

# ENERGETISCHER SYSTEMVERGLEICH VON DIESEL-, HYBRID- UND ELEKTROBUSSEN

04.10.17

IVT-Seminar zur Dissertation von Michael Schwertner

# Inhalt

2

- Historischer Abriss
- Forschungsfrage
- Modellbildung
  - ▣ Berechnungsmodell
  - ▣ Vergleichsmethodik
- Fallstudien
  - ▣ Fallstudie VBZ-Buslinien
  - ▣ Generische Fallstudien
- Schlussfolgerungen
- Ausblick



# Historischer Abriss

# Historischer Abriss

4

- 1881: Erste elektrische Strassenbahn
- 1882: Siemens Electromote: erster «Trolleybus»
- Meilensteine Schweiz:
  - ▣ 1912: Fribourg – Posieux: Erste Trolleybuslinie
  - ▣ 1932: Erste «neuzeitliche» Trolleybuslinie (Lausanne)
- 1930er-Jahre: Beginn des Niedergangs der Strassenbahn – Ersatz durch Trolley- und Dieselbusse
- Trolleybussystem:
  - ▣ 1930 – 1945: Ausbreitungsphase
  - ▣ 1960 – 1980: Phase des Niedergangs
  - ▣ seitdem: Stabilisierung (ca. 300 aktive Systeme weltweit)

# Historischer Abriss

5

- Versuche mit anderen Systemen:
  - Gyrobus Yverdon (1953 – 1960)
  - Batteriebusse: Einzelne Versuche um 1970 – 1980
- Neue Ansätze in den 1990er Jahren:
  - Dieselelektrischer Bus (1994)
  - Hybridbus MB O 405 NÜH (1996)
  - Erdgas- und Biogasbus
- Weiter zunehmende Systemvielfalt ab 2000:
  - Brennstoffzellenbus (Projekt CUTE)
  - Brennstoffzellen-Hybridbus
  - Batteriebus mit Zwischenaufladung



**Forschungsfrage & Modellbildung**

# Energiebedarf – ist das wichtig?

7

- Beispiel VBZ – Energiebedarf Traktion (2015)
  - etwa 80 % der Verkehrsleistung elektrisch erbracht
  - 80 GWh Elektroenergie + 7 Mio. Liter Dieselkraftstoff
  - Kosten: 15 Mio. CHF = 12 % des Sachaufwands
- Herausforderungen:
  - Abhängigkeit von fossilen Energieträgern
  - Zunehmende Schwankungen der Energiepreise
  - Reduktion von Emissionen

# Forschungsfrage

8

*Ist es möglich, eine Methodik zu entwickeln, die den Energiebedarf sowie die Emissionen aller derzeit eingesetzten Antriebssysteme auf einheitlicher Basis vergleichbar berechnet und damit die Wahl des geeignetsten Antriebssystems für gegebene Einsatzbedingungen massgeblich unterstützt?*

