

Elektrifizierung des nicht-schiene- gebundenen städtischen öV

Prof. Dr. Ulrich Weidmann

Dipl. Ing. Michael Schwertner

ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)



Inhalt

- Historischer Abriss
- Gegenüberstellung der Antriebssysteme
- Fallstudie VBZ-Quartierbuslinien
- Versuch einer Zwischensynthese

Grundlage: Forschungsprojekt des BFE

Entwicklung einer ganzheitlich orientierten Beurteilungsmethodik für strassengebundene öV-Systeme, welche es ermöglicht, das optimale Verkehrsmittel unter energetischen, betrieblichen, technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu wählen, unter Einbezug der Eigenschaften schienengebundener Verkehrssysteme des städtischen Nahverkehrs. Ergebnisse:

- Systematik der nicht-spurgeführten Nahverkehrssysteme, insbesondere im Hinblick auf Energiezuführung, -umwandlung und -speicherung
- Beurteilungsmethodik
- Relevante Kenngrößen und deren Schwellenwerte für energetische, betriebliche, technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte
- Validierung von Methodik und Kenngrößen anhand ausgewählter Fallbeispiele

Aufgabe ist Doktorarbeit von Herrn Michael Schwertner; Abschluss: Mitte 2016



Historischer Abriss

Elektromobilität – fast 135 Jahre Tradition im öV

- 1881: Erste elektrische Strassenbahn
- 1882: Siemens Electromote: erster «Trolleybus»
- 1912: Fribourg – Posieux: Erste Trolleybuslinie der Schweiz
- 1932: Erste «neuzeitliche» Trolleybuslinie der Schweiz (Lausanne)
- 1930er Jahre: Beginn des Niedergangs der Strassenbahn, Ersatz durch Trolley- und Dieselsebusse, z.B.:
 - Frankreich von ca. 70 (1935) auf 6 (1971) Tramsysteme
 - Schweden von 11 (1940) auf 3 (1972) Tramsysteme

Elektrische Bussysteme

- Ausbreitung des Trolleybussystems von 1930 bis 1945
 - geringere Investitionen gegenüber Strassenbahn
 - zuverlässiger und billiger im Betrieb als Dieselbusse
 - Stahl- und Kraftstoffmangel aufgrund Kriegswirtschaft
- Danach: Niedergang in der westlichen Welt ab 1960
 - Fahrzeuge und Infrastruktur erneuerungsbedürftig
 - Dieselbusse billiger und zuverlässiger wegen Massenproduktion
- Gyrobus Yverdon (1953 – 1960)
- Einzelne Versuche mit Batteriebusen, z.B.:
 - Mercedes Benz OE 302 (1969)
 - Elektrobusse mit Batterieanhänger (1975 – 1981, Mönchengladbach und Düsseldorf)

Elektrische Bussysteme

- Neue Ansätze in den 1990er Jahren:
 - Schwungmassespeicher in Trolleybussen (Basel, 1992)
 - 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
- Ausserdem:
 - «Renaissance» der Strassenbahn seit Ende der 1980er Jahre
 - BRT und BHLS: Bus dringt stärker ins Einsatzfeld der Trams vor
 - Weiterentwicklung des Trolleybussystems



