

DISS. ETH Nr. 24573

**Energetischer Systemvergleich
von Diesel-, Hybrid- und Elektrobussen**

Abhandlung zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN der ETH ZÜRICH

(Dr. sc. ETH Zürich)

vorgelegt von

Michael Schwertner

Dipl.-Ing., Technische Universität Dresden

geboren am 26.04.1979

von Deutschland

angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Ulrich Weidmann
Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan
Dr. Steffen Schranil

2017

Vorwort

Wenn von Elektromobilität die Rede ist, sind überwiegend Massnahmen öffentlichkeitswirksam, welche die Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs voranbringen sollen. Weniger bekannt ist hingegen, dass zum Themenfeld «Elektromobilität» auch zahlreiche Projekte des öffentlichen Verkehrs gehören, die das Ziel verfolgen, dessen Umweltfreundlichkeit weiter zu verbessern. Im Gegensatz zum schienengebundenen Stadtverkehr besteht im Busverkehr nach wie vor eine grosse Abhängigkeit von fossilen Energieträgern, weshalb derzeit verschiedene Antriebssysteme erprobt werden, wobei nicht absehbar ist, welches sich schliesslich durchsetzen wird. Bei den Versuchseinsätzen liegt der Fokus, neben dem Nachweis der Betriebstauglichkeit, meist auf den Wirkungen auf die Umwelt, während dem Energiebedarf eine geringere Aufmerksamkeit zukommt. Dabei ist gerade der Energiebedarf eine der wenigen Stellgrössen, die ein ÖV-Betreiber direkt beeinflussen kann und er wird zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen. Bislang fehlt allerdings ein systematischer Vergleich der Antriebssysteme auf Basis des Energiebedarfs. Diese Arbeit soll genau dies leisten, indem alle wesentlichen Faktoren, die den Energiebedarf beeinflussen, berücksichtigt werden, wobei der Vergleich auf der Ebene der Primärenergie erfolgt.

Diese Arbeit wäre ohne die Unterstützung verschiedener Personen und Institutionen nicht zustande gekommen, welchen ich an dieser Stelle meinen grossen Dank aussprechen möchte. Unentbehrlich war die Hilfe von Professor Dr. Ulrich Weidmann vom Lehrstuhl Verkehrssysteme des Instituts für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich. Durch die Anstellung als Wissenschaftlicher Assistent am IVT ermöglichte er mir, die Vielfalt der Schweizer ÖV-Welt kennenzulernen. Als geduldiger Betreuer meiner Dissertation sorgte er für die hin und wieder notwendigen Ermunterungen und gab unzählige inhaltliche Anregungen. Ich bin ihm somit in zweifacher Hinsicht zu Dank verpflichtet. Ebenso unentbehrlich war die Hilfe des Bundesamtes für Energie (BFE), welches mit einem grosszügigen finanziellen Beitrag ermöglichte, dass ich mich während dreier Jahre auf meine Forschung konzentrieren konnte. Ich danke Professor Dr.-Ing. Arnd Stephan vom Lehrstuhl Elektrische Bahnen des Instituts für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik der TU Dresden, dass er trotz seines überaus dicht gefüllten Terminkalenders das Korreferat übernommen hat und mir viele

wichtige Hinweise gab. Ohne Dr. Steffen Schranil, bis Juni bei SBB Infrastruktur, Bereich Energiemanagement und seit Juli für SBB Cargo International tätig, welcher sich dankenswerterweise ebenfalls als Korreferent zur Verfügung stellte, wäre diese Arbeit sicherlich nicht vollendet worden. Während eines halben Jahres konnten in wöchentlichen Besprechungen, sowohl in Zollikofen als auch in Zürich, unzählige inhaltliche Detailfragen geklärt werden. Dies hat massgeblich dazu beigetragen, dass ich in der Schlussphase der Bearbeitung das Ziel nie aus den Augen verloren habe. Herrn Adrian Vogel von den Verkehrsbetrieben Zürich (VBZ) danke ich für die Angaben zum Energiebedarf von Bussen, die mir die Validierung meines Modells ermöglichten. Sehr nützlich waren überdies die vielen Berichte, Studien und Fachbeiträge zu elektrischen Bussen, auf die ich von Dr. Markus Rieder hingewiesen wurde. Nicht zuletzt waren auch die Gespräche mit den Kollegen am IVT bereichernd. Axel Bomhauer-Beins und Martin Sojka hatten stets ein offenes Ohr für meine Fragen zu Betriebs- und Energiethemen. Patrick Braess verdanke ich unter anderem die Idee der externen Betreuung während der Schlussphase. Ambra Toletti war mir eine grosse Hilfe bei allen die Arbeit mit \LaTeX betreffenden Herausforderungen und stand mir auch als Ratgeberin in mathematischen Fragen zur Seite. Alle vier halfen mir ausserdem bei vielen Führungen und Lehrveranstaltungen im Eisenbahnbetriebslabor. Schliesslich möchte ich auch meinen Eltern Isolde und Horst Schwertner danken, welche stets an mich geglaubt haben und mir damit eine grosse Stütze waren. Vielen Dank euch allen! Naturgemäss ist der Umfang einer solchen Aufzählung beschränkt. Denen, die zu dieser Arbeit beigetragen haben, hier jedoch nicht namentlich genannt werden konnten, sei ebenfalls herzlich gedankt.

Sämtliche hier enthaltenen Fotografien stammen vom Verfasser dieser Arbeit. Dies gilt auch für alle übrigen Abbildungen, sofern nicht explizit eine andere Quelle angegeben ist.

Abschliessend bleibt nur der Hinweis, dass der Verfasser für den Inhalt und damit auch für allfällige Fehler die alleinige Verantwortung trägt. Dem geneigten Leser sei hiermit eine anregende Lektüre gewünscht.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XV
Zusammenfassung	XVII
Summary	XXI
1 Einleitung	1
1.1 Vom Verkehrsbedürfnis zum öffentlichen Verkehr	1
1.2 Historischer Abriss zur Elektromobilität im Stadtverkehr	2
1.2.1 Begriff	2
1.2.2 Strassenbahn	3
1.2.3 Trolleybus	4
1.2.4 Versuche mit anderen Systemen	7
1.3 Perspektiven und Herausforderungen	9
1.4 Einsatzbereiche von Bus und Strassenbahn	9
1.5 Definitionen	11
1.5.1 Begriffe	11
1.5.2 Umrechnungsfaktoren	13
1.6 Struktur der Arbeit	14
2 Forschungsfrage	15
2.1 Beweggründe	15
2.2 Bisherige Systemvergleiche	16
2.3 Forschungsfrage und Hypothesen	18
2.4 Methodik	18

3	Aktueller Forschungsstand	21
3.1	Einleitung	21
3.2	Überblick über die im Einsatz befindlichen Antriebstechnologien .	22
3.2.1	Dieselbusse	22
3.2.2	Biodiesel-, Biogas und Erdgasbusse	22
3.2.3	Trolleybusse	24
3.2.4	Dieselhybridbusse	27
3.2.5	Brennstoffzellenbusse	35
3.2.6	Batteriebusse	40
3.3	Energiebedarf	46
3.4	Zusammenfassung	47
4	Berechnungsmodell	49
4.1	Grundlagen	49
4.1.1	Ziel	49
4.1.2	Abgrenzung	50
4.1.3	Vergleichsumfang	50
4.2	Struktur des Berechnungsmodells	51
4.2.1	Modellaufbau	51
4.2.2	Eingangsgrößen	55
4.2.3	Ausgabewerte	59
4.3	Fahrdynamische Grundlagen	60
4.3.1	Basisfahrspiel	60
4.3.2	Leistung und Energie	65
4.4	Generisches Modell des Antriebsstrangs	66
4.4.1	Entwicklung der Modellstruktur	66
4.4.2	Ableitung der Betriebsmodi	68
4.5	Modellierung der Antriebsstränge	72
4.5.1	Überblick	72
4.5.2	Nichtelektrische Antriebsstränge	72
4.5.3	Teilelektrische und hybride Antriebsstränge	73
4.5.4	Vollelektrische Antriebsstränge	76
4.5.5	Obsoletere Antriebsstränge	79
4.5.6	Zusammenfassung	80
4.6	Leistungs- und Energiebedarf	81
4.6.1	Wirkungsgrade	81
4.6.2	Exkurs: Wirkungsgrad der Trolleybusfahrleitung	85
4.6.3	Leistungsbedarf für die Traktion	89
4.6.4	Leistungsbedarf der Hilfsbetriebe	90
4.6.5	Energiebedarf	92
5	Vergleichsmethodik	93
5.1	Umfang	93
5.2	Primärenergiebedarf	93

5.2.1	Bereitstellungspfade und deren Wirkungsgrade	93
5.2.2	Elektrizitätserzeugung	94
5.2.3	Gesamtwirkungsgrade der Energiebereitstellung	97
5.3	Indirekte oder «graue» Energie	97
5.3.1	Anteil am Gesamtenergiebedarf	97
5.3.2	Fahrzeuge	98
5.3.3	Infrastruktur	100
5.3.4	Fazit	101
5.4	Emissionen	104
5.4.1	Emissionen der Energiebereitstellung	104
5.4.2	Emissionen während des Betriebes	106
5.5	Vergleich auf Basis von Jahreswerten	108
5.5.1	Vorgehensweise und Datenbasis	108
5.5.2	Eingangsgrossen	109
5.5.3	Berechnungsalgorithmus	110
5.5.4	Ausgabewerte	111
5.6	Validierung	111
6	Fallstudien	117
6.1	Fallstudie VBZ-Buslinien	117
6.1.1	Untersuchte Linien	117
6.1.2	Ergebnisse	119
6.2	Generische Fallstudien	131
6.2.1	Vorgehensweise und Eingangsgrossen	131
6.2.2	Erste Fallstudie: Halteabstand und Auslauf	134
6.2.3	Zweite Fallstudie: Höhenprofil	139
6.2.4	Dritte Fallstudie: Besetzung	142
6.2.5	Vierte Fallstudie: Aussentemperatur	146
6.2.6	Exkurs: Rekuperationsgrad beim Trolleybus	149
6.2.7	Aspekte der Energieeffizienz	151
6.2.8	Rangfolge	156
6.3	Vereinfachtes Modell	159
6.3.1	Herleitung	159
6.3.2	Anwendungsbeispiel	161
6.3.3	Fazit	163
7	Schlussfolgerungen	167
7.1	Erkenntnisse	167
7.1.1	Einfluss des Antriebssystems	167
7.1.2	Einfluss externer Faktoren	168
7.1.3	Infrastruktur	170
7.2	Diskussion	171
7.2.1	Beantwortung der Forschungsfrage	171
7.2.2	Verbesserungspotenziale	172

7.3	Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick	173
A	Anhang	175
A.1	Energieflussschemata	175
A.2	Mittlerer Luftwiderstand	177
A.3	Steigfähigkeit	178
A.4	Energiemanagement	178
A.5	Wirkungsgrade der Energiebereitstellung	185
A.6	Technische Daten von Bussen	188
A.7	Höhenprofile	197
	Literatur	203
	Biographische Notiz	215

Abbildungsverzeichnis

1.1	Betriebseröffnung und -einstellung von Trolleybusnetzen in Grossbritannien und Deutschland	5
1.2	Anzahl in Betrieb befindlicher Trolleybusnetze in Grossbritannien und Deutschland	6
3.1	Zwei HESS-Gelenktrolleybusse von Bernmobil	25
3.2	HESS-Doppelgelenktrolleybus der Verkehrsbetriebe Zürich	26
3.3	Die drei Hybridbus-Antriebskonzepte	28
3.4	Beispiel einer Ladestation für konduktive Zwischenaufladung	41
3.5	Ladeenergie in Abhängigkeit von Haltezeit und Ladeleistung	42
3.6	Batteriebus der Wiener Linien	43
4.1	Grundaufbau des Berechnungsmodells	52
4.2	Basisfahrspiel	61
4.3	Herleitung des Energiefluss-Prinzipschemas	67
4.4	Funktionales Energieflussschema	69
4.5	Bedeutung der einzelnen Positionen in der Bezeichnung der Betriebsmodi	70
4.6	Antriebsschema des Diesel- und Gasbusses	73
4.7	Energieflussschema des Diesel- und Gasbusses	73
4.8	Antriebsschema des dieselektrischen Busses	74
4.9	Energieflussschema des dieselektrischen Busses	74
4.10	Antriebsschemata der hybriden Antriebsstränge	75
4.11	Energieflussschemata von Diesel- und Brennstoffzellen-Hybridbussen	76
4.12	Antriebsschema des Batteriebusses	77
4.13	Energieflussschema des Batteriebusses	77
4.14	Antriebsschemata des Trolley- und Trolley-Hybridbusses	78
4.15	Energieflussschemata des Trolley- und Trolley-Hybridbusses	78
4.16	Antriebsschema des Gyrobusses	79
4.17	Antriebsschema des Brennstoffzellenbusses	79

4.18	Abhängigkeit des Wirkungsgrades der Trolleybusfahrleitung vom Halteabstand und vom Abstand zum Speisepunkt	87
4.19	Wirkungsgrad der Trolleybusfahrleitung	87
4.20	Nutzbarer Bereich des Batterieladezustands	89
4.21	Erforderliche Heiz- und Kühlleistungen in Abhängigkeit von der Aussentemperatur	91
5.1	Energieflussschemata der Energiebereitstellung inkl. der Wirkungsgrade der einzelnen Verarbeitungsschritte	95
5.2	Energie im Strassenverkehrssystem Schwedens	98
6.1	Energiebedarf ausgewählter VBZ-Buslinien für ein Betriebsjahr . .	120
6.2	THG-Emissionen ausgewählter VBZ-Buslinien für ein Betriebsjahr	121
6.3	Relative Anteile von Diesel- und Trolleybussen an Verkehrsleistung, Energiebedarf und THG-Emissionen	122
6.4	Gesamtenergiebedarf, Anteil der Rekuperation und Aufteilung der Verluste am Beispiel der Linie 46	124
6.5	Gesamtenergiebedarf, Anteil der Rekuperation und Aufteilung der Verluste am Beispiel der Linie 61	125
6.6	Spezifischer Energiebedarf aller Antriebssysteme auf den untersuchten VBZ-Linien	126
6.7	Abschätzung der Anzahl benötigter Batteriebus-Ladestationen . .	128
6.8	Abhängigkeit der Reisegeschwindigkeit vom Halteabstand	134
6.9	Einfluss des Halteabstands auf Energiebedarf und Emissionen . .	135
6.10	Energiebedarf relativ zum Halteabstand 300 m	136
6.11	Einfluss des Strommixes auf die THG-Emissionen	137
6.12	Relative Reisezeitverlängerung sowie relative Primärenergieeinsparung durch Nutzung des Auslaufs	138
6.13	Schemata der beiden Höhenprofile der zweiten generischen Fallstudie	139
6.14	Einfluss der Neigung auf Energiebedarf und Emissionen	140
6.15	Relativer Energiebedarf bezogen auf die ebene Strecke	141
6.16	Einfluss der Besetzung auf Energiebedarf und Emissionen	143
6.17	Entwicklung des relativen und des spezifischen Energiebedarfs in Abhängigkeit von der Besetzung	144
6.18	Einfluss der Aussentemperatur auf Primärenergiebedarf und Emissionen	147
6.19	Entwicklung des relativen und spezifischen Energiebedarfs in Abhängigkeit von der Aussentemperatur	148
6.20	Einfluss des Rekuperationsgrades auf Primärenergiebedarf und THG-Emissionen des Trolleybusses in Abhängigkeit vom Halteabstand	150

6.21	Einfluss des Rekuperationsgrades auf den Primärenergiebedarf des Trolleybusses in Abhängigkeit von Besetzung und Aussentemperatur	151
6.22	Wieder am Rad nutzbarer Anteil der rekuperierten Energie in Abhängigkeit von Halteabstand, Neigung, Besetzung und Aussentemperatur	152
6.23	Gesamtwirkungsgrade der Fahrzeuge	155
6.24	Bereiche der Traktionswirkungsgrade der Fahrzeuge ohne und mit Energiebereitstellung	156
6.25	Einfluss des Halteabstands auf die Rangfolge der Antriebssysteme	157
6.26	Einfluss der Aussentemperatur auf die Rangfolge der Antriebssysteme	158
6.27	Berechnungsgenauigkeit des vereinfachten Modells	164
A.1	Geschwindigkeit v_m für den mittleren Luftwiderstand	177
A.2	Bereitstellungspfade für Dieselkraftstoff und Erdgas (CNG)	185
A.3	Bereitstellungspfade für elektrische Energie	186
A.4	Bereitstellungspfade für Wasserstoff	187
A.5	Interpolation der Höhenlage der Haltestelle	197
A.6	Höhenprofile der für die VBZ-Fallstudie ausgewählten Buslinien .	199

Tabellenverzeichnis

1.1	Weltweite Verteilung der Trolleybusbetriebe	7
1.2	Dichten und Heizwerte der Kraftstoffe und die daraus abgeleiteten Umrechnungsfaktoren	13
3.1	Hybridbuseinsätze in Deutschland im Jahre 2015	30
3.2	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Hybridbus-Evaluationen in den USA	34
3.3	Differenz des Kraftstoffverbrauchs der Dieselhybridbusse im Vergleich zu den Diesel-Referenzbussen	35
3.4	Im Rahmen des CHIC-Projektes eingesetzte Brennstoffzellen-Hybridbusse	38
3.5	Überblick über die in den Jahren 2013 und 2014 in Nordamerika getesteten Brennstoffzellen-Hybridbusse	39
3.6	Betriebsversuche mit Batteriebussen in Deutschland im Jahre 2016	44
4.1	Für alle Antriebssysteme gültige Kennwerte der generischen Fahrzeugtypen	57
4.2	Systemspezifische Kennwerte der generischen Fahrzeugtypen . . .	58
4.3	Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Energieflüsse	70
4.4	Übersicht über die theoretisch möglichen Betriebsmodi	70
4.5	Übersicht über die theoretisch möglichen Betriebsmodi für die verschiedenen Antriebsstrangkonfigurationen	80
4.6	Mittlere Wirkungsgrade der Subsysteme	83
4.7	Wirkungsgrade der Antriebsstrangkonfigurationen	84
4.8	Wirkungsgrad der Trolleybusfahrleitung	89
4.9	Korrekturfaktoren für die Heiz- und Kühlleistung	90
5.1	Bruttostromerzeugung im Inland	96
5.2	Gesamtwirkungsgrade der Energiebereitstellung	97
5.3	Energiebedarf für die Herstellung der Fahrzeuge	99
5.4	Energiebedarf für Fahrzeugwartung und -instandhaltung	100
5.5	Energiebedarf für die Bereitstellung von 1 t Rohmaterial	101