# Modellbildung: Berechnungsmodell

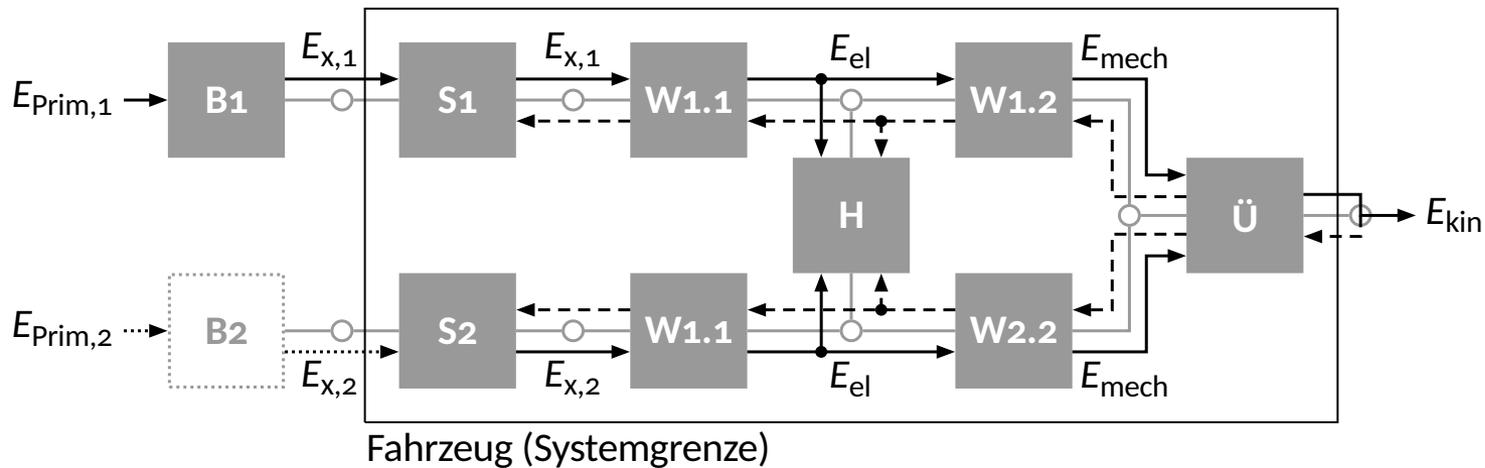
9

- Vergleich von 12 verschiedenen Antriebssystemen:
  - ▣ Nichtelektrisch: Diesel- und Gasbus
  - ▣ Teilelektrisch
    - Dieselelektrischer Bus
    - Serieller Dieselhybridbus, ohne/mit Zwischenaufladung (ZA)
    - Paralleler Dieselhybridbus, ohne/mit ZA
    - Brennstoffzellen-Hybridbus, ohne/mit ZA
  - ▣ Vollelektrisch
    - Trolley- und Trolley-Hybridbus
    - Batteriebus

# Modellbildung: Berechnungsmodell

10

## □ Generisches Modell:



Subsysteme

B: Bereitstellung, S: Speicher, W: Wandler, Ü: Übertragung, H: Hilfsbetriebe

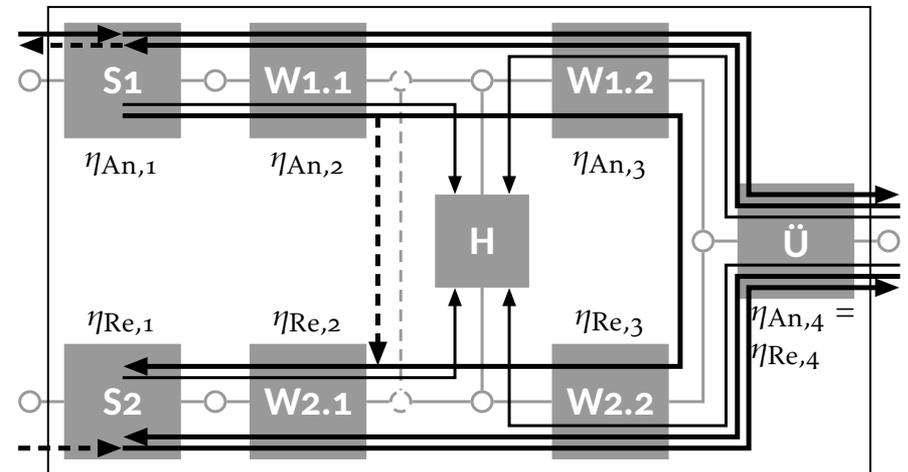
# Modellbildung: Berechnungsmodell

11

## □ Leistungs-/Energieflüsse

## □ Berechnung im Zeitschrittverfahren

- 1. Fahrwiderstandskräfte am Rad
- 2. Leistungsbedarf am Rad
- 3. Leistungsbedarf ab Speicher
- 4. Energiebedarf ab Speicher