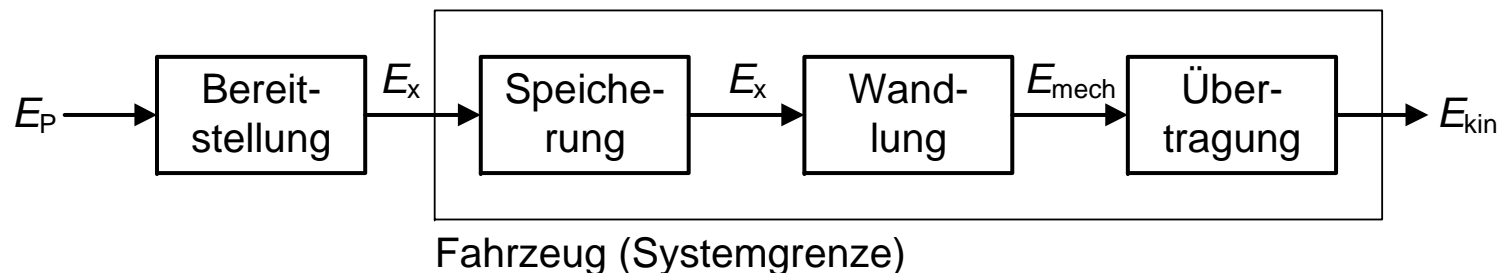
Gegenüberstellung der Antriebssysteme

Bestimmungsgrößen des Energiebedarfs

- Technisch:
 - Fahrzeugleergewicht
 - Konfiguration des Antriebsstrangs, v.a.
 - Wirkungsgrade
 - Rückspeisefähigkeit
 - Speichertyp
- Betrieblich:
 - Fahrgastnachfrage (Auslastung)
 - Fahrprofile (Anzahl Halte, erreichte Geschwindigkeiten, ...)
 - Laufleistung, bestimmt durch
 - Reisegeschwindigkeit
 - Wendezeiten
 - Betriebsdauer
 - Linienlänge

Systemanalyse

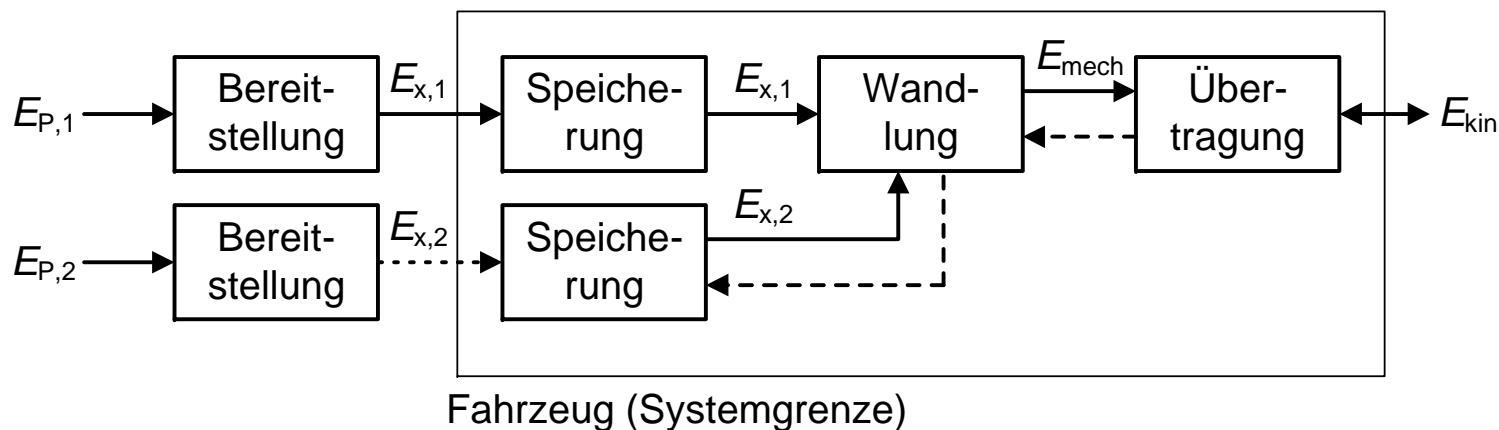
- Ziel: Übersicht gewinnen, Vergleichbarkeit schaffen
- Betrachtung des Systems «Fahrzeug»
- Gliederung in drei Subsysteme:
 - Speichersystem
 - Wandlungssystem
 - Übertragungssystem



- Zusätzlich: Bereitstellungssystem (für Abschätzung des Energiebedarfs)

Herangehensweise

- Schema berücksichtigt keine hybriden Antriebskonzepte
=> Erweiterung nötig:



- Berücksichtigung der Energierückgewinnung beim Bremsen

Ausführungsformen der Subsysteme (Beispiele)

Speicherung

chemisch

Kraftstofftank

- Dieseltank
- Gasdruckbehälter

elektrochemisch

Akkumulator

- Li-Ion-Akkumulator
- NaS-Akkumulator

elektrostatisch

Kondensator

- Super-/Ultracaps

mechanisch

Schwungmasse

Wandlung

chem.->therm.->mech.