5.6	Abschätzung der grauen Energie der Infrastruktur einer Trolleybus-Energieversorgung	102
5.7	Primärenergiebedarf eines Betriebsjahres der mit Solo- und Gelenkbussen betriebenen VBZ-Diesel- und Trolleybuslinien	103
5.8	Graue Energie – Zusammenfassung und Vergleich	103
5.9	Spezifische Emissionsfaktoren für die Elektrizitätserzeugung und die Bereitstellung von Kraftstoffen	105
5.10	Vergleich der THG-Emissionsfaktoren der Elektroenergieerzeugung in Deutschland und der Schweiz	106
5.11	Direkte spezifische Emissionsfaktoren fossiler Kraftstoffe	107
5.12	Zeitfenster des Betriebstages	109
5.13	Vergleich des berechneten Verbrauchs von Dieselnbussen mit dem VBZ-Flottenwert	112
5.14	Vergleich des berechneten Verbrauchs des Parallelhybridbusses mit dem VBZ-Flottenwert	113
5.15	Vergleich des berechneten Verbrauchs der Trolleybusse mit den VBZ-Flottenwerten	114
5.16	Berechneter Kraftstoffverbrauch der Brennstoffzellen-Hybridbusse	114
6.1	Hauptkennwerte aller im Rahmen der VBZ-Fallstudie untersuchten Linien	118
6.2	Energieeinsparung und Emissionsreduktion durch den Einsatz (teil)elektrischer Antriebssysteme	123
6.3	Rechnerische Anzahl benötigter Ladestationen bei Umstellung der VBZ-Dieselbuslinien auf Batteriebusbetrieb	130
6.4	Eingangsgrößen für die Berechnung der generischen Fallstudien .	132
6.5	Aufteilung der relativen Besetzung auf die Sitz- und Stehplätze . .	133
6.6	Mindestbesetzung für die Unterschreitung des spezifischen Energiebedarfs eines PW	145
6.7	Spezifische Eingangswerte des vereinfachten Modells der Energiebedarfsberechnung	162
A.1	Wahl des Betriebsmodus beim seriellen Dieselhybridbus	179
A.2	Wahl des Betriebsmodus beim parallelen Dieselhybridbus	180
A.3	Wahl des Betriebsmodus beim Brennstoffzellen-Hybridbus	181
A.4	Wahl des Betriebsmodus bei den nicht-hybriden Antriebssystemen	183
A.5	Wahl des Betriebsmodus beim Trolley-Hybridbus im fahrleitungsgebundenen Betrieb	184
A.6	Beispiele realisierter Midibusse	189
A.7	Beispiele realisierter Solobusse	190
A.8	Beispiele realisierter Gelenkbusse	192
A.9	Beispiele realisierter Doppelgelenkbusse	194
A.10	Abschätzung des Masseanteils auf den Antriebsachsen	195
A.11	Sitz- und Stehplätze der bei den VBZ eingesetzten Bustypen	196

Abkürzungsverzeichnis

AG	Automatikgetriebe
AN	Antriebsachse, Antriebsrad
An	Anreicherung
BAFU	Bundesamt für Umwelt (Schweiz)
Batt	Batteriebus
Btkm	Bruttotonnenkilometer
BW	Bremswiderstand
BZ	Brennstoffzellensystem
BZHy	Brennstoffzellen-Hybridbus
BZHy(P)	Brennstoffzellen-Hybridbus, eingesetzt als Plug-In-Hybrid
D	Dieselbus
DÄ	Dieseläquivalent
DE	dieselelektrischer Bus
EE	erneuerbare Energie
EG	Erdgas (Primärenergie)
El	Elektrolyse
EM	Elektromotor
FL	Fahrleitung
Fzkm	Fahrzeugkilometer
G	Gasbus
GE	Generator
Ge	Gewinnung
H	Hilfsbetriebe
HS	Hochspannungsverteilstromnetz
HVZ	Hauptverkehrszeit
K	Kohle (Primärenergie)
k. A.	keine Angabe
Ko	Kompression
KT	Kraftstofftank, Gasdruckbehälter
KW	Kraftwerk
LS	Ladestation

MS	Mittelspannungsverteilstromnetz
NMVOG	flüchtige organische Verbindungen (ohne Methan)
Ntkm	Nettotonnenkilometer
NVZ	Nebenverkehrszeit
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PHy	paralleler Dieselhybridbus
PHy(P)	paralleler Dieselhybridbus, eingesetzt als Plug-In-Hybrid
Pkm	Personenkilometer
Pr	Produktion
PW	Personenwagen
Rf	Raffination
RÖ	Rohöl (Primärenergie)
S	Speicher
SHy	serieller Dieselhybridbus
SHy(P)	serieller Dieselhybridbus, eingesetzt als Plug-In-Hybrid
SP	Speicher für elektrische Energie
ST	Strasse
SVZ	Schwachverkehrszeit
TA	Tankanlage
TF	Transformator
THG	Treibhausgase
Tr	Transport
Tro	Trolleybus
TroHy	Trolley-Hybridbus (batteriegestützter Trolleybus)
TTW	Tank-to-wheel (Energiefluss Tank → Rad)
UBA	Umweltbundesamt (Deutschland)
Ü	Übertragung
UG	Untersetzungsgetriebe
UO	Uranoxid (Primärenergie)
VBZ	Verkehrsbetriebe Zürich
Vf	Verflüssigung
VM	Verbrennungsmotor
Vt	Verteilung
W	Wandler
WTT	Well-to-tank (Energiefluss Primärenergie → Tank)
WTW	Well-to-wheel (Energiefluss Primärenergie → Rad)
3~/=	Gleichrichter
=/3~	Wechselrichter
=/=	Batteriestromrichter

Zusammenfassung

Bisherige Vergleiche von Bus-Antriebssystemen widmeten dem Energiebedarf oft keine grosse Aufmerksamkeit, meist wurden standardisierte Fahrzyklen zu Grunde gelegt. Zukünftig wird – nicht zuletzt aufgrund stärker schwankender Energiepreise – dem Thema Energieeffizienz jedoch eine grössere Beachtung zukommen, weshalb im Rahmen dieser Arbeit der Versuch unternommen wurde, eine auf dem Energiebedarf basierende Methodik des Systemvergleichs zu entwickeln.

Hierfür galt es zunächst, mittels einer Literaturrecherche einen Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand zu erhalten, denn inzwischen stehen zahlreiche technische Lösungen an der Schwelle zur Einsatzreife oder befinden sich zumindest in der Erprobungsphase. Wegen seiner Flexibilität und der niedrigen Anschaffungs- und Betriebskosten ist der Dieselbus weiterhin dominierend und dient somit als Referenzsystem. Bewährt hat sich auch der Erdgasbus, mit dem sich die Treibhausgas- und Schadstoffemissionen senken lassen. Der Trolleybus (O-Bus) ist das einzige elektrische Antriebssystem mit einer vergleichbaren Einsatzreife, die teure Infrastruktur stellt allerdings ein Hindernis für dessen Verbreitung dar. Hier bietet der Trolley-Hybridbus (batteriegestützter O-Bus) eine Alternative, da er längere fahrleitungslose Abschnitte befahren kann. Inzwischen sind die Dieselhybridbusse fast ebenso zuverlässig wie der Dieselbus, ihr Übertritt in den kommerziellen Betrieb steht in Kürze bevor. Obwohl sich deren Zuverlässigkeit deutlich verbessert hat, sind die Wasserstoffbusse (Brennstoffzellen-Hybridbusse) über den Versuchsbetrieb bislang nicht hinausgekommen. Die aufwändige Handhabung des Energieträgers Wasserstoff sowie dessen mangelnde Verfügbarkeit dürften dafür ursächlich sein. Schliesslich haben in den vergangenen drei Jahren zahlreiche Versuche mit Batteriebussen begonnen, deren Reichweite mittels Zwischenaufladungen vergrössert wird. Welches Ladeprinzip (konduktiv oder induktiv) sich schliesslich durchsetzt, kann derzeit nicht abgesehen werden.

Ein Vergleich ist nur auf einer einheitlichen Basis sinnvoll. Die Berechnung des Energiebedarfs der zu vergleichenden Antriebssysteme muss daher mit einem Modell erfolgen, das alle diese Systeme abbilden kann. Mittels eines systemtheoretischen Ansatzes konnte diese Forderung erfüllt werden. Das

Fahrzeugmodell umfasst die Subsysteme Speicher, Wandler (je in zwei Teil-Antriebssträngen) und die Übertragung, die beide Teile zusammenführt. Dabei war zu beachten, dass der Vergleich auf Grundlage des Primärenergiebedarfs erfolgen muss, weshalb dem Fahrzeug das Subsystem Bereitstellung vorgelagert ist. Die hier umgesetzte Vergleichsmethodik berücksichtigt dies, indem in zwei Schritten vorgegangen wird. Mittels des Berechnungsmodells wird zuerst der Energiebedarf am Rad und ab Speicher (Tank, Batterie) oder Fahrleitung bestimmt, aus welchem in einem zweiten Schritt die Primärenergie berechnet und mit Hilfe von Emissionsfaktoren die Emissionen abgeschätzt werden. Das Berechnungsmodell bildet den Kern der Vergleichsmethodik; es arbeitet auf fahrdynamischer Basis, wobei die Fahrzyklen anhand der vom Anwender vorgegebenden Linienparameter (Halteabstände, Geschwindigkeiten, Höhenprofil; Fahrgastzahlen, ggf. Sollfahr- und Sollhaltezeiten) und generischer Fahrzeugdaten berechnet werden. Die Berechnung erfolgt im Zeitschrittverfahren. Insgesamt werden damit sowohl eine hohe Flexibilität als auch eine grosse Genauigkeit erreicht, da keine vorgefertigte Fahrzyklen verwendet werden. Verglichen werden insgesamt zwölf verschiedene Antriebssysteme, unterteilt in

- nichtelektrische Antriebssysteme:
 1. Dieselbus (als Referenzsystem),
 2. Erdgasbus;
- teilelektrische und hybride Antriebssysteme:
 3. dieselektrischer Bus,
 4. serieller Dieselhybridbus,
 5. serieller Dieselhybridbus mit Zwischenaufladung (Plug-In-Hybrid),
 6. paralleler Dieselhybridbus,
 7. paralleler Dieselhybridbus mit Zwischenaufladung (Plug-In-Hybrid),
 8. Brennstoffzellen-Hybridbus,
 9. Brennstoffzellen-Hybridbus mit Zwischenaufladung (Plug-In-Hybrid);
- vollelektrische Antriebssysteme:
 10. Batteriebus,
 11. Trolleybus,
 12. Trolley-Hybridbus.

Grundlage ist die Berechnung des Energiebedarfs für einen Umlauf, ausserdem kann mittels der Berechnung von elf typischen Umläufen (welche zugleich die drei Tagesarten abbilden) und einer anschliessenden Hochrechnung der Jahresenergiebedarf berechnet werden. Ein Vergleich mit realen Verbrauchswerten ergab nur geringe Abweichungen, sodass die Berechnung als hinreichend genau angesehen werden kann.

Die Vergleichsmethodik wurde anschliessend in Form zweier Fallstudien angewendet. Zuerst erfolgte eine Betrachtung der VBZ-Buslinien, wobei die Energieeffizienz der elektrischen Traktion deutlich wurde. Obwohl auf den Trolley-

buslinien knapp zwei Drittel der Fahrzeugkilometer geleistet werden, verbrauchen sie nur etwa 40 % der Primärenergie und verursachen nur 8 % der Treibhausgasemissionen aller Stammlinien. Anschliessend wurde eine Näherungsrechnung für die benötigte Anzahl an Ladestationen für Batteriebusse vorgeschlagen.

Die zweite Fallstudie beschäftigte sich im Rahmen einer generischen Betrachtung mit dem Einfluss von Halteabstand, Auslauf, Steigungen, Besetzung sowie der Aussentemperatur auf den Energiebedarf. Es zeigte sich, dass Halteabstand und Aussentemperatur den grössten Einfluss haben, wobei die Auswirkung Letzterer stark vom Antriebssystem abhängt: Während der Energiebedarf beim Dieselbus erst bei sehr niedrigen Temperaturen anzusteigen beginnt, kann er bei den vollelektrischen Systemen durchaus auf das doppelte angewachsen sein. Mittels Auslaufabschnitten lassen sich, ohne nennenswerte Reisezeitverlängerung, bis zu 15 % Energie einsparen. Weiterhin werden der Einfluss des Rekuperationsgrades beim Trolleybus, der Anteil der Rekuperation sowie der Gesamtwirkungsgrad betrachtet. Schliesslich wird aus den Ergebnissen der generischen Betrachtungen ein vereinfachtes Modell zur Abschätzung des Energiebedarfs mittels spezifischen Energiebedarfswerten abgeleitet und validiert.

Im Ergebnis sind Trolley, Trolley-Hybrid- und Batteriebus in den meisten Fällen diejenigen Systeme, die sowohl den geringsten Primärenergiebedarf aufweisen als auch die niedrigsten Emissionen verursachen. Basiert der Strommix jedoch zu einem grösseren Anteil auf fossiler Primärenergie, trifft dies nur zu, wenn wenig Heizenergie bezogen wird. Anderenfalls kann der Energiebedarf der genannten Antriebssysteme sogar höher sein als der des Dieselbusses. Wasserstoffbusse verursachen sehr niedrige Emissionen, sofern der Wasserstoff durch Elektrolyse mit erneuerbarer Primärenergie gewonnen wird. Der Primärenergiebedarf ist dabei jedoch sehr hoch, weil die Energiebereitstellung einen schlechten Wirkungsgrad aufweist. Vergleichsweise konstant im Mittelfeld zwischen Diesel- und Trolleybus liegt das Energiesparpotenzial der Dieselhybridbusse, welches sich durch den Einsatz als Plug-In-Hybride (also mittels Zwischenauf Ladungen) weiter steigern lässt.

Summary

The energy consumption usually played only a minor role in comparisons of drive systems of buses, as they generally were based on standardized driving cycles. In future, though, energy efficiency is going to gain much higher attention, as energy prices are likely to be more volatile. This study therefore attempts to develop a system comparison methodology based on energy consumption.

As there are different alternative drive systems, which either will enter commercial service shortly or are at least in the testing phase, it is necessary to get an overview over the actual state of development. This is done by a literature review. Because of its flexibility and low investment and operation costs, the diesel bus is dominating and serves therefore as reference system. Another proven technology is the gas bus, allowing reducing emissions of both carbon dioxide and pollutants. The trolley bus is the only electric drive system being equally well-engineered as the diesel bus, but the expensive infrastructure prevented that it had spread more widely. Here, the trolley hybrid bus (or battery supported trolley bus) can be an alternative, as it is capable of running longer stretches without a contact line. Diesel hybrid buses are beginning to enter commercial service, as they are now nearly as reliable as diesel buses. Although they have become more reliable, fuel cell buses still do not have left the test phase. The complicated handling of hydrogen and its insufficient availability might be the main reasons for that. Finally, many tests with battery buses commenced in the last three years. Their range is extended by intermediate charging (also called "opportunity charging"). It is still not clear, if conductive or inductive charging would establish as the main energy transmission principle.

A comparison is only useful on a common basis. The energy consumption has therefore to be calculated by a model that can describe all the systems to be compared. This requirement is fulfilled by an approach based on systems theory. The vehicle model contains of the subsystems storage, converter (each in two separate power trains) and transmission, connecting both power trains. As the comparison has to refer to primary energy, the subsystem supply is put in front of the vehicle. First step is the calculation of energy consumption on wheelbase and at storage. In a second step, the primary energy is calculated and the emissions are estimated with the help of emission factors. The calculation model forms the

core of the comparison methodology and uses the time step method. It calculates the tractive forces using the line parameters provided by the user (stop distances, velocity profile, height profile, optionally also target times) and generic vehicle parameters. This enables high flexibility as well as high precision, because no fixed driving cycles are used. Twelve drive systems are compared:

- Non-electric drive systems:
 1. Diesel bus (reference system),
 2. Gas bus;
- Partly electric and hybrid drive systems:
 3. Diesel electric bus,
 4. Series diesel hybrid bus,
 5. Series diesel hybrid bus (plug-in),
 6. Parallel diesel hybrid bus,
 7. Parallel diesel hybrid bus (plug-in),
 8. Fuel cell hybrid bus,
 9. Fuel cell hybrid bus (plug-in);
- Full-electric drive systems:
 10. Battery bus,
 11. Trolley bus,
 12. Trolley hybrid bus.

Basically, the energy consumption is calculated for one tour. The energy consumption for a whole year is extrapolated based on the calculation of eleven typical tours (also representing the three weekday types). A comparison with real energy consumption values resulted only in small differences, the calculation can therefore be regarded as appropriate.

The comparison methodology was then applied in the form of two case studies. Firstly, the VBZ (Zürich public transport operator) bus lines were examined, which made evident the energy efficiency of electric traction. The trolley bus lines stand for nearly two thirds of the bus vehicle kilometres, but only for roughly 40 % of primary energy consumption and just 8 % of greenhouse gas emissions.