# Modellbildung: Vergleichsmethodik

12

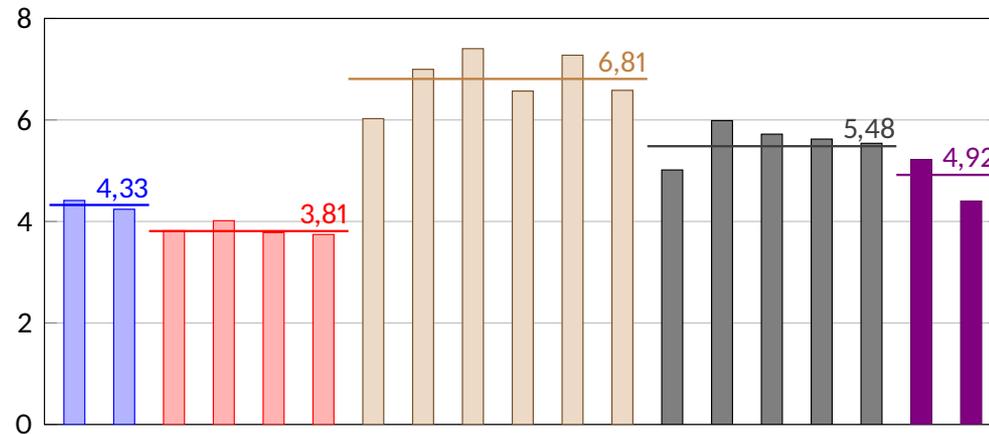
- Eingangsrößen: Halteabstände, zulässige Geschwindigkeiten, Neigungen, Fahrzeugdaten, Fahrgastzahlen
- Drei Hauptschritte der Berechnung:
  - ▣ Berechnungsmodell liefert Energiebedarf ab Speicher
  - ▣ Division durch Bereitstellungswirkungsgrade ergibt Primärenergiebedarf
  - ▣ Multiplikation mit Emissionsfaktoren ergibt THG- und Schadstoffemissionen



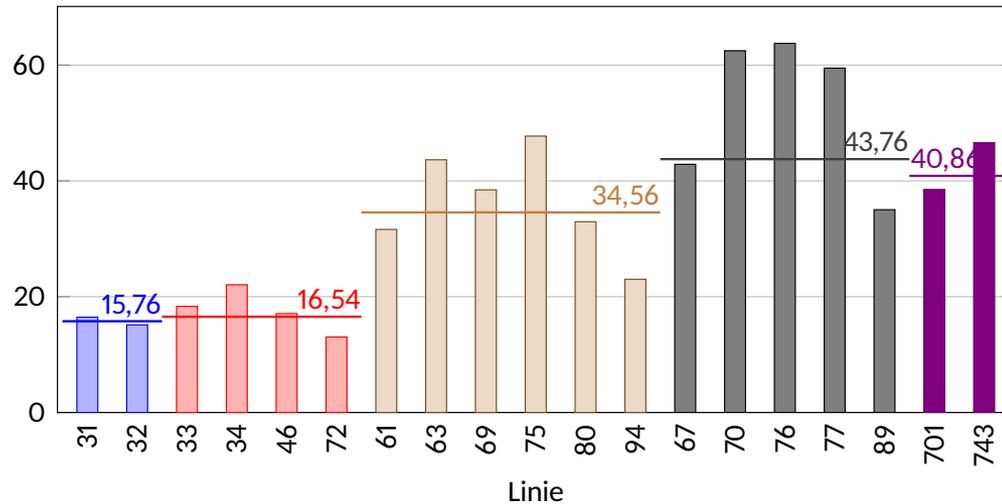
# Ausgewählte Ergebnisse

# Fallstudie VBZ-Buslinien

Spezif. Primär-  
energiebedarf  
[kWh/Fzkm]



Spezif. Primär-  
energiebedarf  
[kWh/100 Pkm]