Verbrennungsmotor

- Dieselmotor
- Ottomotor

chem.->elektr.

Brennstoffzelle

elektr.->mech.

Elektromotor

- Gleichstrommotor
- Asynchronmotor

mech.->elektr.

Generator

Übertragung

mech.->mech., variable Übersetzung

Stufengetriebe

- Schaltgetriebe
- Automatikgetriebe

mech.->mech., feste Übersetzung

Untersetzungsgetriebe

Gelenkwelle

Rad

Vom Subsystem zum Antriebsstrang

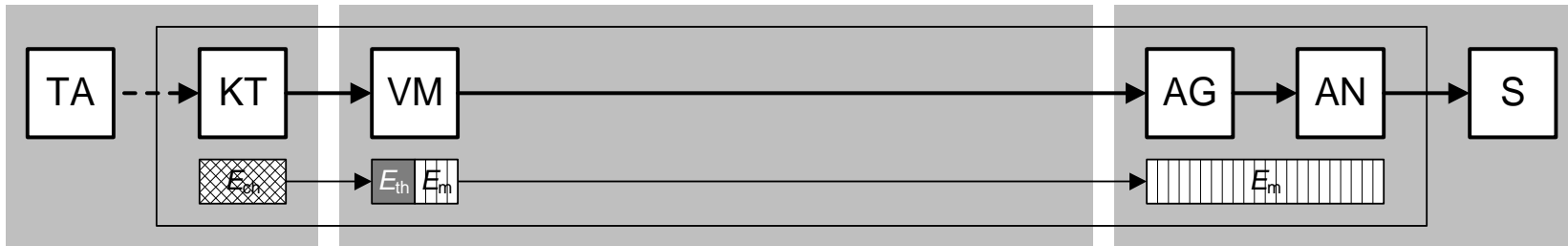
- Wandlerungssystem bestimmt Speichersystem
- Wandlerungssystem kann aus mehreren Subsystemen bestehen, z.B.:
 - Dieselmotor + Generator + Elektromotor
 - Brennstoffzelle + Elektromotor
- Anzahl Speichersysteme
 - 0: Trolleybus (Sonderfall, kontinuierliche Energiezuführung)
 - 1: verbreitetste Variante (v.a. Dieselbus)
 - >1: Hybridbus
- Bidirektionale Energieflüsse nur bei (teil)elektrischem Antriebsstrang möglich