The second case study dealt with the influence of stop distance, coasting, inclines, occupancy and outside temperature on energy consumption in terms of a generic examination. It became apparent that stop distance and outside temperature have the largest influence, the impact of the latter strongly depends on the drive system: While the energy consumption of diesel buses begins to increase only at very low temperatures, it can double for full-electric buses. The use of coasting allows reducing of energy consumption by up to 15 % without extending running times noticeably. Additionally, recuperation factor, share of recuperated energy, and overall efficiency are examined. Finally, from the results of this case study, a simplified model for estimation of energy consumption is derived and validated.

As result, trolley, trolley hybrid and battery buses, in most cases, consume least energy and have the lowest greenhouse gas emissions. If the electricity generation, however, is merely based on fossil sources, this would only be the case when there is no need for heating energy. At low outside temperatures, the energy consumption of electric bus systems can even be higher than that of diesel buses. Fuel cell buses produce very low emissions, if hydrogen is generated by electrolysis using electricity from renewable energy sources. However, this results in high primary energy consumption, as the efficiency of energy supply is low. The energy saving potential of diesel hybrid buses is roughly half as high as that of trolley buses, but it can be improved, if they are operated as plug-in buses.

1

Einleitung

1.1 Vom Verkehrsbedürfnis zum öffentlichen Verkehr

Verkehr, also die Ortsveränderung von Personen und Gütern, ist notwendig, weil nicht alle Bedürfnisse der Menschen in deren unmittelbarem Wohnumfeld befriedigt werden können. Seit dem Beginn der Industrialisierung in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts hat sich eine zunehmende räumliche Trennung der Funktionen Wohnen und Arbeiten herausgebildet, was zu einem gesteigerten Bedürfnis nach (räumlicher) Mobilität¹ führte und die zurückzulegenden Distanzen anwachsen liess. Da für diese Ortsveränderungsprozesse nur ein begrenzter Zeitaufwand akzeptiert wird, wurden verschiedene technische Systeme entwickelt, welche die gewünschte Ortsveränderung in kürzerer Zeit ermöglichen, als es auf «natürlichem» Wege, also zu Fuss, möglich wäre. Eine weitere Begleiterscheinung der Industrialisierung war die rasante Urbanisierung, die zur Folge hatte, dass der Stadtverkehr nur noch mit öffentlichen Massenverkehrssystemen bewältigt werden konnte. Hier bestand eine wechselseitige Abhängigkeit, denn die neuen Massenverkehrsmittel ermöglichten überhaupt erst die Industrialisierung.² Verkehrsströme abseits der vorhandenen Eisenbahnstrecken mussten auf der Strasse bewältigt werden. Die dort anfangs eingesetzten Pferdeomnibusse gelangten jedoch schnell an ihre Kapazitätsgrenzen, sodass man diese zu Pferdestrassenbahnen weiterentwickelte, welche bald mit denselben Kapazitätsproblemen konfrontiert waren. Erst der Schritt zum elektrischen Antrieb führte zum entscheidenden Durchbruch bei der Leistungsfähigkeit.

Mit dem Aufkommen des motorisierten Individualverkehrs hat der öffentliche Verkehr vielerorts seine dominierende Stellung verloren, wodurch sich auch seine Funktion gewandelt hat. Heute soll er den Menschen ihre Mobilität – sowohl auf deren Arbeitsweg als auch in ihrer Freizeit – gewährleisten, und dies unabhängig davon, ob sie ein eigenes Fahrzeug besitzen oder nicht. Deshalb kommt heute der Attraktivität des öffentlichen Verkehrs eine hohe Bedeutung zu, deren

¹Im Personenverkehr dient «als Massgrösse der Mobilität [...] allgemein die Zahl der Aktivitäten (Wege, Fahrten, Beförderungen) je Zeiteinheit» (Nuhn und Hesse 2006, S. 19).

²Nuhn und Hesse 2006, S. 21.

wesentliche Merkmale kurze Reisezeiten sowie kurze Zugangswege sind. Erstere erfordern ein hohes Beschleunigungsvermögen der Fahrzeuge, Letztere sind vor allem bei strassengebundenen ÖV-Systemen entscheidend und bedingen eine Abfolge der Haltestellen mit vergleichsweise geringen Abständen (im Stadtgebiet meist zwischen 300 und 500 m).

Somit sind häufiges Bremsen und ebenso häufiges Anfahren aus dem Stand für den ÖV charakteristisch, zumal zu den verkehrlichen Halten noch solche Halte hinzukommen, die durch die Verkehrssituation (Lichtsignalanlagen, Behinderungen durch andere Verkehrsteilnehmer) bedingt sind. Die erforderliche kinetische Energie muss im Fahrtverlauf bei jedem der zahlreichen Anfahrvorgänge aufs Neue zur Verfügung gestellt werden. Kinetische Energie lässt sich jedoch nur mit grossem Aufwand speichern, weshalb die Bereitstellung üblicherweise in einer anderen Energieform erfolgt und Energiewandlungen auf dem Fahrzeug somit unumgänglich sind. Dies ist von Nachteil, da grundsätzlich jede Energiewandlung verlustbehaftet ist. Das geforderte hohe Beschleunigungsvermögen sowie das Erreichen einer möglichst hohen Geschwindigkeit auch in Steigungsabschnitten führen zu einem hohen Leistungsbedarf. Der Antriebsstrang muss demnach auf die betrieblich benötigte Maximalleistung ausgelegt werden, was dazu führt, dass er grösstenteils im Teillastbereich betrieben wird.

Die genannten Anforderungen verlangen nach einem Antrieb, der einen hohen Wirkungsgrad auch unter Teillast aufweist. Ein elektrischer Antrieb erfüllt dies auf nahezu ideale Weise, wobei der Aufwand für die Speicherung elektrischer Energie nachteilig ist. Es verwundert daher nicht, dass die Nutzung der Elektrizität zuerst bei den spurgeführten Systemen Anwendung fand. Hier war es möglich, die Energie über einfache Oberleitungen kontinuierlich zuzuführen, da die Schienen als Rückleiter zur Verfügung stehen. Dadurch entfiel die Notwendigkeit, die Energie auf dem Fahrzeug zu speichern. Bei den nicht-spurgeführten Systemen gewann hingegen, obwohl schon früh Versuche mit elektrischem Antrieb durchgeführt wurden, ab den 1920er-Jahren – trotz vergleichsweise geringerer Leistungsfähigkeit – der Verbrennungsmotor eine Vorrangstellung, da keine aufwändige Infrastruktur zur Energieversorgung notwendig war.

1.2 Historischer Abriss zur Elektromobilität im Stadtverkehr

1.2.1 Begriff

Der historischen Betrachtung soll ein Versuch zur Klärung des Begriffs «Elektromobilität» vorangestellt werden. Eine mögliche Definition lautet wie folgt:

In ihrer breitesten Bedeutung umfasst die Elektromobilität den Güter- oder Personentransport mit Fahrzeugen, die durch Elektromotoren angetrieben werden. Dies beinhaltet Züge, Trams und Trolleybusse

sowie Individualverkehrsmittel, die den Strom für ihren Antrieb aus Batterien, Kondensatoren, Brennstoffzellen oder sonstigen Generatoren beziehen.³

Im Anschluss wird diese recht breite Definition eingeschränkt, indem gewisse Fahrzeugtypen ausgeschlossen werden. Von Bedeutung ist hier der Ausschluss von Brennstoffzellenfahrzeugen, da deren Energieträger aus Erdgas hergestellt wird. Im Falle, dass «Wasserstoff aus elektrischer Energie über die Elektrolyse hergestellt [würde] [...], könnten Brennstoffzellenfahrzeuge auch als elektrische Fahrzeuge gelten».⁴ Ebenso werden Hybridfahrzeuge, deren Batterien nicht über das Stromnetz aufgeladen werden können, nicht als elektrische Fahrzeuge angesehen.⁵

In dieser Arbeit wird grundsätzlich die obige Definition, aber ohne die genannten Einschränkungen, zu Grunde gelegt. Insbesondere soll hier der meist nur auf den Individualverkehr bezogenen Anwendung des Begriffs entgegenge wirkt werden, denn auch Trams und Trolleybusse sind zweifellos «elektromobil». Die folgenden Abschnitte konzentrieren sich auf den nicht-spurgeführten strassengebundenen öffentlichen Verkehr, die Geschichte des Elektroautos wird hier nicht betrachtet.⁶

1.2.2 Strassenbahn

Die städtischen Verkehrssysteme sind Vorreiter in der Anwendung elektrischer Energie: Elektrisch angetriebene Fahrzeuge existieren im öffentlichen Stadtverkehr bereits seit über 130 Jahren. Im Mai 1881 wurde in Gross Lichterfelde⁷ der Betrieb auf der ersten elektrischen Strassenbahn der Welt aufgenommen. Die Stromzuführung erfolgte über die Fahrschienen, was sich als störanfällig herausstellte. Bereits ein Jahr später ging zwischen Charlottenburg und Spandau⁸ die erste Strassenbahn mit Oberleitung in Betrieb, die aber noch nach dem Kontaktwagenprinzip aufgebaut war.⁹ Um eine zuverlässige Stromabnahme zu erreichen, bedurfte es noch einiger Entwicklungsarbeit. Nachdem dieses Problem zufriedenstellend gelöst werden konnte (einen wichtigen Beitrag leistete hier u. a. Frank Sprague mit der Erfindung des Stangenstromabnehmers), begann der Siegeszug der Elektrizität, und in der Dekade zwischen 1890 und 1900 hatten bereits zahlreiche Betreiber auf elektrischen Betrieb umgestellt. Neue Systeme wurden (und werden) nun von Beginn an elektrisch betrieben.

³Haan und Zah 2013, S. 7 f.

⁴Haan und Zah 2013, S. 8.

⁵Haan und Zah 2013, S. 9.

⁶Einen informativen Überblick hierzu bieten z. B. Kampker, Vallée und Schnettler 2013, S. 6–15.

⁷Aus Gross Lichterfelde wurde 1920 der Berliner Stadtteil Lichterfelde.

⁸Auch diese beiden Städte gingen 1920 in «Gross-Berlin» auf.

⁹Bauer 1997, S. 10 f.

1.2.3 Trolleybus

Auch die Anfänge des Trolleybusses gehen auf die Frühzeit der elektrischen Verkehrssysteme zurück: Bereits im Jahre 1882 stellte Werner Siemens sein «Electromote» vor. Der von vornherein als Versuch deklarierte Betrieb auf einer 540 m langen Strecke in Charlottenburg lief zwar nur während sechs Wochen, Siemens konnte damit aber zeigen, dass elektrisch angetriebene Strassenfahrzeuge technisch machbar waren.¹⁰

Trotzdem dauerte es noch über 30 Jahre, bis die *Gleislose Bahn*, wie man damals den Vorläufer des modernen Trolleybusses nannte,¹¹ grössere Verbreitung fand. In Grossbritannien sah man den *trackless trolley* schon sehr früh als eine Möglichkeit an, Ersatzinvestitionen in die Gleisinfrastruktur von Strassenbahnen zu vermeiden. Die ersten Systeme wurden dort zwischen 1911 und 1915 eröffnet. Diese Phase kann als Experimentierphase bezeichnet werden, da sich noch kein System der Stromzuführung durchgesetzt hatte: Nicht weniger als acht verschiedene Stromübertragungssysteme wurden zu Anfang des 20. Jahrhunderts erprobt.¹² Vielen dieser frühen Netze war wegen technischer Unzulänglichkeiten und schlechter Strassenverhältnisse keine lange Einsatzdauer beschieden. Nach der kriegsbedingten Stagnation begann die Weiterentwicklung des Trolleybusses, und ab 1922 wurden neue Netze eröffnet, die nun nahezu ausschliesslich das Schiemannsche System nutzten, welches bis heute verwendet wird.¹³

Im Jahre 1901 wurde in Eberswalde der erste deutsche Trolleybusbetrieb eröffnet. Der ungenügende Strassenzustand, der zu Fahrzeugschäden führte, zwang jedoch schon nach wenigen Wochen zu dessen Einstellung.¹⁴ Gut zehn Jahre später, am 4. Januar 1912, eröffnete der erste Trolleybusbetrieb der Schweiz, dem immerhin 20 Einsatzjahre beschieden waren. Es handelte sich um eine Überlandlinie, die vom Bahnhof Fribourg nach Posieux, ab 1916 bis Farvagny (Streckenlänge 12,5 km) führte. Weitere Systeme wurden zunächst nicht eröffnet. In Deutschland fand der Trolleybus erst ab 1930, als auf der Strecke Mettmann–Gruiten der erste neuzeitliche O-Bus Deutschlands in Betrieb genommen wurde,¹⁵ eine grössere Verbreitung. Diese Entwicklung verstärkte sich, als mit Beginn des Zweiten Weltkrieges Stahl für Schienen knapp wurde und viele Strassenbahnbetriebe mit Rückständen bei der Instandhaltung zu kämpfen hatten. Gleichzeitig wurde der Dieselkraftstoff rationiert, womit Dieselbusse keine Alternative darstellten. Elektrische Energie konnte jedoch im Inland gewonnen werden, sodass man begann, viele Strassenbahnsysteme auf Trolleybus umzustellen. Die Umstellungen erfolgten meist nicht in einem Schritt, sondern Linie für Li-

¹⁰Bauer 1997, S. 11 f.

¹¹In Deutschland und Österreich hat sich hingegen die passendere Bezeichnung Oberleitungsbus, kurz *O-Bus* oder *Obus*, durchgesetzt. In Schweden (*trådbuss*) und Italien (*filobus*) wiederum spricht man vom «Drahtbus».

¹²Bauer 1997, S. 14.

¹³Lockwood 2011.

¹⁴Bauer 1997, S. 17 f.

¹⁵Bauer 1997, S. 58.

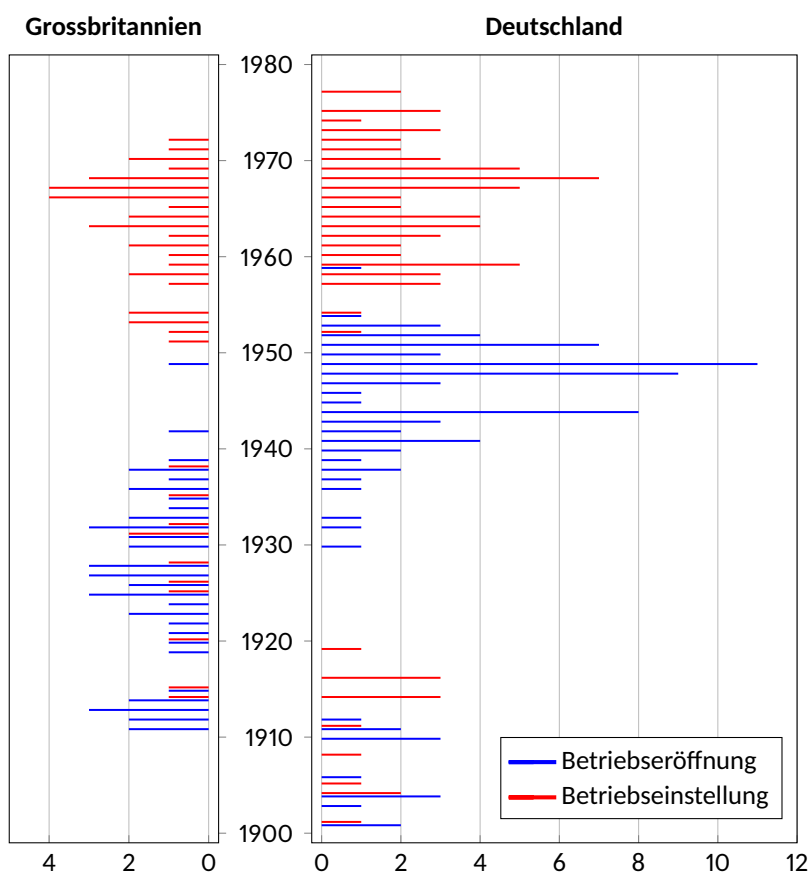


Abbildung 1.1: Betriebseröffnung und -einstellung von Trolleybusnetzen in Grossbritannien und Deutschland (Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Daten, die Aurich u. a. 2005, Bauer 1997 sowie Lockwood 2011 entnommen wurden)

nie, was einen (unerwünschten) Parallelbetrieb beider Systeme, oft über mehrere Jahre, zur Folge hatte.

In der Schweiz verlief die Entwicklung anfangs ähnlich wie in Deutschland. 1932 wurde in Lausanne der erste neuzeitliche Trolleybus in Betrieb genommen, weil die sehr anspruchsvolle Topographie den Strassenbahnbetrieb von Beginn an stark beeinträchtigt hatte.¹⁶ Mit dem «Nachzügler» Schaffhausen war 1966 die Maximalzahl von 18 Netzen erreicht.¹⁷

Ab Mitte der 1950er-Jahre hatte der Dieselbus eine solche technische Reife erlangt, dass er ein ernstzunehmender Konkurrent des Trolleybusses wurde. In der Folge wurden bis Mitte der 1960er-Jahre zahlreiche Trolleybussysteme durch Dieselbusse ersetzt. Hier wirkte der gleiche Mechanismus wie vier Jahrzehnte zuvor beim Ersatz von Strassenbahnen durch Trolleybusse, konnte doch beim Einsatz von Dieselbussen auf Fahrleitung und Unterwerke verzichtet werden. Ausnahmen waren Länder, wie beispielsweise Italien und die Schweiz, in denen To-

¹⁶Fatio 1938.

¹⁷Coppex 2008, S. 9.