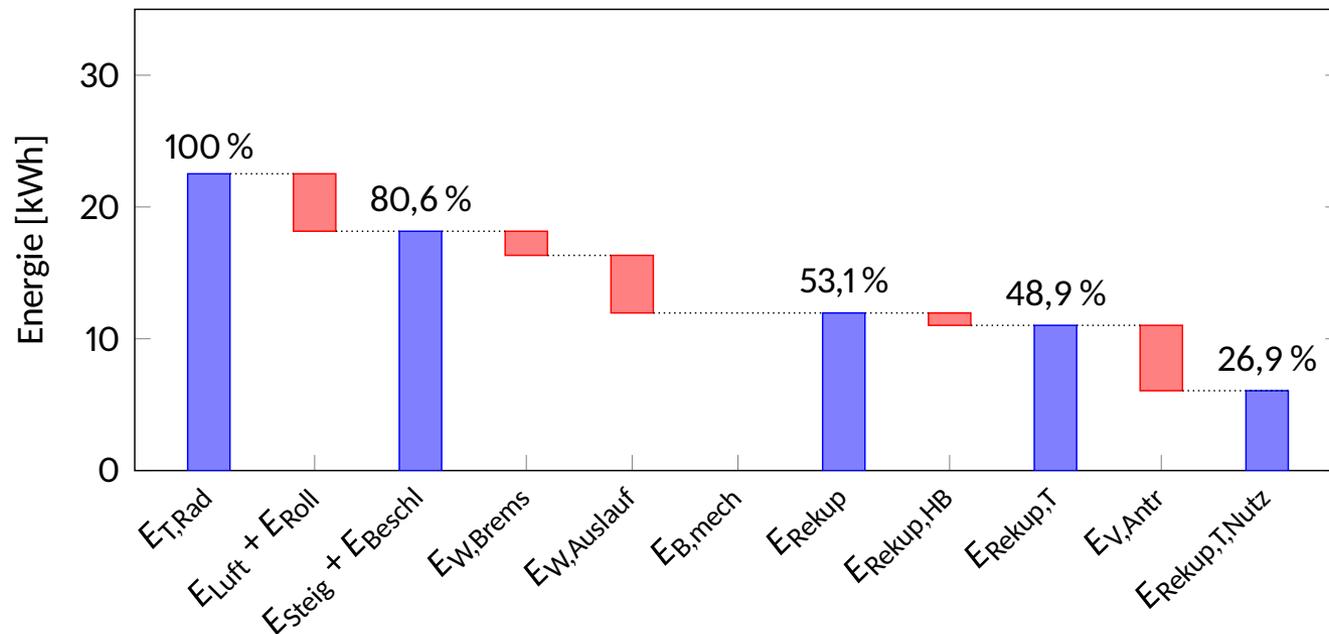


- Trolley (DG)
- Trolley (Gelenk)
- Diesel (Gelenk)
- Diesel (Solo)
- Agglo

# Fallstudie VBZ-Buslinien

15

- Anteil der rekuperierten Energie – Beispiel Linie 61:



Fahrzeug: Diesel-Parallelhybrid-Gelenkbus

Basis: 1 Umlauf, Besetzung 20,6 %, Aussentemperatur 10,1 °C

# Generische Fallstudien

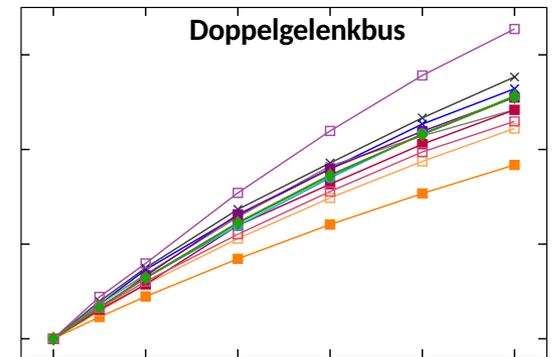
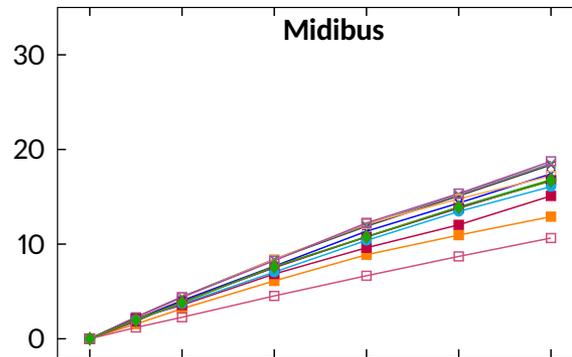
16

- Analyse des Einflusses verschiedener Parameter auf den Energiebedarf:
  - ▣ Halteabstand, mit und ohne Auslauf
  - ▣ Neigung: 2 Höhenprofile
  - ▣ Besetzung
  - ▣ Aussentemperatur
- Zusätzliche Betrachtung:
  - ▣ Rekuperationsgrad (nur Trolleybus)
  - ▣ Gesamtwirkungsgrad des Fahrzeugs

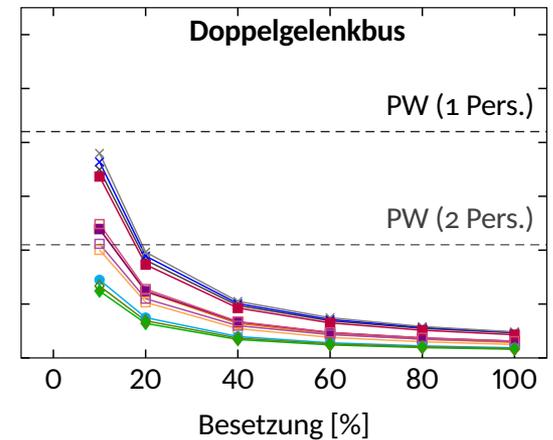
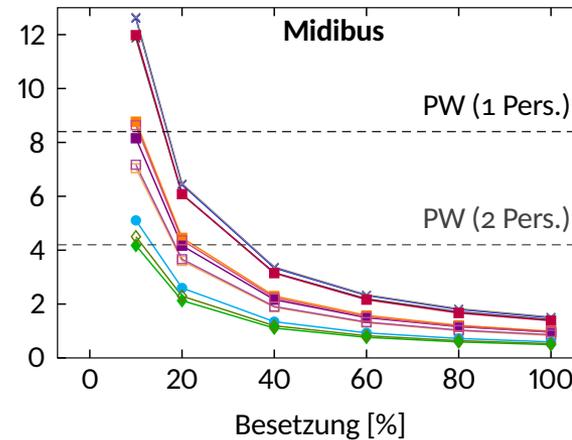
# Generische Fallstudien