Realisierte Antriebskonfigurationen

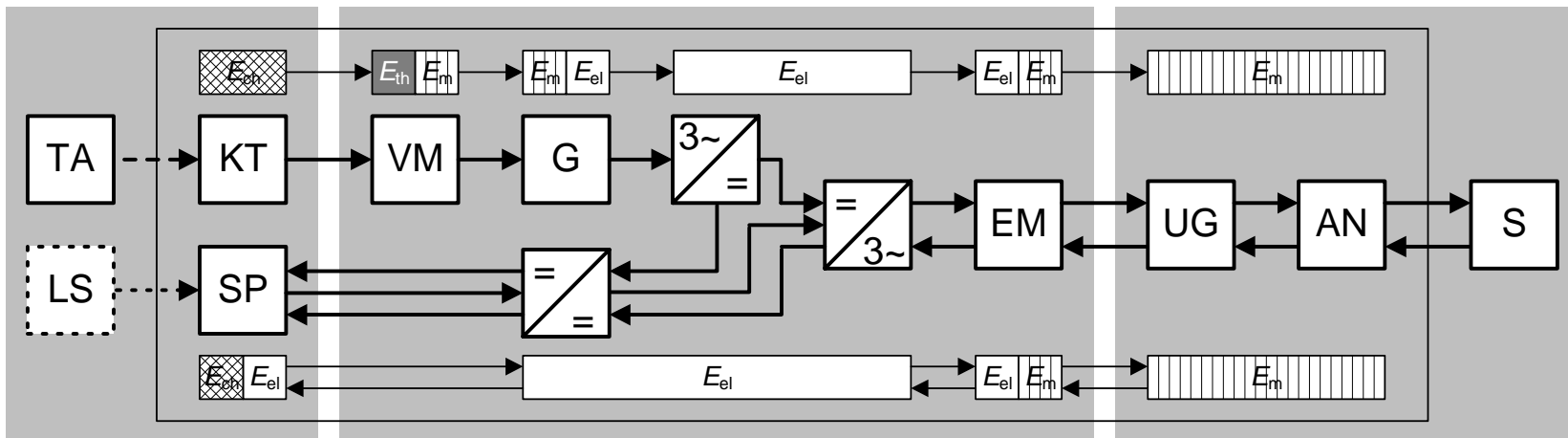
- Aktuell in Serienfertigung:
 - Dieselbus, Gasbus
 - Trolleybus
 - Dieselhybridbus, seriell und parallel
- Aktuelle Betriebsversuche:
 - Batteriebus (mit Zwischenaufladung)
 - Brennstoffzellen-Hybridbus
- Frühere Betriebsversuche:
 - Gyrobus
 - Deselelektrischer Bus
 - Brennstoffzellenbus (Direktantrieb ohne Batterie)
- Spezialfall: Duobus

Beispiele für Energieflüsse im Antriebsstrang

- Diesel- und Gasbus:

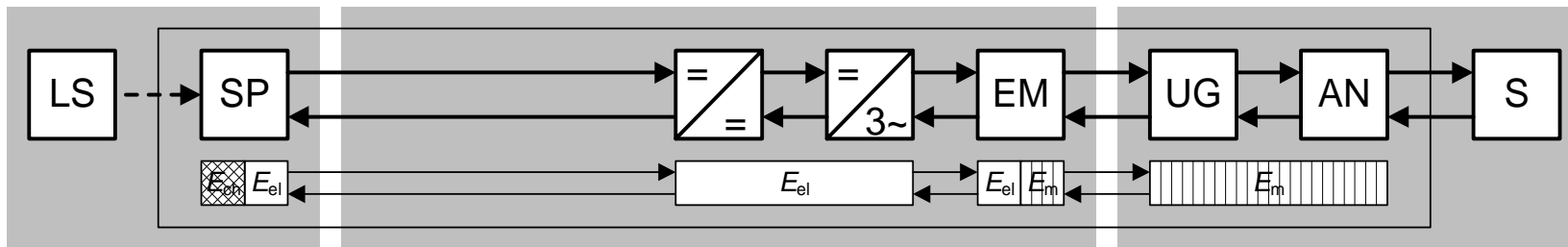


- Dieselhybridbus (seriell):