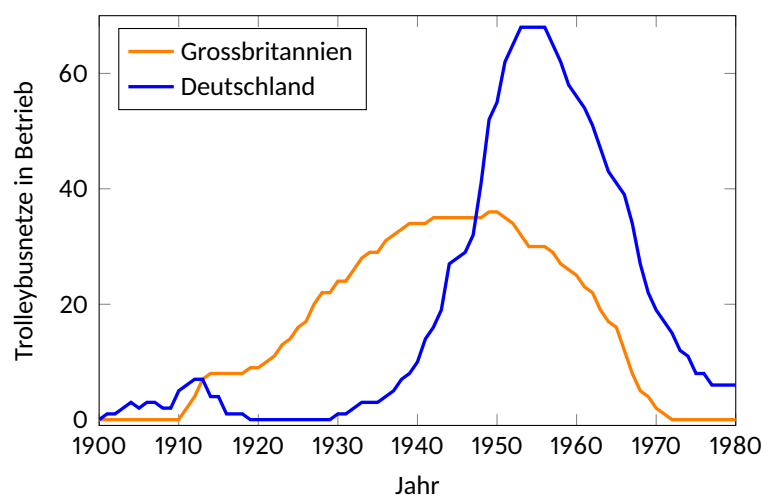


Abbildung 1.2: Anzahl in Betrieb befindlicher Trolleybusnetze in Grossbritannien und Deutschland (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Werte aus der Abbildung 1.1)

pographie (Steigungen) oder Energiepolitik (Autarkie, günstiger Strom aus Wasserkraft) die Erhaltung elektrischer Bussysteme angezeigt erscheinen liessen. Jedoch wurden selbst in der Schweiz fünf Netze auf Dieselbus umgestellt, darunter auch drei der vier Überlandstrecken.¹⁸ Somit verblieben dort bis heute immerhin 13 aktive Netze. In anderen Ländern wurde der elektrische Stadtverkehr hingegen ausgebaut, so vor allem in der Sowjetunion und zum Teil in Osteuropa. Hierfür waren vorrangig wohl ideologische Gründe ausschlaggebend (getreu der Losung «Elektrifizierung + Sowjetmacht = Kommunismus»).

Beispielhaft für Aufstieg und Niedergang des Trolleybusses in der westlichen Welt steht dessen Verbreitung in Deutschland und Grossbritannien. In beiden Ländern hatte er einst weite Verbreitung gefunden, während er heute entweder völlig verschwunden (Grossbritannien) oder nurmehr eine Randerscheinung ist (Deutschland). Allerdings verlief die Entwicklung nicht im Gleichschritt. Die Abbildung 1.1 zeigt, wann und wie viele Netze eröffnet und wieder eingestellt wurden. In Deutschland begann man zwar zehn Jahre eher, mit Gleislosen Bahnen zu experimentieren, jedoch wurden – offensichtlich bedingt durch den Ersten Weltkrieg – die wenigen Systeme bis 1919 wieder eingestellt. Der schon erwähnten Wiedereinführung ab 1930 war dann ein grösserer Erfolg beschieden. Auf den britischen Inseln kann hingegen eine gewisse Kontinuität festgestellt werden, da es keine solche Zäsur zwischen frühen und neuzeitlichen Systemen gibt (siehe Abbildung 1.2). Auch deswegen betrug die mittlere Lebensdauer der Netze in Grossbritannien 28 Jahre, während die deutschen Netze (die drei verbleibenden Betriebe nicht mitgerechnet) im Mittel auf nur knapp 18 Jahre kamen. Ohne dessen Weiterentwicklung in Grossbritannien hätte die zweite Phase der Verbreitung des Trolleybusses wohl kaum stattgefunden.

¹⁸Coppex 2008, S. 9.

Tabelle 1.1: Weltweite Verteilung der Trolleybusbetriebe

Region	Anzahl Städte mit Trolleybus
Europa (ohne Russland)	151
<i>davon</i> Ukraine	44
Italien	15
Schweiz	13
Tschechien	13
Bulgarien	13
Rumänien	10
Russland	85
Asien (ohne Russland)	54
<i>davon</i> Nordkorea	23
China	16
Afrika	0
Australien und Ozeanien	1
Nord- und Mittelamerika	8
Südamerika	9
Summe	308

Quelle: trolley:motion 2015.

Zwar ist der Trolleybus heute, verglichen mit der Allgegenwart des Dieselmotors, eher ein Exot im öffentlichen Verkehr. Dass seine Verbreitung dennoch nicht unterschätzt werden sollte, zeigt die Tabelle 1.1. Im Jahre 2015 existierten weltweit 308 aktive Netze, die Hälfte davon allein in Europa (ohne Russland). Somit konzentrieren sich die meisten Systeme auf vergleichsweise wenige Länder. Aber selbst in Ländern mit nur wenigen Netzen können diese eine beachtliche Grösse erreichen: Eines der grössten Netze der sogenannten «westlichen Welt» findet sich mit ca. 135 km Strecke in Athen,¹⁹ welches Griechenlands einziges Trolleybussystem ist, gefolgt von Salzburg mit (Stand 2010) knapp 67 km Streckenlänge²⁰ als eines von nur zwei Netzen in Österreich.

1.2.4 Versuche mit anderen Systemen

Eine eher kurze Episode blieb der Gyrobus, der im Jahre 1950 von der Maschinenfabrik Oerlikon vorgestellt wurde. Die Energie wurde in einem 1,5 t schweren Schwungrad gespeichert, das durch einen Drehstrommotor auf eine Drehzahl von bis zu 3000 min⁻¹ gebracht werden konnte. Die Aufladung erfolgte an Haltestellen, die mit einem dreipoligen Kontakt zur Stromabnahme ausgerüstet waren. In der Ebene sollen mit einer Aufladung Reichweiten von 5 km erzielt wor-

¹⁹Budach 2013.

²⁰Hondius 2010.

den sein. Zur Beschleunigung des Fahrzeugs wurde der Drehstrom-Asynchron-Fahrmotor²¹ direkt vom als Generator wirkenden Schwungradantriebsmotor gespeist.²² Der planmässige Einsatz von drei Fahrzeugen in Yverdon währte von 1953 bis 1960.²³ Aus heutiger Perspektive kann das System als Pionieranwendung des Ansatzes der Zwischenaufladung angesehen werden.

Bereits anfangs der 1970er-Jahre waren in Koblenz und München Versuche mit Batteriebussen durchgeführt worden.²⁴ Ein grösserer Versuch mit insgesamt 22 Fahrzeugen begann im Oktober 1974, als die Stadtwerke Mönchengladbach den elektrischen Betrieb mit 7 (ab 1978 dann 8) Fahrzeugen des Typs MAN SL-E einführten. Im Folgejahr führte auch die Rheinbahn auf einer Linie in Düsseldorf den elektrischen Betrieb ein, auf der 13 Fahrzeuge (14 ab 1976) des gleichen Typs zum Einsatz kamen. Die Bleibatterie wurde in einem einachsigen Anhänger mitgeführt, wog 6,1 t und speicherte 164 kWh. Die Batterien wurden mehrmals täglich automatisch gewechselt, da die Ladung nur für eine Fahrstrecke von etwa 80 km ausreichte, was einem spezifischen Energiebedarf von 2,0 kWh/Fzkm entspricht. Mönchengladbach gab 1981/82 seine Fahrzeuge an die Rheinbahn ab, die damit eine zweite Linie auf Batteriebusbetrieb umstellen konnten. 1982 wurde an der Benrather Endstelle eine Ladestation mit fünf Ladepunkten eingerichtet, an der die Busse in 10 bis 15 Minuten Wendezeit die Batterie wieder aufluden, wodurch der Batterietausch entfallen konnte. Im Mittel wurde eine Laufleistung von 45'000 km je Fahrzeug und Jahr erreicht. Ihr Einsatz endete, als jeweils eine Batterieerneuerung anstand, sukzessive bis zum Jahr 1988.²⁵

Im Jahre 1940 beschaffte die Trambahn der Stadt Luzern zwei dieselelektrische Autobusse. Der wichtigste Beweggrund war die Erhöhung der Beförderungskapazität durch die Abkehr vom damals üblichen Frontmotor, was die nutzbare Fläche des Fahrgastraums vergrösserte. Da die Schweizer Industrie keinen Unterflurmotor liefern konnte und ein Import unerwünscht war, kam nur eine elektrische Kraftübertragung in Betracht.²⁶ In den 1990er-Jahren versuchte man, durch die Anwendung des dieselelektrischen Antriebs Busse mit einem hohen Niederfluranteil zu konstruieren; zusätzlich bestand die Hoffnung, eine Kraftstoffersparnis zu erzielen.²⁷ Die elektrische Energieübertragung ermöglichte zwar eine freiere Wahl des Betriebspunkts des Dieselmotors, der Effizienzgewinn wurde aber durch den zusätzlichen Energiewandlungsschritt aufgezehrt. Elektrisches Bremsen trug zur Verschleissminderung der mechanischen Bremse bei, eine Rückgewinnung von Bremsenergie war aufgrund des fehlenden Speichers jedoch nicht möglich.

²¹Dieser Fakt ist besonders erwähnenswert, da die Drehstromantriebstechnik erst 30 Jahre später ihren Durchbruch erlebte.

²²Storsand 1951.

²³Hadorn und Jacobi 1988.

²⁴Geiling 2012.

²⁵Hanke 2015.

²⁶Siegwart 1940.

²⁷Rieck und Zelinka 1994.

1.3 Perspektiven und Herausforderungen

Angesichts des Klimawandels und der beständigen politischen Unsicherheit in zahlreichen Erdölförderländern muss der Verkehrssektor seinen Energiebedarf zukünftig verstärkt aus erneuerbaren Quellen decken. Diese sogenannte Dekarbonisierung wird durch die Nutzung elektrischer Energie wesentlich erleichtert. Sie lässt sich aus nahezu jeder Primärenergieform gewinnen und ist wegen des dichten Verteilnetzes fast überall verfügbar. Das senkt die Abhängigkeit von Öl- und Gasimporten, erhöht die Versorgungssicherheit und reduziert Emissionen. Notwendige Bedingung dafür ist die Elektrifizierung des Antriebsstrangs der Fahrzeuge.

Obwohl dieser Schritt äusserst wichtig für die Zukunft des ÖV ist, besteht derzeit aus monetärer Sicht noch zu wenig Druck, in alternative Antriebssysteme zu investieren. Beispielsweise bezogen die – bereits etwa 80 % ihrer Verkehrsleistung elektrisch erbringenden – VBZ im Jahre 2015 knapp 80 GWh Elektroenergie für die Traktion von Trams und Trolleybussen sowie rund 7 Millionen Liter Dieselmotorkraftstoff für den übrigen Busverkehr.²⁸ Nimmt man die Kosten für eine Kilowattstunde zu 0,10 CHF sowie einen Liter Diesel zu 1 CHF an, entspricht dies Energiekosten von immerhin 15 Millionen CHF.²⁹ Bei einem Sachaufwand von 126 Millionen CHF³⁰ beträgt der Anteil der Energiekosten somit knapp 12 %.

Eine grosse Herausforderung ist die Errichtung der Infrastruktur, die für den elektrischen Betrieb benötigt wird: Im Schienenverkehr sei die Elektrifizierung vorrangig durch das Verlangen nach Leistungssteigerung getrieben und habe daher schon vergleichsweise früh begonnen. Beim Busverkehr stelle der Leistungsbedarf hingegen nicht das entscheidende Kriterium für die Elektrifizierung dar, sondern das Bestreben nach Emissionsreduktion und höherer Energieeffizienz. Da der Umweltvorteil sich bislang nicht in entsprechenden Einnahmen für die Betreiber niederschläge, müsse der Kapitaldienst für die nötige Infrastruktur allein über die Energieeinsparung aufgebracht werden, was den nur sehr langsamen Fortschritt erkläre. Elektrischer Betrieb sei also stets eine Infrastrukturfrage, womit man im Busbereich bisher kaum konfrontiert worden sei.³¹ Auf den Punkt gebracht: «Auch Batterien brauchen Ladeinfrastruktur.»³²

1.4 Einsatzbereiche von Bus und Strassenbahn

Eine häufig diskutierte Systemfrage ist, ob eine Strassenbahn eingeführt werden soll oder ob ein Bussystem die Verkehrsaufgabe vielleicht wirtschaftlicher bewältigen kann. Dies gilt insbesondere, seitdem Bussysteme zunehmend leistungsfähiger werden.

²⁸VBZ 2016, S. 34.

²⁹Angaben zu den Energiekosten finden sich im Geschäftsbericht leider keine.

³⁰VBZ 2016, S. 52.

³¹Stephan 2017.

³²Stephan 2017.

higer werden und dadurch in Bereiche vorstossen, die bislang Strassenbahnen vorbehalten waren. Besonders aktuell ist dies vor allem in Ländern ohne oder mit nur wenigen Strassenbahnsystemen, wie beispielsweise Schweden mit nur drei Tramsystemen. Hier scheut man vor allem die hohen Investitionskosten für Strassenbahnen. Ein Beispiel hierfür ist Uppsala, die viertgrösste Stadt Schwedens, für die ein neues Liniennetz vorgeschlagen wurde.³³ Die Stammlinien sollen mit Trolleybussen bedient werden, wofür zwei Argumente angeführt werden: Erstens sei der Energieverbrauch von Trolleybussen niedriger als der von Dieselnbussen, zweitens könne die Energieversorgungsinfrastruktur bei einer späteren Konversion zu einem Strassenbahnsystem grossenteils weitergenutzt werden.

Auch in «Strassenbahnländern» wie Deutschland ist dieses Thema aktuell, weshalb die Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV) eine Studie herausgegeben hat, welche die Systemkosten von Strassenbahn und *Busbahn*³⁴ bei Neueinführung vergleicht.³⁵ Ausgehend von einem fiktiven Fallbeispiel wird errechnet, dass die Systemkosten der Busbahn bei nur 67 % derjenigen eines vergleichbaren Strassenbahnsystems liegen. Dem wird von anderer Seite widersprochen,³⁶ denn die Studie habe methodische Schwächen: So seien z. B. viele Kostenannahmen nicht nachvollziehbar, es werde keine Teuerung berücksichtigt und Systemzusammenhänge seien nicht beachtet worden. Die Autoren modifizieren die Berechnungen und kommen dadurch zu dem entgegengesetzten Ergebnis, dass das Strassenbahnsystem einen Kostenvorteil gegenüber dem Bussystem habe.

In einer früheren Studie zum Systemvergleich³⁷ sieht man vor allem eine konsequente Umsetzung begleitender Massnahmen, insbesondere hinsichtlich der ÖV-Priorisierung, als entscheidend für den Erfolg eines öffentlichen Verkehrssystems an. Hierbei habe die Strassenbahn einen Vorteil, weil es bei diesem System aufgrund der hohen erforderlichen Investitionen einfacher sei, diese Massnahmen politisch durchzusetzen. Die Unflexibilität werde so zu Sicherheit umgedeutet. Im Gegensatz verleiteten die Vorteile des Bussystems, Flexibilität und niedrigere Kosten, gegebenenfalls dazu, bei den begleitenden Massnahmen aus Kostengründen eher zurückhaltend vorzugehen.³⁸

Der Nutzerperspektive wird üblicherweise ein sogenannter Schienenbonus unterstellt, das Tram sei also positiver konnotiert als der Bus. Dieser Frage wurde am IVT in einer Dissertation³⁹ nachgegangen. Die in diesem Rahmen befragten Personen äusserten sich bei einer hypothetischen Wahl denn auch überwiegend

³³Bösch u. a. 2009.

³⁴In der Studie wird der Begriff folgendermassen definiert: Busbahn ist ein handgelenkter Grossraumbus im Individualdesign, der im Verkehrsraum öffentlicher Strassen im Regelfall auf einer Eigentrasse verkehrt (Deutsch 2008, S. 5).

³⁵Deutsch 2008.

³⁶Schröter und Siefer 2009.

³⁷Hass-Klau u. a. 2003.

³⁸Hass-Klau u. a. 2003, S. 5.

³⁹Scherer 2012.

gend positiv zum Tram, wobei dies vorrangig aus der aufgrund des Vortritts⁴⁰ als höher eingeschätzten Zuverlässigkeit resultierte. Bei der tatsächlichen Verkehrsmittelwahl konnten hingegen anhand einer umfangreichen Datenanalyse des Fahrgastverhaltens in ausgewählten Tram- und Buskorridoren keine signifikanten Unterschiede gefunden werden. Somit wird geschlussfolgert, dass bei gleichen gesetzgeberischen Voraussetzungen und gleichen Angebotsbedingungen ein Bussystem die gleiche Nachfragewirkung wie ein Tramsystem erzielen kann.⁴¹

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass zumindest in der Schweiz die Strassenbahn durch die Vortrittsregelung bevorteilt ist, was dieses Verkehrssystem grundsätzlich stärkt. Angesichts zunehmender Knappheit der öffentlichen Finanzmittel wird man dennoch ein neues Tramsystem nur dort einführen, wo das Fahrgastaufkommen einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglicht. Da sich diese Arbeit vorrangig mit dem Energiebedarf beschäftigt, muss hier eine weitere Berücksichtigung der Systemfrage «Bus oder Strassenbahn» unterbleiben. Das Berechnungsmodell wird jedoch so strukturiert, dass die Ergänzung des Tramsystems zu einem späteren Zeitpunkt mit vertretbarem Aufwand möglich ist.

1.5 Definitionen

1.5.1 Begriffe

In dieser Arbeit werden Begriffe verwendet, die zwar durchaus gebräuchlich sind, deren Abgrenzung jedoch teils unscharf ist. Ebenso kommt es vor, dass für ein und denselben Sachverhalt verschiedene Begriffe angewendet werden. Aus diesen Gründen werden in diesem Abschnitt die (potenziell) unklaren Begriffe so erläutert, wie sie in dieser Arbeit verstanden werden.

Eine umfassende Definition des Begriffes *Hybridfahrzeug*, die prägnant die wesentlichen Eigenschaften eines Hybridfahrzeugs beschreibt, lautet folgendermassen:

Ein Hybridfahrzeug ist ein konventionell betanktes und betriebenes Fahrzeug, das mit einem Antriebsstrang ausgerüstet ist, welcher mindestens die ersten drei der folgenden vier Hybridfunktionen abdecken kann:

1. Motorabschaltung, wenn der Leistungsbedarf Null oder negativ ist.
2. Kleinerer Motor («down-size») für verbesserte thermische Effizienz.
3. Rückspeisebremsung für Rückgewinnung und Wiederverwendung der Bremsenergie.

⁴⁰In der Schweiz sind Strassenbahnen vortrittsberechtigt, Busse hingegen nicht.

⁴¹Scherer 2012, S. III.