## □ Beispiel: Einfluss der Besetzung

Anteil der Zuladung  
am Energiebedarf [%]



Spezif. Primär-  
energiebedarf  
[ $L_{D\ddot{A}}/100$  Pkm]

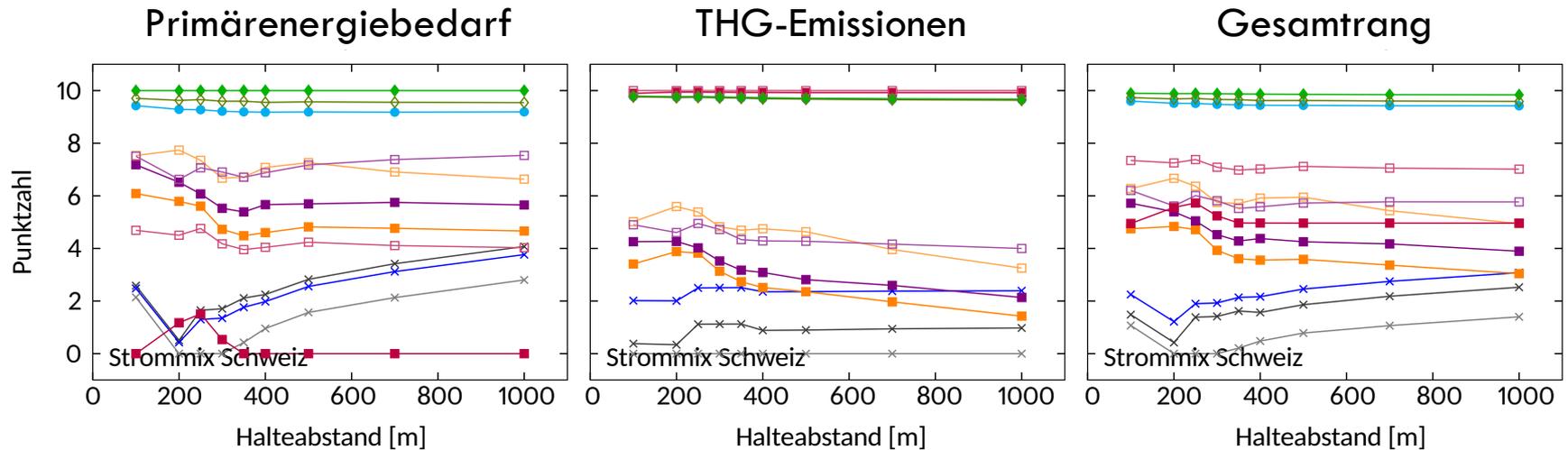


- x— D    —x— G    —x— DE    —■— SHy    —■— SHy(P)    —■— PHy
- PHy(P)    —■— BZHy    —■— BZHy(P)    —●— Batt    —●— Tro    —◇— TroHy

# Generische Fallstudien

- Ergebnisse als Rangfolge (schlechtester Wert: 0, bester Wert: 10) am Beispiel des Halteabstands