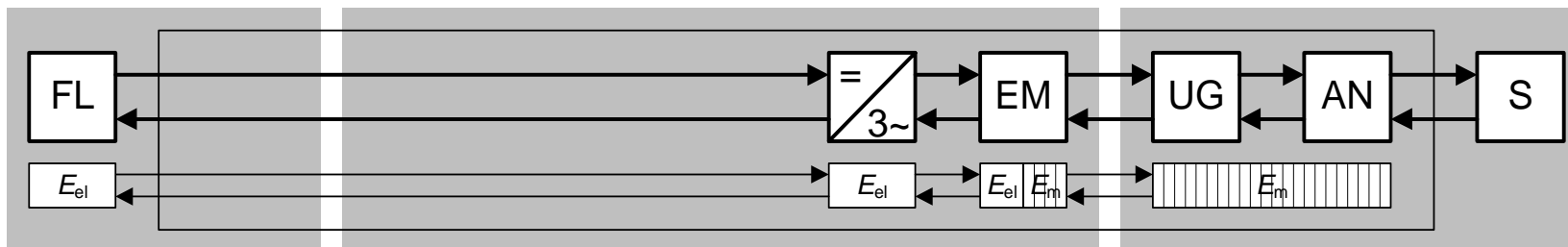


Beispiele für Energieflüsse im Antriebsstrang

- Batteriebus:



- Trolleybus:



Wirkungsgradketten

- **Antreiben (von Speicher bis Rad):**

Modus "Antreiben"	Wirkungsgrad											Gesamt
	KT	SP	VM	BZ	G	=/=	3~/=	=/3~	EM	UG	AN	
Dieselbus	1.00		0.37							0.93	0.94	0.32
Gasbus	1.00		0.34							0.93	0.94	0.30
Dieselhybridbus (seriell)	1.00		0.40		0.93		0.98	0.98	0.93	0.95	0.94	0.30
Dieselhybridbus (parallel)	1.00		0.37							0.93	0.94	0.32
Brennstoffzellenbus	0.98			0.55			0.98	0.98	0.93	0.95	0.94	0.43
Brennstoffzellen-Hybridbus	0.98			0.55			0.98	0.98	0.93	0.95	0.94	0.43
Batteriebus		0.80				0.98			0.98	0.93	0.95	0.64
Trolleybus								0.98	0.93	0.95	0.94	0.81

- **Rückspeisen (von Rad über Speicher zu Rad):**

Modus "Rekuperation"	Wirkungsgrad											Gesamt
	AN	UG	EM	3~/=	=/=	SP	=/=	=/3~	EM	UG	AN	
Dieselbus												0.00
Gasbus												0.00
Dieselhybridbus (seriell)	0.94	0.95	0.93	0.98	0.98	0.80	0.98	0.98	0.93	0.95	0.94	0.51
Dieselhybridbus (parallel)	0.94	0.93	0.93	0.98	0.98	0.80	0.98	0.98	0.93	0.93	0.94	0.49
Brennstoffzellenbus												0.00
Brennstoffzellen-Hybridbus	0.94	0.95	0.93	0.98	0.98	0.80	0.98	0.98	0.93	0.95	0.94	0.51
Batteriebus	0.94	0.95	0.93	0.98	0.98	0.80	0.98	0.98	0.93	0.95	0.94	0.51
Trolleybus	0.94	0.95	0.93	0.98		0.80		0.98	0.93	0.95	0.94	0.53