4. Antrieb mit abgeschaltetem Verbrennungsmotor bei niedriger Leistung (wenn dieser ineffizient ist).⁴²

Sie ist allerdings sehr eng gefasst, sodass man den Begriff «Hybridbus» nur auf Dieselhybridbusse anwenden dürfte. In dieser Arbeit soll aber ein erweitertes Verständnis dieses Begriffs zum Tragen kommen, indem alle Antriebsarten, die ihre Energie aus mehr als einer Energiequelle beziehen, als Hybridbusse bezeichnet werden.

Der Terminus *Batteriebus* ist streng genommen irreführend, denn in der deutschen Sprache bezeichnet «Batterie» ein sogenanntes Primärelement, also einen chemischen Energiespeicher, der nicht wieder aufgeladen werden kann. Ein wiederaufladbares Sekundärelement wäre korrekt mit «Akkumulator» zu bezeichnen. Da sich dieser – offensichtlich vom englischen Wort «battery» beeinflusste – Sprachgebrauch durchgesetzt hat, wird auch in dieser Arbeit von Batterien und Batteriebussen die Rede sein, zumal die Bezeichnung «Akkumulatorbus», wenn auch korrekt, nicht unbedingt eleganter ist.⁴³

Noch nicht gefestigt hat sich der Sprachgebrauch hinsichtlich der *Ladeverfahren* für Batteriebusse. Der einfachste, jedoch uneleganteste Weg wäre die Übernahme der Begriffe «overnight charging» für das nächtliche Laden im Betriebs-hof sowie «opportunity charging» für die Aufladung mit hoher Leistung tagsüber an den End- und ausgewählten Unterwegshaltestellen. Für Ersteres sollte problemlos «Nachtladung» anwendbar sein, während Letzteres mit «Gelegenheitsladung» eher unglücklich lehnübersetzt ist. Hierfür wird stattdessen der Begriff «Zwischenaufladung» vorgeschlagen und auch in dieser Arbeit verwendet.

Eine begriffliche Unschärfe besteht hinsichtlich derjenigen Energieverbraucher, die kein unmittelbarer Teil des Antriebsstrangs sind. So spricht man beispielsweise von Hilfsbetrieben, Bordnetzverbrauchern, Nebenverbrauchern sowie Heizung/Lüftung/Klimatisierung (HLK). Um es nicht zu kompliziert werden zu lassen, wird in dieser Arbeit nur von *Hilfsbetrieben* gesprochen und darunter sowohl die betriebsnotwendigen Einrichtungen (z. B. Motorkühlung, Fahrgastraumbelüftung) als auch die sogenannten Komforteinrichtungen (Heizung, Klimatisierung, Fahrgastinformation) zusammengefasst.

Elektrische Antriebsstränge sind prinzipiell rückspeisefähig, was bei modernen Fahrzeugen auch stets ausgenutzt wird. Sind sie fahrleistungsgebunden, so kann es bei bestimmten Varianten der Einspeisung vorkommen, dass kein Abnehmer für die rekuperierte Energie verfügbar ist, diese Energie somit in Bremswiderständen oder mittels mechanischer Bremsung in Wärme umgewandelt werden muss. Um dies zu berücksichtigen, wird der *Rekuperationsgrad* eingeführt, welcher die mittlere Aufnahmefähigkeit des Fahrleitungsnetzes beschreibt. Ein

⁴²Michael Tamor (Ford Motor Company), zitiert nach Andersson 2001, S. 5 (eigene Übersetzung).

⁴³In diesem Zusammenhang ist erwähnenswert, dass zwischen etwa 1910 und 1995 bei deutschen Eisenbahnen elektrische Triebwagen im Einsatz waren, die ihre Antriebsenergie ausschliesslich aus Akkumulatoren bezogen und folgerichtig als «Akkumulatortriebwagen» oder auch «Speichertriebwagen» bezeichnet wurden.

Rekuperationsgrad von 1 bedeutet, dass die bei der elektrischen Bremsung generierte Energie vollständig in die Fahrleitung zurückgespeist werden kann, während beim Wert Null keine Rückspeisung möglich ist. Dieser Ansatz geht implizit davon aus, dass die gesamte Fahrzeugflotte rückspeisefähig ist. Ist das nicht der Fall, sollte man den Rekuperationsgrad um den Anteil der nicht rückspeisefähigen Fahrzeuge reduzieren. Die Voraussetzung dafür ist aber, dass sie möglichst gleichmässig im Netz verteilt eingesetzt werden.

1.5.2 Umrechnungsfaktoren

Ein Vergleich von Energiebedarfswerten ist natürlich nur möglich, wenn die zu vergleichenden Werte in derselben Einheit angegeben sind; in dieser Arbeit wird dies meist in Kilowattstunden geschehen. Insbesondere für die fossilen Energieträger ist dies jedoch wenig anschaulich, sodass zusätzlich eine Umrechnung in Liter Dieseläquivalent je 100 Fzkm und je 100 Pkm erfolgt. Ausserdem ist für den Gasbus eine Umrechnung in die Menge verbrauchten Erdgases sowie für den Brennstoffzellenbus in die Menge verbrauchten Wasserstoffs (jeweils in Kilogramm je 100 Fzkm) notwendig.

Tabelle 1.2: Dichten und Heizwerte der Kraftstoffe und die daraus abgeleiteten Umrechnungsfaktoren

Kraftstoff	Dichte ^a	Heizwert in MJ/kg	Umrechnungsfaktor
Diesel	0,820 ... 0,845	42,9 ... 43,1	9,91 kWh/l ^b
Erdgas H (Nordsee)	0,83	46,7	12,97 kWh/kg
Erdgas H (Russland)	0,73	49,1	13,64 kWh/kg
Erdgas L	0,83	40,3	11,19 kWh/kg
Wasserstoff	0,09	120,0	33,33 kWh/kg

^a Werte in kg/l (Diesel) oder kg/m³ (Gase)

^b Annahmen für Diesel: Dichte 0,83 kg/l, Heizwert 43,0 MJ/kg

Dichten und Heizwerte gemäss Robert Bosch GmbH 2014, S. 316 f.

Erdgas und Dieselkraftstoff sind Gemische verschiedener chemischer Verbindungen, sie weisen je nach Herkunft des Rohstoffs eine unterschiedliche Zusammensetzung auf, weshalb auch keine einheitlichen Umrechnungsfaktoren existieren. Um die Berechnungen einheitlich und nachvollziehbar zu gestalten, ist für jeden der beiden Kraftstoffe ein Umrechnungsfaktor festzulegen. Die Tabelle 1.2 gibt einen Überblick und nennt den hier ausgewählten Wert für Dieselkraftstoff. Bei Erdgas gestaltet sich die Festlegung schwieriger, da nicht klar ist, welches Gas angewendet wird und überdies regionale Abweichungen existieren dürften. Als Kompromiss wurde daher mit 12 kWh/kg ein Wert gewählt, der zwischen Erdgas L und Erdgas H liegt.

1.6 Struktur der Arbeit

Diese Arbeit besteht, einschliesslich dieses ersten, einleitenden Kapitels, aus sieben Hauptkapiteln. Im 2. Kapitel werden, als Ausgangspunkt der Untersuchungen, bisherige Ansätze des Vergleichs von Bussystemen kurz vorgestellt und auf deren Basis die Forschungsfrage formuliert sowie die Hypothesen abgeleitet. Es folgt im 3. Kapitel der Versuch, einen Überblick über den aktuellen Stand der technischen Entwicklungen zu geben. Eine frühe Version dieses Kapitels ist im Dezember 2014 der Zeitschrift *Verkehr+Technik* veröffentlicht worden.⁴⁴

Mit dem 3. Kapitel sind die Vorbetrachtungen abgeschlossen und es folgt mit den Kapiteln 4 und 5, die der Beschreibung der Vergleichsmethodik gewidmet sind, der zweite Teil dieser Arbeit. Während im 4. Kapitel das Energiebedarfs-Berechnungsmodell hergeleitet und beschrieben wird, beschäftigt sich das 5. Kapitel mit dem Primärenergiebedarf und den Emissionen und bettet das Berechnungsmodell in die Vergleichsmethodik ein. Dem schliesst sich eine Validierung in Form eines Vergleichs von berechneten und realen Verbrauchswerten an. Eine frühere Modellversion, die noch auf den SORT-Zyklen basierte und ausschliesslich mittels Tabellenformeln in MS Excel realisiert war, wurde im Juli 2015 der *Schweizer Eisenbahn-Revue* vorgestellt.⁴⁵ Am 11. Januar 2016 wurde diese zudem in Washington, D.C. im Rahmen des *95th Annual Meeting of the Transportation Research Board* präsentiert, dem im gleichen Jahr eine Veröffentlichung im *Transportation Research Record* folgte.⁴⁶

Der dritte und letzte Teil wird durch das 6. Kapitel eingeleitet, das einige mit dem Modell berechnete Ergebnisse vorstellt, wobei sowohl generische Fälle als auch reale Buslinien betrachtet werden. Den Abschluss der Arbeit bildet das 7. Kapitel, in dem die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Zudem erfolgt eine kritische Reflexion der Arbeit und der weitere Forschungsbedarf wird benannt. Ergänzend finden sich im Anhang verschiedene vertiefende Betrachtungen, die zum inhaltlichen Verständnis beitragen, den Haupttext aber zu unübersichtlich hätten werden lassen.

⁴⁴Schwertner und Weidmann 2014.

⁴⁵Schwertner und Weidmann 2015.

⁴⁶Schwertner und Weidmann 2016.

2

Forschungsfrage

2.1 Beweggründe

Der öffentliche Verkehr leistet bereits einen bedeutenden Beitrag zu einem umweltfreundlicheren Verkehr. Dennoch besteht angesichts steigender verkehrsbedingter Emissionen (vor allem Treibhausgasen, Stickoxiden und Feinstaub) weiterhin der Wunsch nach einer Reduktion sowohl der Emissionen als auch des Energiebedarfs. Insbesondere bei Bussystemen ist der Anteil elektrisch betriebener Fahrzeuge vergleichsweise gering, die Umweltbilanz des ÖV kann also durchaus verbessert werden. Die Fortschritte in der Batterietechnologie (die sich vorrangig in sinkenden Preisen statt in steigender Energiedichte äussern) lassen die Anwendung teil- und vollelektrischer Antriebsstränge zunehmend praktikabel erscheinen.

Die Anstrengungen von staatlichen Stellen, Fahrzeugherstellern und ÖV-Betreibern haben inzwischen aber zu einer Variantenvielfalt bei der Gestaltung des Antriebsstrangs geführt. Die Dominanz des Dieselmotors wird zukünftig abnehmen, gleichzeitig ist derzeit nicht absehbar, welche der neuen Technologien sich durchsetzen wird. Bislang fehlt ein übergreifender Vergleich dieser Antriebssysteme, der auch dem Energiebedarf gebührende Aufmerksamkeit widmet. Die Herausforderung ist hierbei, dass ein solcher Vergleich sich nicht allein auf antriebstechnische Parameter beschränken darf, sondern auch betriebliche Randbedingungen berücksichtigen muss.

Trotz der erwähnten Anstrengungen scheint das derzeit einzige bewährte vollelektrische Bussystem, der Trolleybus, nicht die Aufmerksamkeit zu erhalten, die ihm zukommen müsste. Angesichts der Entwicklungen zum abschnittsweise oberleitungsfreien Betrieb ergibt sich hier durchaus eine Zukunftsperspektive. In diesem Zusammenhang könnte beispielsweise die Elektrifizierung der Bündelungstrassen von BRT-Systemen (Bus Rapid Transit) eine interessante Option darstellen.¹

¹Ein solcher Ansatz wurde vom Institut für Bahntechnik (IfB) untersucht, siehe Körner und Brandes 2014.

2.2 Bisherige Systemvergleiche

Der vermutlich erste Anbieter einer Methodik zum Vergleich von Bussystemen ist die Firma Verkehrs-Consult Dresden-Berlin GmbH (VCDB), deren «Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV» (BeSystO) im Jahre 2015 vorgestellt wurde.² Bislang handelt es sich dabei um das einzige kommerzielle Produkt, das dem Autor bekannt ist. Es ermöglicht einen Systemvergleich von Diesel- (als Referenzsystem), Batterie- und Trolley-Hybridbussen auf Basis der SORT-Zyklen.³ Verschiedene Module dienen zur Eingabe der Eingangswerte sowie der Bestimmung von benötigter Infrastruktur, Energiebedarf, Kosten und Umweltauswirkungen. Schwerpunkt des Vergleichs scheint die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf Basis des TCO-Ansatzes (total cost of ownership) darzustellen, das Ziel ist eine Bewertung der Einführung von Batteriebussen für einen konkreten Anwendungsfall.

An der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) entstand im Jahre 2016 die Bachelorarbeit «Entwicklung eines Beratungstools für die E-Busbeschaffung», welche mit dem LITRA-Preis ausgezeichnet wurde.⁴ Es werden die Systeme Diesel-, Dieselhybrid-, Brennstoffzellen-Hybrid- und Batteriebus miteinander verglichen, wobei der Schwerpunkt auf der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung liegt. Eine Berechnung des Energiebedarfs erfolgt nicht, stattdessen werden spezifische Energieverbrauchswerte in kWh/km als Eingabewerte verwendet. In der Gesamtbetrachtung liegt der Batteriebus hinsichtlich der Kosten hinter dem Dieselsebus und knapp vor dem Dieselhybridebus an zweiter Stelle.

Auch in anderen Ländern beschäftigt man sich mit dem Vergleich von Bussystemen. Auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche kam man in Kanada u. a. zu der Schlussfolgerung, dass das Abschneiden der elektrischen Busse in hohem Masse vom Strommix und den betrieblichen Anforderungen abhängt.⁵ Verglichen wurden die Systeme Dieselhybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Hybridbus in qualitativer Hinsicht, basierend auf Zahlenwerten aus den zitierten Quellen.

Eine Untersuchung aus Finnland beruht hingegen auf Werten, die mittels einer Modellrechnung erhalten wurden.⁶ Basis war das auf MATLAB basierende ADVISOR-Modell⁷ des amerikanischen National Renewable Energy Laboratory (NREL). Anhand sechs verschiedener vordefinierter Fahrzyklen wurden je zwei parallele und serielle Dieselhybridebusse sowie ein Batteriebus mit einem Dieselsebus verglichen, wobei es sich um generische Fahrzeuge handelte. Es wurden die Energieersparnis sowie die Emissionsreduktion der fünf (teil)elektrischen Fahr-

²Lange und Otto 2015.

³UITP 2009.

⁴Kryeziu und Brack 2017.

⁵Mahmoud u. a. 2016.

⁶Lajunen 2014.

⁷Eine, wenngleich nicht mehr ganz aktuelle, Beschreibung findet sich in Wipke, Cuddy und Burch 1999.

zeuge dem Dieselbus gegenübergestellt. Zudem wurde eine Betrachtung der Lebenszykluskosten vorgenommen, bei der zwar der Dieselbus stets am besten abschnitt, aber der Abstand vor allem zu den parallelen Hybridbussen sehr gering ausfiel. Generell scheinen manche Kostenannahmen zu optimistisch zu sein, da der Batteriebus im ungünstigsten Falle Mehrkosten von nur etwa 25 % gegenüber dem Dieselbus aufwies.⁸ Vor allem angesichts der benötigten Ladeinfrastruktur dürfte dieser Wert zu niedrig sein.

Obwohl es sich nicht um einen Systemvergleich im Sinne einer Methodik handelt, liefert der Bericht «Bus der Zukunft» von Infrac⁹ einen guten Überblick über den aktuellen Stand hinsichtlich der Sichtweise auf elektrische Busse in der Schweiz. Begrüssenswert ist insbesondere, dass darin dem Energiebedarf der Hilfsbetriebe grössere Aufmerksamkeit zuteil wird, denn dieser Aspekt ist bislang meist sträflich vernachlässigt worden. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt die kürzlich veröffentlichte Systemstudie «Stand und Entwicklungstendenzen bei elektrisch betriebenen Linienbussen»,¹⁰ die sich vertieft den technischen Zusammenhängen widmet und eine umfassende Einführung in den aktuellen Entwicklungsstand elektrischer Bussysteme bietet.

Es ist keineswegs auszuschliessen, dass es noch weitere Ansätze für Systemvergleiche gibt. Zumindest bei den hier erwähnten kann als positiv angesehen werden, dass alle Modelle mehr als zwei Antriebssysteme vergleichen und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beinhalten. Als nachteilig ist jedoch Folgendes anzusehen:

1. Der Vergleichsumfang ist dennoch eher beschränkt, vor allem der Trolleybus und meist auch der Trolley-Hybridbus werden nicht berücksichtigt.
2. Die Energiebedarfsberechnung erfolgt nur auf Basis von festen Fahrzyklen oder sie fehlt ganz.
3. Es ist nicht erkennbar, inwieweit z. B. Neigungsverhältnisse oder die Fahrgastzahl (Besetzung) berücksichtigt werden.
4. Wenn eine Simulation implementiert ist, sind die Modelle auf teure, ausserhalb der akademischen Welt unübliche Software angewiesen.

Somit lässt sich konstatieren, dass die bisherigen Ansätze zu wenig flexibel sind. Die realen Linienparameter variieren zu stark, als dass sie mittels einfacher Fahrzyklen hinreichend genau abgebildet werden könnten, was zur Folge hat, dass die Energiebedarfsberechnung nicht verlässlich genug ist. Weiterhin sollten nicht nur Mitarbeiter in Forschungseinrichtungen, sondern auch Praktiker in ÖV-Unternehmungen und Behörden mit einem solchen Werkzeug umgehen können, was die Implementierung des Modells auf einer verbreiteten Plattform erfordert.

⁸Lajunen 2014, S. 13.

⁹Wüthrich und Strahm 2016.

¹⁰Hammer u. a. 2017.

2.3 Forschungsfrage und Hypothesen

Die genannten Beweggründe, die geringe Anzahl der bisher implementierten Systemvergleiche und deren Schwachstellen führen zur Forschungsfrage, welche folgendermassen formuliert wird:

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?