## Strommix Schweiz

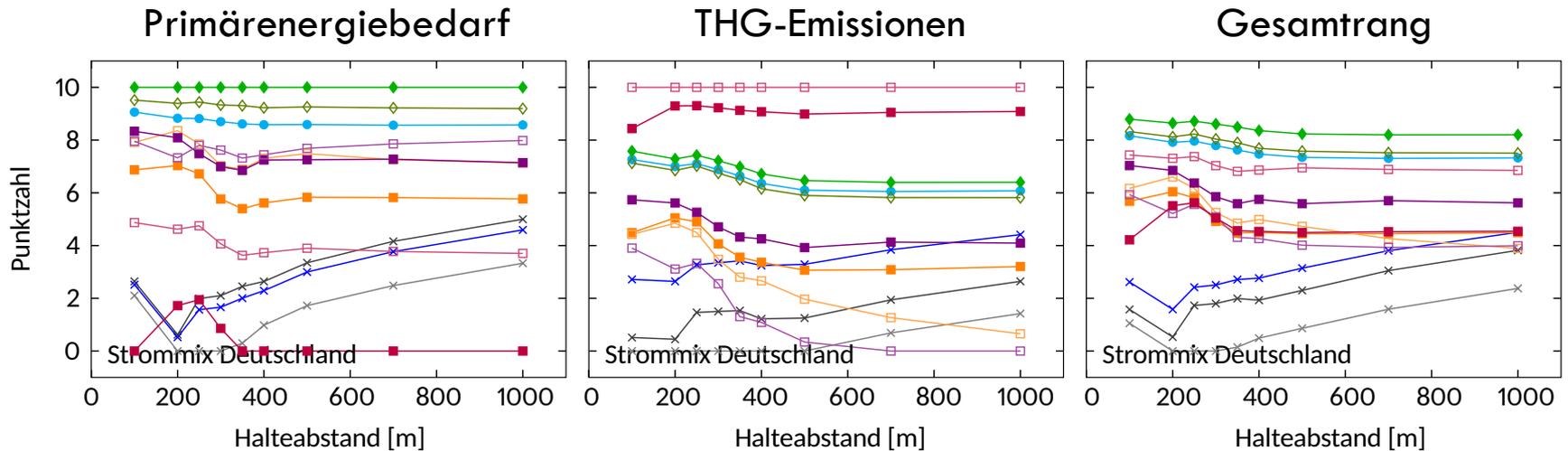


—x— D	—x— G	—x— DE	—■— SHy	—■— SHy(P)	—■— PHy
—■— PHy(P)	—■— BZHy	—■— BZHy(P)	—●— Batt	—◆— Tro	—◆— TroHy

# Generische Fallstudien

- Ergebnisse als Rangfolge (schlechtester Wert: 0, bester Wert: 10) am Beispiel des Halteabstands

## Strommix Deutschland



—x— D	—x— G	—x— DE	—■— SHy	—■— SHy(P)	—■— PHy
—■— PHy(P)	—■— BZHy	—■— BZHy(P)	—●— Batt	—◆— Tro	—◆— TroHy

# Exkurs: Näherungsverfahren

20

- Ableitung aus den generischen Fallstudien
- Ergebnis: Energiebedarf für vorgegebene Fahrstrecke
- Berechnung mit spezifischen Größen in Wh/Btkm
- Basis: Energiebedarf bei mittlerem Halteabstand, ebener Strecke und 20 % Besetzung
- Addition von Energiebedarf für Steigungen, Besetzung und Heizung
- Genauigkeit  $\pm 15 \%$

# Einige Schlussfolgerungen

21

- Energieeinsparung im Vergleich zum Diesibus
  - ▣ Trolley-, Trolley-Hybrid-, Batteriebus: 50 ... 70 %, aber bei sehr niedrigen Aussentemperaturen Mehrbedarf!
  - ▣ Dieselhybridbus: 10 ... 35 %, BZ-Hybridbus: -10 ... 5 %
- Emissionsreduktion (THG) gegenüber Diesibus:
  - ▣ Trolley-, Trolley-Hybrid-, Batteriebus: 90 ... 95 %
  - ▣ Dieselhybridbus: 10 ... 35 %, BZ-Hybridbus: 95 %
- Strommix hat grossen Einfluss bei vollelektrischen Antriebssystemen
- Höhere Auslastung steigert Umweltvorteil des ÖV

- Weiterer Forschungsbedarf:
  - ▣ Verfeinerung des Berechnungsmodells
  - ▣ Graue Energie genauer quantifizieren
  - ▣ Weitere Messungen des Heizenergiebedarfs
- Bereits hoher Anteil von Elektromobilität im ÖV, aber weitere Elektrifizierung unausweichlich:
  - ▣ Stichwort «Dieselkrise»
  - ▣ Emissionsreduktion
  - ▣ Abhängigkeit von fossiler Energie verringern

**Elektromobilität, bewährt  
seit Jahrzehnten**



**Dem aufmerksamen Publikum sei herzlich gedankt!**