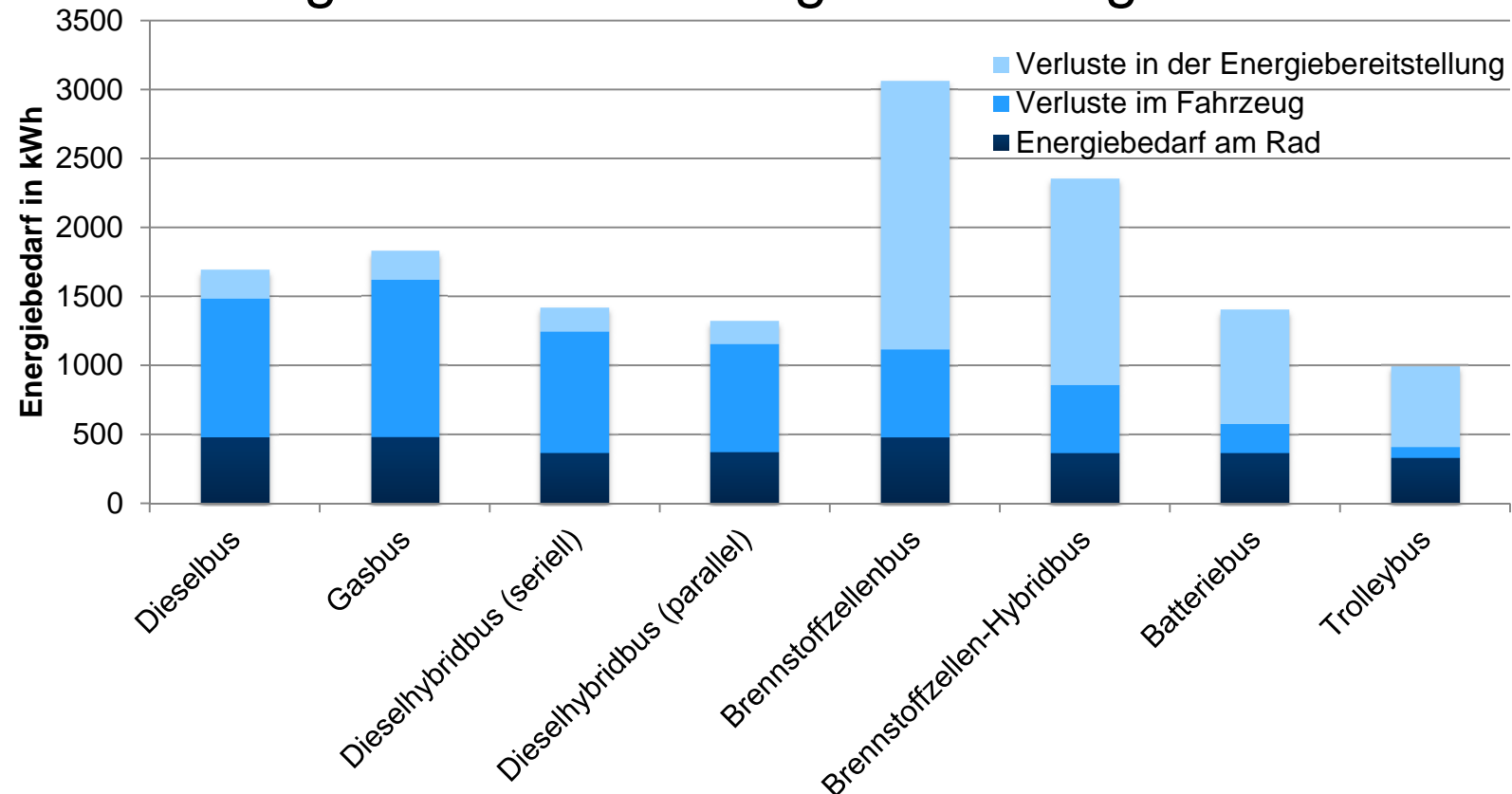
Achtung: Alle Werte sind nur bestmögliche Schätzungen!

Energiebedarf der Hilfsbetriebe

- Kann bis zu 50 % des Gesamtenergiebedarfs ausmachen
- Thematik bislang unterrepräsentiert, denn
 - Dieselbusse dominieren den Markt
 - Tankinhalt ist kein begrenzender Faktor (hohe Energiedichte des Dieselkraftstoffs)
 - Energiebedarf für Klimatisierung, Beleuchtung, ... geht im Gesamtverbrauch unter, da keine getrennte Erfassung
 - Abwärme des Motors ist «kostenlose» Heizenergie
- Zukünftig aber viel bedeutsamer, weil
 - Traktionsenergiebedarf sinkt – bei gleichzeitig steigenden Komfortanforderungen
 - Energiedichte von Akkumulatoren auch auf lange Sicht viel kleiner als die fossiler Energieträger bleibt

Primärenergiebedarf (fiktive Modell-Linie)