In der vorliegenden Arbeit soll der Versuch unternommen werden, diese Forschungsfrage positiv zu beantworten und den Akteuren damit ein brauchbares Werkzeug an die Hand zu geben. Ausgehend von der Forschungsfrage können die folgenden Hypothesen aufgestellt werden:

1. Der Antriebsstrang von Bussen kann auf systemtheoretischer Basis, also unabhängig von der konkreten technischen Realisierung, modelliert werden.
2. Das Zusammenwirken der Subsysteme lässt sich mittels Überlagerung von Energieflüssen abbilden.
3. Für alle Einsatzbedingungen im Stadtverkehr lässt sich mindestens ein dafür geeignetes Antriebssystem bestimmen.
4. Der Energiebedarf elektrischer Antriebssysteme ist stets geringer als der des Referenzsystems Dieselbus.

2.4 Methodik

Der methodische Ansatz besteht im Kern aus der Entwicklung eines Berechnungsmodells auf fahrdynamischer Basis, das den Energiebedarf am Rad und bezogen auf den Speicher ermittelt. Dies stellt sicher, dass sowohl die Flexibilität ausreichend gross ist, um die spezifischen örtlichen Parameter in der Berechnung abzubilden, als auch eine hinreichende Genauigkeit der Berechnung erreicht wird. Mittels einer Systemanalyse wird ein für alle in den Vergleich einbezogenen Antriebssysteme gültiges Fahrzeugmodell abgeleitet. Auf dieser Basis ist durch eine Energieflussanalyse festzustellen, welche Energieflüsse im Fahrzeugmodell wirksam sind. Diese dienen dazu, den mit Hilfe des Berechnungsmodells bestimmten Energiebedarf am Rad auf den Energiebedarf ab Speicher (oder Fahrleitung) umzurechnen.

Angelehnt an die Methodik der Lebenszyklusanalyse (LCA) werden, auf Basis des berechneten Energiebedarfs ab Speicher, der Primärenergiebedarf und die Emissionen abgeschätzt. Hierbei wird auch der Versuch unternommen, die sogenannte graue Energie zu quantifizieren. Eine vollumfängliche LCA würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Ergänzt werden die genannten Methoden durch eine Bestandesaufnahme der aktuellen Entwicklung in Form einer Literaturrecherche, welche wissenschaftliche und technische Fachzeitschriften und Fachbücher sowie zahlreiche technische Berichte einbezieht. Die hierdurch gewonnenen Erkenntnisse fließen in das Berechnungsmodell ein.

3

Aktueller Forschungsstand

3.1 Einleitung

Der Betrieb von Linien des städtischen öffentlichen Personenverkehrs ist durch eine lange tägliche Einsatzdauer, häufige Beschleunigungs- und Bremsvorgänge sowie stark schwankende Fahrgastzahlen im Tagesverlauf gekennzeichnet. Somit muss der Antriebsstrang der Fahrzeuge auf die Spitzenleistung ausgelegt werden, was diesen im Durchschnitt nur mässig auslastet. Ein Fahrzeugtausch innerhalb eines Betriebstages ist oft nicht praktikabel, sodass die Tagesenergie für Antrieb und Hilfsbetriebe mitgeführt (oder kontinuierlich bereitgestellt) werden muss. Dieses Zusammenspiel aus Leistungsvermögen und Energiespeicherung bestimmt wesentlich den Entwurf und den Erfolg alternativer Antriebskonzepte.

Bei Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang kommen diese Nachteile in geringerem Ausmass zum Tragen. Vor allem die örtlichen Schadstoffemissionen lassen sich senken oder sogar ganz vermeiden, zudem kann elektrisch gebremst werden, was die Einsatzhäufigkeit der mechanischen Bremsen und damit deren Verschleiss reduziert. Die Rückgewinnung eines wesentlichen Teils der Bremsenergie reduziert den Energiebedarf. Bis heute ist jedoch die Energiebereitstellung die grösste Herausforderung geblieben, weil einzig die stationäre Energieversorgung mittels Fahrleitungen als ausgereift angesehen werden kann. Die Energie- und Leistungsdichte eines solchen Systems ist so gross, dass sie keinen betrieblich begrenzenden Faktor darstellt. Diesem Vorteil steht der Nachteil der Bindung an das Fahrleitungsnetz gegenüber. Versuche mit Batteriebussen offenbaren bislang vor allem die unzureichende Energiedichte der Speicher. Vollelektrische Busse ohne Fahrleitung können zukünftig erst dann erfolgreich sein, wenn sich ihre Einsatzparameter denen von Dieselnissen angeglichen haben. Ein vielversprechender Schritt in diese Richtung ist die Zwischenaufladung an einzelnen Haltestellen mittels Schnellladestationen.

Im Folgenden soll auf Basis einer Literaturrecherche ein Überblick über den aktuellen Stand der Elektromobilität im öffentlichen Verkehr gegeben werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den verschiedenen sogenannten alternativen Konfigurationen des Antriebsstrangs.

3.2 Überblick über die im Einsatz befindlichen Antriebstechnologien

3.2.1 Dieselbusse

Derzeit dominiert der Dieselbus den nicht-spurgeführten öffentlichen Strassenverkehr, was im Wesentlichen in drei Faktoren begründet liegt. Erstens haben die jahrzehntelange Weiterentwicklung und die Produktion grosser Stückzahlen zu zuverlässigen und kostengünstigen Fahrzeugen geführt. Zweitens konnten auch die Schadstoffemissionen durch verbesserte Kraftstoffe, innermotorische Massnahmen sowie wirksame Abgasnachbehandlung (Einsatz von Partikelfiltern sowie mittels Harnstoffzugabe zum Verbrennungsvorgang,¹ was bei heutigen Neufahrzeugen inzwischen Standard ist) merklich gesenkt werden.² Nicht zuletzt ist es aber die hohe Energiedichte der flüssigen Kraftstoffe, welche zur beispiellosen Dominanz dieses Energieträgers im Strassenverkehr geführt hat. Auf den Fahrzeugen kann stets ausreichend Energie auf kleinstem Raum mitgeführt werden, womit es zu keinen Einschränkungen der Flexibilität, der Reichweite und des Platzangebots kommt. Das Auftanken (also das «Aufladen» des Tanks) geschieht zudem mit einer hohen Ladeleistung: Die Energiedichte von Diesel³ beträgt rund 10 kWh/l; nimmt man einen Stoffstrom von 2 l/s beim Betanken an, entspricht dies einer Ladeleistung von beachtlichen 72 MW.

Die wesentlichen Nachteile des Dieselbusses sind und bleiben jedoch dessen Abhängigkeit vom fossilen Rohstoff Erdöl, der Ausstoss von CO₂ und der nur mässige Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors. Letzterer lässt sich aus physikalischen Gründen kaum weiter steigern, sodass diesem Wirkungsgradnachteil nur auf der nächsthöheren Systemebene, dem System «Fahrzeug», begegnet werden kann, indem man beispielsweise die Motorabwärme zur Energieversorgung der Nebenbetriebe nutzt.⁴ Eine praktische Anwendung dieses Verfahrens bei Strassenfahrzeugen ist bisher aber nicht bekannt. Ein weiterer systembedingter Nachteil ist, dass die kinetische Energie des Fahrzeugs beim Bremsvorgang nur in (kaum anderweitig nutzbare) thermische Energie umgewandelt werden kann.

3.2.2 Biodiesel-, Biogas und Erdgasbusse

Dieselmotoren lassen sich mit vergleichsweise geringem Aufwand auf die Verbrennung biogener Kraftstoffe umrüsten. Somit scheint dies ein einfacher Weg zu sein, die CO₂-Emissionen zu verringern und gleichzeitig am gewohnten Antriebsstrang festhalten zu können. Inzwischen sind jedoch einige Schwierigkeiten

¹Siehe z. B. Dubrowsky, Eberwein und Pütz 2004.

²Pütz 2011, S. 143.

³Siehe Tabelle 1.2 auf Seite 13.

⁴Pütz 2010.

deutlich geworden. Die Konkurrenz zwischen der Produktion von Energie- und Lebensmittelpflanzen, die Konkurrenz in der Verwendung der Biomasse (z. B. für Strom- oder Wärmeproduktion) und der Einfluss von Industriezweigen, welche die Biomasse stofflich nutzen (z. B. Papierindustrie) sorgen für Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Verfügbarkeit.⁵ Weiterhin

führt die Biotreibstoffproduktion nicht immer zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Vergleich zum fossilen System, weil die Erschliessung neuer Landflächen für deren Anbau oder der Düngemittelseinsatz in der Landwirtschaft hohe Treibhausgasemissionen verursachen können.⁶

Zudem gibt es Anzeichen, dass der Anbau von Energiepflanzen durch die Steigerung der Nachfrage nach Anbauflächen die ohnehin schon grossen strukturellen Probleme in Entwicklungsländern, wie Konzentration des Landbesitzes, Verdrängung von Kleinbauern und Landflucht, verstärkt.⁷ Der aktuelle Wissensstand lässt sich folgendermassen zusammenfassen:

Biotreibstoffe können eine Reduktion des fossilen Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen ermöglichen. Sie führen aber oft auch zu einer Verlagerung der Umweltauswirkungen und generieren dadurch neue Umweltprobleme. Die aus Umweltsicht besten Produktionspfade basieren auf der Methanisierung von Bioabfällen und auf Biomasse aus nachhaltiger Waldbewirtschaftung.⁸

Angesichts der erwähnten Konkurrenzierung durch andere Verwendungen ist es fraglich, ob je ausreichende Mengen Biogas zur Verfügung stehen werden, um die Energiebasis desjenigen Teils des öffentlichen Verkehrs, der bislang von fossilen Energien abhängt, umzustellen.

Die Erschliessung sogenannter unkonventioneller Gasvorkommen (Schiefergas) könnte zukünftig dem Erdgasbus eine grössere Bedeutung verleihen. Das im Vergleich zu Dieselkraftstoff bessere Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoff führt zu einer um etwa 20 % niedrigeren CO₂-Emission bei der Verbrennung von Erdgas. Allerdings ist die Speicherung gasförmiger Kraftstoffe auf dem Fahrzeug vergleichsweise aufwändig. Inzwischen existieren jedoch erprobte Lösungen, so dass Erdgasbusse eine grössere Verbreitung gefunden haben. Durch eine generelle Umstellung auf Erdgas würde man allerdings die Abhängigkeit lediglich auf einen anderen fossilen Energieträger verlagern, weshalb Erdgasbusse wohl nur als eine Übergangslösung angesehen werden können, bis sich der elektrische Antriebsstrang, in welcher Ausprägung auch immer, durchgesetzt haben wird.

⁵Streissler 2010, S. 9.

⁶Faist Emmenegger u. a. 2012, S. IV.

⁷Streissler 2010, S. 69 f.

⁸Faist Emmenegger u. a. 2012, S. IX.

3.2.3 Trolleybusse

Das bislang einzige System mit einem dem Dieselbus vergleichbaren Reifegrad stellt der Trolleybus dar, welcher darüber hinaus bis heute das einzige in nennenswerter Anzahl angewendete vollelektrische Bussystem ist.⁹ Der Trolleybus fährt lokal (und, eine Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Quellen vorausgesetzt, auch global) ohne Schadstoff- und Treibhausgasemissionen. Eine Reichweitenbeschränkung besteht aufgrund der kontinuierlichen Energiezuführung nicht, dafür sind die Fahrzeuge an das Fahrleitungsnetz gebunden. Mittels einer leistungsfähigen Batterie anstelle eines Diesel-Hilfsantriebs können mehrere Kilometer fahrleitungslos im elektrischen Betrieb¹⁰ gefahren werden, weshalb dieser Nachteil inzwischen weniger stark ins Gewicht fällt. Die Leistungsgrenze der Oberleitung ist gross genug, dass sie im Normalbetrieb keine Rolle spielt. Trolleybusse können daher selbst auf steigungsreichen Strecken noch hohe Beschleunigungswerte erreichen. Die Hauptnachteile sind der erhebliche Aufwand für die Errichtung der Infrastruktur sowie die hohen Beschaffungskosten für die Fahrzeuge, was die wesentlichen Ursachen für seine geringe Verbreitung sein dürften.

Das im Jahre 2013 abgeschlossene europäische Forschungsprojekt «TROLLEY»¹¹ hatte das Ziel, diesen Nachteilen abzuhelfen. Von den publizierten Berichten sind hier vor allem zwei interessant: ein Erfahrungsbericht zu Energiespeichern auf dem Fahrzeug¹² sowie eine Potenzialanalyse des Einsatzes stationärer Energiespeicher.¹³ Diese können, gemäss den dort aufgeführten Simulationsergebnissen, je nach Fahrzeugtyp zu einer mittleren Energieersparnis von entweder 34,8 %¹⁴ oder 19,0 %¹⁵ führen. Im ersten Fall wurde ein älteres Fahrzeug ohne, im zweiten Fall ein neueres mit Klimaanlage zu Grunde gelegt. Der Energiebedarf der Klimaanlage reduziert den Anteil der ins Netz zurückgespeisten Bremsenergie deutlich. Statt durch stationäre Energiespeicher lässt sich der Energiebedarf auch mittels Energiespeichern auf dem Fahrzeug senken: Testfahrten in Mailand (23.-24.07.2009) mit einem mit Superkondensatoren (0,33 kWh) ausgerüsteten Gelenkbus¹⁶ ergaben eine Energieeinsparung von 28,6 % gegenüber Fahrten mit demselben Fahrzeug bei abgeschaltetem Speicher. Es wurden zehn ca. 240 m lange, ebene Streckenabschnitte, davon je fünf mit und ohne aktiven Speicher gefahren. Die Fahrzeuggesamtmasse betrug 28,5 t und die Aussentemperatur lag bei über 35 °C.¹⁷ Ein ähnlicher Test wurde am 29.01.2013 in Parma

⁹Im Jahre 2015 existierten weltweit immerhin 308 Trolleybussysteme, siehe Tabelle 1.1 auf Seite 7.

¹⁰So z. B. der «erste Oberleitungshybridbus Europas» in Eberswalde, siehe Kutzner 2013, Teil B(IV), S. 99–101.

¹¹INTERREG Central Europe project TROLLEY – Promoting electric public transport

¹²N. N. 2013a.

¹³N. N. 2013b.

¹⁴N. N. 2013b, S. 23.

¹⁵N. N. 2013b, S. 29.

¹⁶Technische Angaben zu diesen Fahrzeugen finden sich in Schmitz und Böhm 2011.

¹⁷N. N. 2013a, S. 18–22.

durchgeführt¹⁸ und ergab eine Energieeinsparung von 26,7 % (Gesamtmasse des Fahrzeugs 30 t, Aussentemperatur 1 °C).

Oft wird die – vermeintliche oder tatsächliche – visuelle Beeinträchtigung des Stadtbildes durch die Fahrleitungsanlage kritisiert. Während komplexe Kreuzungspunkte durchaus problematisch sein können, gilt dies kaum für die freie Strecke. Leider gibt es zu diesem Thema nur sehr wenige Empfehlungen, wie man die Oberleitungen besser in das Stadtbild integrieren kann.¹⁹ Dass Oberleitungen auch in einem sensiblen Umfeld nicht störend sein müssen, zeigt das Beispiel des Unesco-Weltkulturerbes Berner Altstadt (Abbildung 3.1).



Abbildung 3.1: Zwei HESS-Gelenktrolleybusse von Bernmobil (Haltestelle Rathaus, 07.04.2017). Inwiefern die Oberleitungen hier das Stadtbild beeinträchtigen, möge der Betrachter selbst entscheiden.

Neueinführungen von Trolleybussystemen sind derzeit eher selten, könnten aber für solche Städte interessant sein, in denen das Verkehrsaufkommen zwar hoch ist, es den Bau einer Strassenbahn jedoch nicht rechtfertigt. Ein Beispiel dafür ist die türkische Stadt Malatya, wo im Jahre 2014 ein Trolleybussystem eröffnet wurde.²⁰ Gut sechs Jahre früher, im Juni 2008, war im spanischen Castellón de la Plana eine vorerst nur 2,1 km kurze Trolleybuslinie eröffnet worden. Sie weist die Besonderheit auf, dass eine optische Spurführung getestet wurde, zudem wird die Innenstadt im Batteriebetrieb durchfahren. Eine Streckenverlängerung auf ca. 8 km ging im Dezember 2014 in Betrieb.²¹ Auch besondere örtliche Bedingungen können die Neueinführung von Trolleybussen begünstigen: So wurde im Jahre 2012 beispielsweise auf einem grossen Universitätsgelände

¹⁸N. N. 2013a, S. 55–59.

¹⁹Ein Beispiel hierfür ist Kulpa und Schwartz 1995.

²⁰Schmidt 2014.

²¹Budach und Lehmann 2015.

in Riad (Saudi-Arabien) eine Trolleybuslinie eröffnet. Hier fällt insbesondere die markante Aussengestaltung der Fahrzeuge auf.²²

In bestehenden Betrieben werden Netzerweiterungen geplant. So ist beispielsweise in Zürich in den nächsten Jahren vorgesehen, die beiden stark belasteten Buslinien 69 und 80 auf elektrischen Betrieb umzustellen, sodass dort zukünftig Doppelgelenktrolleybusse (siehe Abbildung 3.2) verkehren können. Zudem sind dort die 35 neusten Fahrzeuge bereits mit einer Batterie anstatt des bislang üblichen Diesel-Hilfsantriebs ausgerüstet. Das erleichtert einen abschnittsweise fahrleitungslosen Betrieb, welcher (nach ersten Versuchen im Jahre 2014) seit 2015 im fahrplanmässigen Betrieb²³ praktiziert wird.



