	24,8 kWh/Umlauf	228 kWh/Umlauf
Batteriebus: Energiebedarf/Betriebstag	−347 kWh (14 Uml.)	−684 kWh (3 Uml.)
Zwischenaufladung: 1 Ladestation mit 200 kW Ladeleistung	14 x 5 min = 1,2 h +240 kWh	3 x 30 min = 1,5 h +300 kWh
Saldo der Energieentnahme	−107 kWh	−384 kWh

- Stadtverkehr: kurze Umläufe -> regelmäßiges Laden möglich
- Überlandverkehr: Elektrobuseinsatz nicht praktikabel
 - Große Reichweiten gefordert (im Beispiel: 500 km/d)
 - Ladestation nur am zentralen Knotenpunkt sinnvoll (Auslastung!)

Fazit

- Energieeffizienteste Systeme: Trolleybus, Trolley-Hybridbus und Batteriebus
 - Primärenergiebedarf 60 ... 70 % geringer als beim Dieselbus
 - Aber: Bei niedrigen Außentemperaturen Energiemehrbedarf!
 - Aufwändige Infrastruktur für Energieversorgung erforderlich
 - Großer Einfluss des Strommixes auf Energiebedarf und Emissionen
- Halteabstand und Außentemperatur haben großen Einfluss auf den Energiebedarf
- Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere auf dem Gebiet der „grauen“ (indirekten) Energie, z. B.
 - Energiebedarf für Errichtung, Betrieb und Rückbau der Infrastruktur
 - Energiebedarf für Herstellung und Rezyklierung der Batterien

Literatur

Michael Schwertner:

Energetischer Systemvergleich von Diesel-, Hybrid- und Elektrobussen. Diss. ETH Nr. 24573, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, IVT Schriftenreihe 177, Zürich, 2017



michael.schwertner@gotland.se