- Betrachtung auf Systemebene *Fahrzeug* genügt nicht
=> Einbezug der Bereitstellungskette nötig





Fallstudie
VBZ-Quartierbusse

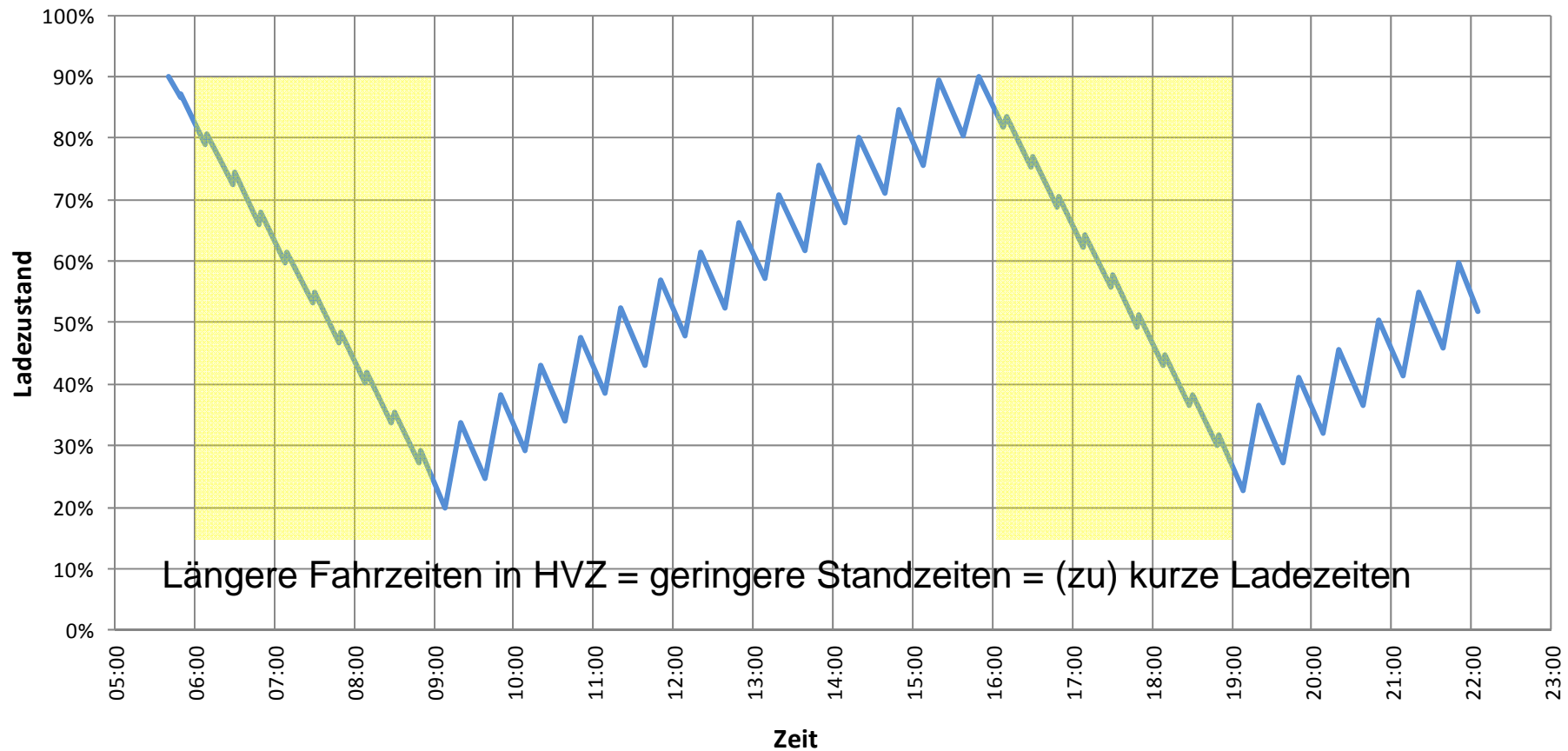
Batterie-Quartierbusse in Zürich – sinnvoll?