Abbildung 3.2: HESS-Doppelgelenktrolleybus der Verkehrsbetriebe Zürich (Wehntalerstrasse, 28.08.2014)

Es fällt auf, dass der Trolleybus dort, wo er bereits verkehrt, eine hohe Akzeptanz genießt, so beispielsweise in Salzburg, wo man die aktuellen Tendenzen hin zu Batteriebusen denn auch recht kritisch sieht.²⁴

Der Fortbestand bestehender Systeme wird immer wieder in Frage gestellt, insbesondere dann, wenn grössere Neuinvestitionen anstehen. Die in diesem Zusammenhang beauftragten Studien (so z. B. für Winterthur²⁵ und Schaffhausen²⁶, aber auch Seattle²⁷ in den USA) empfehlen, den Trolleybus trotz höherer

²²Hille 2011.

²³Dies betrifft die Linien 33 und 72 zwischen den Haltestellen Hardplatz und Albisriederplatz. An Letzterem konnten 6 Kreuzungen mit Tram-Oberleitungen sowie mehrere Oberleitungsweichen entfallen.

²⁴Brandl 2014.

²⁵Keller, Nef und Bach 2008.

²⁶Lebküchner und Keller 2008.

²⁷N. N. 2011.

Betriebskosten im Vergleich zum Dieselsebus beizubehalten, um die Umweltvorteile nicht zu verlieren. Alternative Antriebe mit vergleichbaren Eigenschaften wurden als noch nicht ausgereift oder zu teuer angesehen. Im Falle von Basel fiel der Entscheid jedoch zuungunsten des Trolleybusses aus, auch wenn dies in der Studie²⁸ nicht explizit empfohlen wurde. Im Jahre 2002 wurde in Winterthur zwar die Wiedereinführung der Trolleybusse auf der einige Jahre zuvor auf Dieselsebuse umgestellten Linie 4 untersucht,²⁹ aber schliesslich nicht umgesetzt.

3.2.4 Dieselhybridbusse

Antriebskonzepte

Durch den Einsatz von Hybridbussen verspricht man sich geringere CO₂- und Schadstoffemissionen sowie einen reduzierten Kraftstoffverbrauch. Gleichzeitig besteht die Erwartung, dass dieser den Unternehmen den ersten Schritt auf dem Weg zu vollelektrischen Bussen ermöglicht, indem die nötigen Infrastrukturen für den elektrischen Antriebsstrang aufzubauen und schrittweise die Fahrdienst- und Werkstattmitarbeiter zu qualifizieren sind. Hybridbusse wären damit Wegbereiter für zukünftige vollelektrische Busse.³⁰

Für die Ausbildung des Antriebsstrangs gibt es drei Konzepte: serieller, paralleler und leistungsverzweigter Hybrid³¹ (siehe Abbildung 3.3). Allgemein gilt, dass Elektromotor und Energiespeicher die Leistungsspitzen abdecken, sodass der Dieselmotor nicht mehr auf die benötigte Spitzenleistung ausgelegt werden muss. Damit kann der Verbrennungsmotor deutlich kleiner ausgeführt und länger nahe am Punkt des optimalen Wirkungsgrades betrieben werden. Entscheidender für die Energieeinsparung ist aber die Rückgewinnung der beim Bremsen freiwerdenden Energie. Hier besteht die Herausforderung, den Energiespeicher so zu dimensionieren, dass er sowohl die hohen Leistungen toleriert als auch möglichst die gesamte rekuperierte Energie aufnehmen kann. Zudem ist eine hohe Lebensdauer (Zyklusfestigkeit) gefordert.³²

Theoretisches Energiesparpotenzial

Es wurde verschiedentlich versucht, anhand von Näherungsberechnungen aufzuzeigen, welche physikalischen Grenzen bei der Energierückgewinnung durch Rekuperation bestehen und welches Hybridbuskonzept eine höhere Energieeinsparung erwarten lässt. Gemäss einer Analyse sollte im Stadtverkehr, wegen der dort häufigen Bremsvorgänge, der serielle dem parallelen Hybridbus überlegen

²⁸Keller, Lebküchner und Kljun 2006.

²⁹N. N. 2002.

³⁰Stubbe, Sievers und Herkenrath 2010, S. 47.

³¹Nähere Beschreibung z. B. in Müller-Hellmann u. a. 2007, S. 230–250; der leistungsverzweigte Hybrid wird dort als «Mischhybrid» bezeichnet.

³²Kellaway 2007.

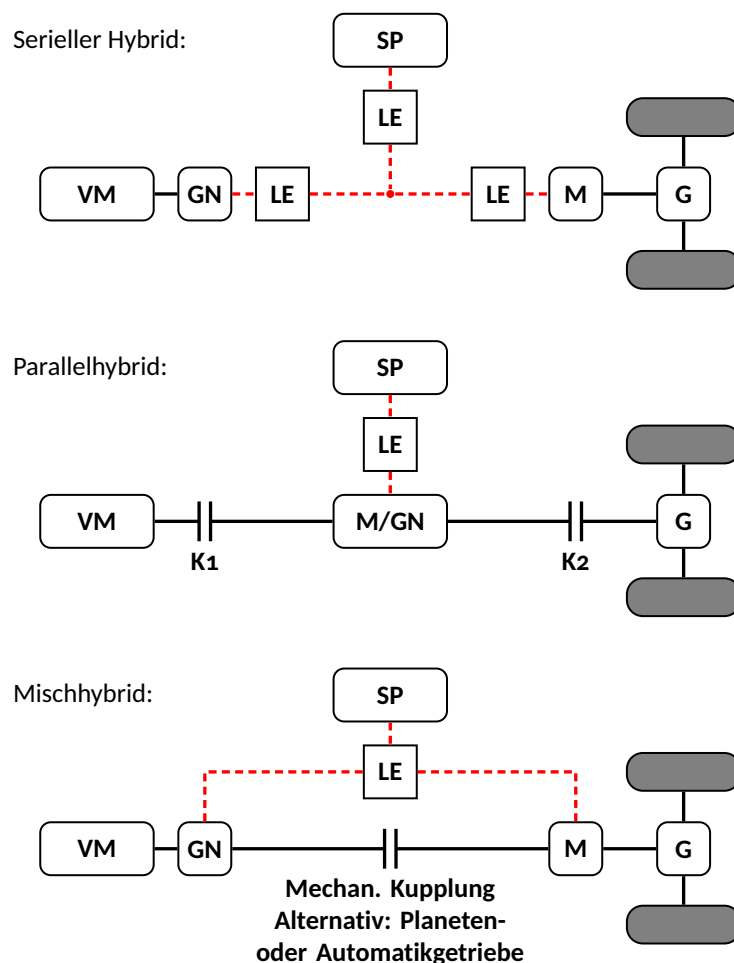


Abbildung 3.3: Die drei Hybridbus-Antriebskonzepte (nach Müller-Hellmann u. a. 2007, S. 234, Abb. 2). Die Abkürzungen bedeuten: VM ... Verbrennungsmotor, GN ... Generator, SP ... Speicher, LE ... Leistungselektronik, M ... Elektromotor, K ... Kupplung, G ... Getriebe

sein, da dessen Wirkungsgradkette für die Rekuperation kürzer sei.³³ In einem weiteren Beitrag³⁴ zeigen die Autoren, welche Faktoren dazu führen, dass die theoretisch möglichen Einsparpotenziale nicht erreicht werden können. Die Beispielrechnung wurde auf Basis des SORT 2-Zyklus durchgeführt und ergab für ein serielles Hybridfahrzeug eine Kraftstoffeinsparung zwischen 15 und 26 %, in der Praxis seien unter günstigen Rahmenbedingungen noch ca. 20 % realisierbar. Für einen Parallelhybrid führte eine Abschätzung zu Werten von 9 % (Gelenkbus) bzw. 16 % (Solobus).³⁵ Im Betriebseinsatz scheint sich die Überlegenheit des seriellen Hybridbusses jedoch nicht überall so klar abzuzeichnen, wie die Beispiele weiter unten in diesem Abschnitt zeigen.

³³Niemann und Balke 2011, S. 10.

³⁴Niemann und Balke 2012.

³⁵Niemann und Balke 2012, S. 54.

In jedem Falle seien alle Zahlen zur Energieeinsparung mit Vorsicht zu behandeln, bei denen die Angaben zu den Randbedingungen fehlen. Belastbare Werte erhalte man beispielsweise durch sogenannte Zwillingstests (gleicher Fahrer, gleicher Tag, gleiche Fahrsituation, gleiche Strecke und Beladung).³⁶

Erfahrungen in Deutschland

Unter anderem in Hannover sammelt man seit Mitte 2008 Erfahrungen mit Hybridbussen. Der Einsatz des ersten Fahrzeugs (Solaris Urbino 18, Parallelhybrid) wurde während eines Jahres wissenschaftlich begleitet. Demnach habe man im Einsatz auf zwei Linien gegenüber einem Dieselbus der gleichen Generation (aber nicht desselben Herstellers) 21,2 resp. 23,1 % Kraftstoff einsparen können. Es wird ergänzend berichtet, dass bei Testeinsätzen des Fahrzeugs im Regionalverkehr eine Ersparnis von nur 5,8 % erzielt worden sei, verursacht durch den markant geringeren Rekuperationsanteil aufgrund der deutlich geringeren Zahl von Zwischenhalten.³⁷

Ein bundesweites Projekt war «Elektromobilität in Modellregionen», innerhalb dessen sich die Plattform «Innovative Antriebe Bus» mit dem Einsatz von Hybridbussen beschäftigte. Es beteiligten sich insgesamt 17 Verkehrsbetriebe, 10 Herstellerfirmen sowie 8 unabhängige Institute und Beratungsunternehmen mit dem vorrangigen Ziel der Gewinnung und Auswertung von Betriebsdaten.³⁸ Das Testfeld bestand aus insgesamt 59 Dieselhybridbussen, verteilt auf sieben Modelle (vier Gelenk- und drei Solobusse) von fünf Herstellern.³⁹ Es kamen alle drei Antriebskonzepte (serieller, paralleler und leistungsverzweigter Hybrid) sowie drei Arten von Energiespeichern (Li-Ionen- und Nickel-Metallhydrid-Akkus sowie Superkondensatoren) zum Einsatz.⁴⁰

Leider werden nur wenige Ergebnisse mitgeteilt. Die durchschnittliche Fahrzeugverfügbarkeit habe, mit im Projektverlauf leicht zunehmender Tendenz, bei 73 % gelegen, Dieselbusse erreichten ca. 91 %.⁴¹ Hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs seien bei 13 Betreibern Einsparungen von 2 bis 21 % im Vergleich zu einem Referenzfahrzeug erzielt worden, bei 4 Betreibern habe man hingegen einen Mehrverbrauch verzeichnet. Die verschiedenen Einsatzprofile erschweren jedoch einen Vergleich.⁴² Im Anschluss an diese Betrachtung werden exemplarisch zwei Ergebnisse aus sogenannten Zwillingsvergleichen etwas näher vorgestellt. In Bremen verbrauchte der Hybridbus zwischen 17 und 23 % weniger als der Diesel-Referenzbus; allerdings stammte das Vergleichsfahrzeug von einem anderen Hersteller und zusätzliche Verbraucher, wie v. a. die in Hybrid-

³⁶Muntz und Störmer 2010.

³⁷Uhlenhut 2010.

³⁸Faltenbacher, Rock und Vetter 2011, S. 20.

³⁹Insgesamt wurden 63 Busse von sechs Herstellern eingesetzt, für vier davon lagen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch keine ausreichenden Daten vor.

⁴⁰Faltenbacher, Rock und Vetter 2011, S. 32.

⁴¹Faltenbacher, Rock und Vetter 2011, S. 57.

⁴²Faltenbacher, Rock und Vetter 2011, S. 59.

Tabelle 3.1: Hybridbuseinsätze in Deutschland im Jahre 2015

Ort	Betreiber	Anzahl ^a	Fahrzeugtyp	AK ^b	ES ^c	Klima ^d	Heizung ^d	IB ^e
Lübeck	SVL	5 G	Hess SwissHybrid BGH-N2C	S	SC/0,9	e/20,3	d/30	07/2011
»	»	5 S	MAN Lion's City A37 Hybrid	S	SC/0,4	e/3	d/35	08/2011
Hamburg	VHH	10 S	Volvo 7900 Hybrid	P	k.A.	k.A.	k.A.	12/2013
»	HHA	5 G	Citaro O 530 G BlueTec-Hybrid	S	LE/26	e/35	d/60	05/2011
»	»	15 G	Volvo 7900 Hybrid	P	LE/9,6	e/38	d/30	10/2014
»	»	5 S	Volvo 7900 Hybrid	P	LE/4,8	e/28	d/30	10/2014
»	»	3 S	Volvo 7900 Electric Hybrid	Pp	LE/19	e/28	d/30	01/2015
»	Jasper	17 S	Volvo 7900 Hybrid	P	LE/4,8	e/11,4	d/30	07/2013
»	Süderelbe Bus	10 S	Volvo 7900 Hybrid	P	LE/4,8	e/11,4	d/30	07/2013
Wismar	BBW	1 S	MAN Lion's City A37 Hybrid	S	SC/0,4	k.A.	k.A.	12/2012
Anklam	AVG	1 S	MAN Lion's City A37 Hybrid	S	SC/0,4	e/32	d/30	11/2012
Wolfsburg	WVG	3 S	MAN Lion's City A37 Hybrid	S	SC/0,4	k.A.	d/35	07/2014
Hannover	üstra	4 G	Solaris Urbino 18 H Allison	L	Ni/11,2	e/7	d/35	10/2013
»	»	2 S	Solaris Urbino 12 H Eaton	P	LI/3,6	e/3,5	d/35	10/2013
Bochum	BOGESTRA	2 G	Solaris Urbino 18 H Voith	P	SC/0,5	m/48	d/35	2011
Hagen	HST	2 G	Hess SwissHybrid BGH-N2C	S	SC/0,9	-	d/30	10/2010
»	»	2 S	MAN Lion's City A37 Hybrid	S	SC/0,4	e/17,5	d/28,8	09/2010
Krefeld	SWK Mobil	4 G	Citaro O 530 G BlueTec-Hybrid	S	LE/26	e/39	d/58	09/2010
Dortmund	TRD Reisen	2 S	Volvo 7700 Hybrid	P	LE/4,8	e/11,4	d/30	06/2009

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 3.1: Hybridbuseinsätze in Deutschland im Jahre 2015 (Fortsetzung)

Ort	Betreiber	Anzahl ^a	Fahrzeugtyp	AK ^b	ES ^c	Klima ^d	Heizung ^d	IB ^e
Mittweida	RBM	10 S	MAN Lion's City A37 Hybrid	S	SC/0,4	e/24	d/35	11/2011
Dresden	DVB	3 S	MAN Lion's City A37 Hybrid	S	SC/0,4	e/24	d/35	10/2011
»	»	2 G	Hess SwissHybrid BGH-N2C	S	SC/0,9	e/5	d/35	06/2011
»	»	3 G	Hess SwissHybrid BGH-N2C	S	SC/0,9	e/20,3	d/30	10/2011
»	»	8 G	Citaro O 530 G BlueTec-Hybrid	S	LE/26	e/35	d/60	05/2011
Leipzig	LVB	10 G	Hess SwissHybrid BGH-N2C	S	SC/0,9	e/5	d/35	07/2011
»	»	3 G	Citaro O 530 G BlueTec-Hybrid	S	LE/26	e/35	d/60	06/2011
»	»	1 G	Solaris Urbino 18 H>Allison	L	Ni/11,2	k.A.	d/k.A.	k.A.
Stuttgart	SSB	5 G	Citaro O 530 G BlueTec-Hybrid	S	LE/26	e/35	d/60	08/2010
»	»	5 G	Citaro O 530 G BlueTec-Hybrid	Sp	LE/26	e/35	d/60	10/2013
Heidenheim	Voith AG	1 S	Hess SwissHybrid BGH-N2C	S	SC/0,6	e/7,3	d/30	07/2013
Ingolstadt	SBI	3 S	MAN Lion's City A37 Hybrid	S	SC/0,4	e/24	d/35	09/2013
München	MVG	1 S	Volvo 7700 Hybrid	P	LE/4,8	e/11,4	d/30	04/2012
»	»	1 S	MAN Lion's City A37 Hybrid	S	SC/0,4	e/7,5	d/35	11/2010
»	»	1 G	Solaris Urbino 18 H>Allison	L	Ni/11,2	m/k.A.	d/35	08/2008
»	»	1 G	Citaro O 530 G BlueTec-Hybrid	S	LE/26	e/39	d/58	03/2011
Summe		156	Fahrzeuge (80 S, 76 G)					

^a S ... Solobus, G ... Gelenkbus

^b Antriebskonzept (S ... seriell, P ... parallel, L ... leistungsverzweigt, p ... Plug-In)

^c Energiespeicher (SC ... Superkondensatoren, LE ... Lithium- Eisenphosphat-Batterie, LI ... Lithium-Ionen-Batterie, Ni ... Nickel-Metallhydrid-Batterie); Speicherkapazität in kWh

^d Klimaanlage (e ... elektrisch, m ... mechanisch) und Zusatzheizung (d ... Dieselöl); Leistung in kW

^e Inbetriebnahme der Fahrzeuge

Quelle: Faltenbacher und Grafetstätter 2016, S. 66–73; die Angaben in der Tabelle weichen teilweise von den Projektbeschreibungen im selben Bericht ab. Aus diesen wurden Angaben zu folgenden Betreibern ergänzt oder korrigiert (in Klammern die Seite der Projektbeschreibung): VHH (S. 14), Jasper/Süderelbe Bus (S. 16) und HHA (S. 20).

bussen im Winter notwendige Zusatzheizung, wurden nicht berücksichtigt. Im Linieneinsatz, mit Berücksichtigung aller Verbraucher, seien hingegen nur etwa 5 % Einsparung erreicht worden.⁴³ Beim Test in Leipzig betrug die Einsparungen ebenfalls nur ca. 5 % gegenüber der übrigen Dieselbusflotte.⁴⁴ Eine wichtige Erkenntnis wird folgendermassen formuliert:

Die Messungen bestätigen die Annahme, dass sich serielle Hybridbusse vor allem [für] verdichtete Strecken mit vielen Start- und Anfahrvorgängen eignen. Auf Linien mit starken Steigungen und hohen Reisegeschwindigkeiten reduziert sich dieser Vorteil zum Teil. Linien mit geringer Reisegeschwindigkeit und moderatem Höhenprofil führen zu deutlich besseren Einsatzbedingungen.⁴⁵

Das zweite Beispiel ist das Fördervorhaben «Hybridbusse für einen umweltfreundlichen ÖPNV». An diesem waren zwölf Verkehrsbetriebe beteiligt, zehn davon in Sachsen als Verband «RegioHybrid Sachsen» sowie Lübeck und Hannover. Es kamen drei Fahrzeugtypen zum Einsatz: 11 HESS-Gelenkbusse, 29 MAN-Solobusse (beide sind serielle Hybride mit Superkondensatoren) und 10 Solaris/Allison-Gelenkbusse mit leistungsverzweigtem Hybridantrieb und NiMH-Batterie, insgesamt also 50 Fahrzeuge.⁴⁶

Betrachtet man die Laufleistungen, so erkennt man, dass die Aussagen mit einer gewissen Vorsicht interpretiert werden müssen. Im Mittel liefen die Hybridbusse nämlich nur knapp 800 km im Monat, was an den teils späten Lieferterminen der Fahrzeuge liege.⁴⁷ Gegenüber der im Versuch der «Busplattform» erzielten Fahrzeugverfügbarkeit konnte nun ein Durchschnittswert von 81 % erreicht werden, der von den Autoren auf einen Lerneffekt zurückgeführt wird.⁴⁸ Vermutlich dürfte auch die weniger inhomogene Flotte (drei Fahrzeugtypen gegenüber zuvor sieben) dazu merklich beigetragen haben. Hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs konnten auf 12 von 15 Linien Energieeinsparungen zwischen 6 und 19 % verzeichnet werden, auf den drei übrigen Linien verbrauchten die Hybridbusse hingegen 3, 10 bzw. 13 % mehr als die Diesel-Referenzbusse. Der Versuch, Korrelationen zwischen dem Verbrauch und der Durchschnittsgeschwindigkeit oder den Höhendifferenzen zu finden, habe kein verwertbares Ergebnis erbracht.⁴⁹

Interessant sind die Aussagen zu fahrzeugbezogenen Kosten. Die zu jener Zeit deutlich höheren Anschaffungskosten von Hybridbussen überkompensieren wegen des nötigen Kapitaldienstes die Einsparungen durch den geringeren Kraftstoffverbrauch. Die spezifischen Kosten je Kilometer lagen beim Hybridbus ca.