- Untersuchung im Rahmen der Masterarbeit von James Karrer im Frühjahrssemester 2014
- Charakteristika der 10 Quartierbuslinien
 - bilden kein zusammenhängendes Netz
 - 30-min-Takt => oft nur ein Fahrzeug im Umlauf
 - kurze Standzeiten
 - lange Einsatzzeiten für Fahrzeuge (bis 20 h pro Tag)
 - Höhendifferenzen bis 120 m
 - hohe Haltestellendichte
- Folgen
 - hoher Energiebedarf
 - kurze Standzeiten für Zwischenaufladung
 - geringe Ausnutzung der Ladeinfrastruktur, da wenige Fahrzeuge

Energiebedarfsabschätzung

- Tagesenergiebedarf unter Berücksichtigung der Rekuperation und folgender Verluste:
 - Fahrwiderstände (Luft und Rollreibung)
 - Wirkungsgradverluste (Beschleunigen & Bremsen, Höhendifferenzen)
 - Hilfsbetriebe (Klimaanlage, Türöffnung, Bildschirme etc.)
- Ansatz der ungünstigsten Verhältnisse (Kälte, schlechte Strassenverhältnisse)
- Bus muss auf allen Quartierlinien einsetzbar sein
- Laderegime:
 - 1 Ladestation an einer der Endhaltestellen
 - Gesamte Standzeit wird bei Ladestation konzentriert

Ladezyklen und Ladezustand der Batterie über einen Betriebstag (Werktag); Fallstudie Linie 40 (Bucheggplatz – Nordheim – Glaubtenstrasse)



Dimensionierung der Batterie

- Kaum Lademöglichkeit in HVZ = grosse Batterie: betrieblicher Energiebedarf 140 kWh
- Randbedingungen:
 - Ladeleistung 120 kW
 - Li-Ion-Akkumulatoren, Energiedichte 100 Wh/kg
 - Ladezustand soll nicht unter 20 % absinken, nicht über 90 % steigen
- => installierte Kapazität von 200 kWh nötig
- Erforderliche Batteriemasse: 2 t
 - Batteriebus ca. 1 t schwerer als Dieselbus
 - zulässige Achslasten werden nicht überschritten

Fazit

- Umstellung der Quartierbuslinien technisch grundsätzlich machbar
- Reduktion des Instandhaltungsaufwands durch Vereinheitlichung der Flotte erwartet
- Höhere Akzeptanz durch leise und umweltfreundliche Fahrzeuge
- Detailuntersuchungen im Rahmen eines KTI-Projekts angestrebt, insbesondere:
 - Bestimmen der Spezifikationen für Prototypen (Fahrzeug und Infrastruktur) mittels Simulationen
 - Rückwirkungen auf Energieversorgungsnetz
 - Sammeln und Auswerten von Messdaten aus Testeinsatz



Versuch einer Zwischensynthese

Synthese

- Keine Speichermedien absehbar, welche genügend elektrische Energie für ganzen Betriebstag zu akzeptablen Kosten und Gewichten speichern
- **Drei Grundansätze** scheinen praktikabel:
 - **Kontinuierliche Stromzufuhr** (Trolleybus); Kernfrage: Infrastrukturkosten und -akzeptanz
 - **Hybride Konzepte**; Kernfrage: Komplexität des Fahrzeuges, Wandlungsverluste
 - **Schnellaufladung**; Kernfrage: Betrieblich mögliche Ladedauer unter Berücksichtigung von Verspätungen
- Keine grundsätzlichen Hindernisse gegen weitergehende Elektrifizierung des strassengebundenen öV ersichtlich
- Aber: Allfällige (Fahrzeug-) Mehrkosten dürfen nicht zu (Fahr-)Leistungsabbau zwingen!