⁴³Faltenbacher, Rock und Vetter 2011, S. 61.

⁴⁴Faltenbacher, Rock und Vetter 2011, S. 62 f.

⁴⁵Faltenbacher, Rock und Vetter 2011, S. 63.

⁴⁶Bourbon u. a. 2012, S. 11.

⁴⁷Bourbon u. a. 2012, S. 59 f.

⁴⁸Bourbon u. a. 2012, S. 65 f.

⁴⁹Bourbon u. a. 2012, S. 68–70.

22 bis 26 % höher als beim Dieselbus.⁵⁰ Eine finanzielle Förderung der Fahrzeugbeschaffung sei also nötig, wenn der Hybridbuseinsatz eine grössere Verbreitung finden solle. Bei den heutigen Anschaffungskosten müsse der Dieselpreis bei etwa 4 Euro je Liter liegen, damit sich ein Hybridbus rechne.⁵¹

Mittlerweile ist die Lage unübersichtlicher geworden: Laut der glücklicherweise vorliegenden Projektübersicht⁵² handelt es sich inzwischen um 31 Projekte, an denen insgesamt 34 Betreiber beteiligt sind (nicht alle der zuvor erwähnten Versuche sind hier inbegriffen; manche der aufgelisteten Projekte widmen sich Brennstoffzellen- oder Batteriebusen). Die Tabelle 3.1 versucht, einen Überblick zu geben, für weitere Details sei auf die Projektübersicht⁵³ verwiesen. Die Auflistung beinhaltet allerdings nur einen Teil der zurzeit in Deutschland eingesetzten Hybridbusse. So waren im Jahre 2014 beispielsweise in Hannover insgesamt schon 53 Fahrzeuge im Einsatz.⁵⁴

Erfahrungen in den USA

Im Gegensatz zur den recht umfangreichen Tests von Hybridbussen in Deutschland werden in den USA seit längerem schon keine Tests dieser Antriebsart mehr durchgeführt, da man dort vergleichsweise früh mit Betriebsversuchen begonnen hatte. Diese wurden durch das National Renewable Energy Laboratory (NREL), eine dem Energieministerium (Department of Energy, DOE) unterstellte Einrichtung, begleitet und – öffentlich zugänglich – dokumentiert. Beispielsweise kamen bereits 1998 in New York City erstmals Hybridbusse (mit seriellem Antriebsstrang) zum Einsatz. Als vorrangiges Ziel wurde damit eine Reduktion der Emissionen angestrebt. Die zehn Fahrzeuge wurden in zwei Losen geliefert (1998/99 und 2000), welche sich offensichtlich in technischer Hinsicht unterschieden, da die Verfügbarkeit des zweiten Lieferloses höher war als die des ersten.⁵⁵ Eine dritte Lieferung von zehn Fahrzeugen eines verbesserten Modells erfolgte im Jahre 2002, deren Einsatz ebenfalls evaluiert wurde.⁵⁶ Ein weiteres Beispiel, bei welchem zudem die in den USA vergleichsweise selten eingesetzten Gelenkbusse Gegenstand der Untersuchung waren, ist Seattle. Die Versuchsreihe war recht umfassend: 20 Parallelhybridbusse, aufgeteilt auf zwei gleich grosse Teilflotten mit verschiedenen Betriebsverhältnissen, wurden mit 10 Dieselbussen verglichen.⁵⁷ Das letzte hier anzuführende Beispiel ist ein Vergleichstest, der in Long Beach (Kalifornien) mit 10 seriellen Benzinhybrid- (!) und 10 Diesel-Solobussen durchgeführt wurde.⁵⁸

⁵⁰Bourbon u. a. 2012, S. 111.

⁵¹Bourbon u. a. 2012, S. 117.

⁵²Faltenbacher und Grafetstätter 2016.

⁵³Faltenbacher und Grafetstätter 2016, insbesondere S. 66–73.

⁵⁴Uhlenhut 2014.

⁵⁵Chandler, Walkowicz und Eudy 2002, S. 9–11.

⁵⁶Barnitt und Chandler 2006, S. 7.

⁵⁷Chandler und Walkowicz 2006.

⁵⁸Lammert 2008.

Tabelle 3.2: Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Hybridbus-Evaluationen in den USA

Ort	Test- zeitraum	Anz. Busse	rel. LL ^a	Verbrauch [l/100 km]			Quelle
				DB	HB	Diff.	
NYC (1. Serie, 1. Los)	07/2000 – 09/2001	5	55 %	97,2	89,1	-8,3 %	[1]
NYC (1. Serie, 2. Los)	07/2000 – 09/2001	5	70 %	97,2	88,4	-9,1 %	[1]
NYC (2. Serie)	10/2004 – 09/2005	10	99 %	98,9	73,8	-25,4 %	[2]
Seattle, WA	04/2005 – 03/2006	20	105 %	94,1	74,2	-21,1 %	[3]
Long Beach, CA	07/2005 – 05/2007	10	98 %	67,2	62,2	-7,4 %	[4]

Abkürzungen: DB ... Dieselbus, HB ... Hybridbus

^a Die relative Laufleistung (rel. LL) bezeichnet die Laufleistung der Hybridbusse im Verhältnis zu den Dieselbussen als ein Mass für die Verfügbarkeit.

Quellen: [1] Chandler, Walkowicz und Eudy 2002, S. 12, 14; [2] Barnitt und Chandler 2006, S. 20–25; [3] Chandler und Walkowicz 2006, S. 21–22; [4] Lammert 2008, S. 6–7

Die wichtigsten Ergebnisse aus diesen drei Testreihen sind in der Tabelle 3.2 zusammengefasst. Die Zahlen lassen erkennen, dass die Hybridbusse offenbar schnell ihre Betriebsreife erlangten, denn schon vier Jahre nach der ersten Evaluation unterschied sich die Einsatzintensität der Hybridbusse kaum noch von derjenigen der Dieselbusse, zudem konnte der Energiebedarf deutlich gesenkt werden. Die eher mässige Energieeffizienz der in Long Beach getesteten Fahrzeuge hängt vermutlich damit zusammen, dass als Energiespeicher Superkondensatoren verwendet wurden, die eine deutlich niedrigere Energiedichte als Akkumulatoren haben. Leider fehlt eine Angabe zum Speichervermögen.

Fazit

Dass Theorie und Praxis nicht immer übereinstimmen müssen, zeigt ein Vergleich der Aussagen im Abschnitt «Theoretisches Energiesparpotenzial» mit einem Praxisbeispiel aus München,⁵⁹ wo im Jahre 2012 vier verschiedene Hybridbustypen in den Einsatz kamen (Seriell- und Parallelhybrid, je ein Standard- und Gelenkbus). Im Durchschnitt für 2012 konnten bei den Solobussen mit 28,7 (Parallelhybrid) resp. 26,4 % (serieller Hybrid) beachtliche Kraftstoffersparnisse erreicht werden. Bei Gelenkbussen wurden hingegen nur 6,3 (Parallelhybrid) respektive 2,0 % (serieller Hybrid) erzielt. Als Hauptursache für diese Diskrepanz sieht man vor allem den Energiebedarf für die Zusatzheizung bei den Gelenkbus-

⁵⁹König 2013.

sen. Auch steht die höhere Energieeinsparung der Parallelhybridbusse im Widerspruch zu der Aussage, dass serielle Hybridbusse im Stadtverkehr grundsätzlich besser abschneiden sollten.

Tabelle 3.3: Differenz des Kraftstoffverbrauchs der Dieselhybridbusse im Vergleich zu den Diesel-Referenzbussen

Bustyp	Antriebskonzept	Verbrauchsdifferenz		
		Mittelwert	Minimum	Maximum
Solo	seriell	-17 %	-5 %	-25 %
	parallel	-23 %	-11 %	-28 %
Gelenk	seriell	-4 %	+4 %	-13 %
	parallel	-11 %	-4 %	-20 %

Quelle: Faltenbacher, Vetter u. a. 2016, S. 37 (Die Werte wurden aus der Abbildung 13 abgelesen.)

Die theoretisch ermittelten Werte für die Kraftstoffeinsparung beim Einsatz von Hybridbussen werden somit nicht immer erreicht. Bei der Vielzahl an Einflussfaktoren wie Witterung, Liniencharakteristika, Art und Leistungsvermögen des Energiespeichers und der Güte des Energiemanagements ist dies nicht überraschend. Es ist daher aufschlussreich, die Frage der Kraftstoffeinsparung ein wenig zu vertiefen. Einige (aggregierte) Angaben hierzu liefert ein im Jahre 2016 veröffentlichter Statusbericht.⁶⁰ Im Mittel über alle untersuchten Fahrzeuge stellt sich die Kraftstoffeinsparung wie in der Tabelle 3.3 gezeigt dar. Die seriellen Hybridbusse schneiden schlechter ab als die parallelen, während wiederum Solo-busse höhere Einsparungen als Gelenkbusse verzeichnen. An anderer Stelle⁶¹ erkennt man, dass insbesondere die Verwendung von Supercap-Speichern in Gelenkbussen wohl nicht das Optimum darstellt, da diese nur geringe Energieeinsparungen, oft sogar einen Energiemehrbedarf, zeigen. Parallelhybride mit Batterie erzielten dagegen markant bessere Werte. Hinsichtlich der Verfügbarkeit hätten die Hybridbusse, insbesondere die Parallelhybride, inzwischen zu den Dieselnbussen aufgeschlossen, auch wenn noch Optimierungspotenzial bestehe.⁶²

3.2.5 Brennstoffzellenbusse

Begriff

Brennstoffzellenbusse, genauer: Brennstoffzellen-Hybridbusse, entsprechen in der Konfiguration des Antriebsstrangs grundsätzlich den seriellen Dieselhybridbussen. Anstelle eines Dieselmotors dient ein Brennstoffzellensystem als Hauptenergiewandler, dessen wesentliches Charakteristikum die direkte Umwandlung

⁶⁰Faltenbacher, Vetter u. a. 2016.

⁶¹Faltenbacher, Vetter u. a. 2016, S. 41, Abbildung 14.

⁶²Faltenbacher, Vetter u. a. 2016, S. 24.

von chemischer in elektrische Energie ohne Umweg über Wärme ist.⁶³ Üblicherweise kommen in Fahrzeugen sogenannte Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen zum Einsatz, bei denen eine protonenleitende Polymermembran (Proton Exchange Membrane, daher auch das Kürzel PEM) als Elektrolyt dient. Als Brenngas fungiert Wasserstoff, als Oxidationsmittel wird Sauerstoff aus der Umgebungsluft genutzt, womit Wasserdampf als einziges Reaktionsprodukt entsteht.⁶⁴ Wegen dieser Direktumwandlung ist der Wirkungsgrad von Brennstoffzellen höher als der von Verbrennungsmotoren und liegt zwischen 50 und 68 %.⁶⁵ Der Wertebereich gilt für eine einzelne Zelle; technische Anwendungen erfordern die Zusammenfassung einer Vielzahl von Zellen zu Zellstapeln (Stacks), wodurch Einrichtungen für die Zu- und Abfuhr der Gase sowie eine Kühleinrichtung benötigt werden, was merklich niedrigere Systemwirkungsgrade zur Folge hat.

Hauptvorteil des Brennstoffzellenbusses ist das Fahren ohne lokale Schadstoff- und CO₂-Emissionen, sofern reiner Wasserstoff als Energieträger dient. Ausserdem sind die Lärmemissionen geringer als beim Dieselbus. Diesen Vorteilen stehen jedoch die Nachteile gegenüber, welche von den chemischen Eigenschaften des Wasserstoffs herrühren. Unter Normalbedingungen ist seine (volumetrische) Energiedichte, wie bei allen gasförmigen Stoffen, gering. Sein Siedepunkt liegt bei -252 °C, sodass eine Lagerung in flüssiger Form sowohl energie- (Verflüssigung) als auch materialaufwändig (Isolierung des Tanks) ist. Das gilt gleichermaßen für die Lagerung in Druckbehältern. Um ausreichend Wasserstoff mitführen zu können, muss dieser sehr stark (auf 350, gegebenenfalls sogar 700 bar) komprimiert werden, was nur mit teuren Behältern aus Verbundwerkstoff erreicht werden kann. Diese Kompression ist energieintensiv: Bereits für eine Verdichtung auf 200 bar werden ca. 15 % des spezifischen Energieinhalts von Wasserstoff benötigt.⁶⁶

Das Haupthindernis ist jedoch, dass der Grossteil des Wasserstoffs auf der Erde chemisch gebunden vorliegt. Molekularer Wasserstoff kommt nur in Gasgemischen (z. B. in der Luft) in geringen Anteilen vor, er müsste also mit Hilfe energieaufwändiger physikalischer Verfahren (Luftverflüssigung) gewonnen werden. Daher wird er zurzeit vorrangig mittels der Reformation von Erdgas gewonnen, weshalb auch mit Brennstoffzellenbussen die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern bis auf Weiteres erhalten bleibt. Für die nahe Zukunft wird die Wasserstoffgewinnung mittels Elektrolyse unter Nutzung von Elektroenergie aus Wind- und Solarkraftwerken angestrebt. Damit löst man sich zwar von fossilen Energieträgern, aber der Wirkungsgrad des gesamten Energieflusses wird nicht verbessert. Ein zusätzlicher Nachteil ist schliesslich das Fehlen eines flächendeckenden Wasserstoff-Verteilnetzes.

⁶³Kurzweil 2013, S. 2.

⁶⁴Kurzweil 2013, S. 78.

⁶⁵Kurzweil 2013, S. 79.

⁶⁶Oertel 2008, S. 43.

Erfahrungen in Europa

Brennstoffzellenbusse wurden in Europa in grösserem Massstab erstmals im Rahmen des EU-Forschungsprojekts CUTE (Clean Urban Transport for Europe) getestet. Die wesentlichen Ziele waren, neben der Emissionsminderung, eine Basis für die Zertifizierung und gesetzliche Regulierung der Wasserstofftechnik zu schaffen sowie die Akzeptanz von Wasserstoff als Energieträger zu erhöhen. Zwischen 2003 und 2006 kamen, verteilt auf neun Städte in sieben Ländern, insgesamt 27 Solobusse zum Einsatz.⁶⁷ Die Brennstoffzelleneinheit sowie die Druckbehälter für 44 kg Wasserstoff waren auf dem Dach angeordnet, der Vortrieb wurde durch einen Elektromotor mittels eines Automatikgetriebes auf die Hinterachse bewirkt. Auf einen zusätzlichen Energiespeicher wurde verzichtet, da nur auf bewährte Komponenten zurückgegriffen werden sollte.⁶⁸ Die Auswahl der Städte stellte sicher, dass die Busse unter verschiedenen klimatischen, topographischen und verkehrlichen Bedingungen getestet werden konnten.⁶⁹ Der natürlich stark von den Einsatzbedingungen abhängige Kraftstoffverbrauch lag zwischen etwa 20 und 35 kg/100 km, womit die Reichweite nur 120–200 km betrug.⁷⁰ Allerdings ist anzumerken, dass die Optimierung des Kraftstoffverbrauchs kein Hauptziel des Projekts darstellte.⁷¹ Das Thema Energiebedarf dieser Versuchsfahrzeuge wird in einem anderen Beitrag⁷² vertiefter betrachtet. Es werden u. a. Ergebnisse von Messfahrten mittels Sankey-Diagrammen veranschaulicht sowie der Energiebedarf der Nebenverbraucher ausführlich diskutiert. So wurde während der Fahrt eine mittlere Leistungsaufnahme der aus dem 24-V-Netz gespeisten Verbraucher von 2,5 kW gemessen. Wegen der niedrigen Effizienz des Druckluftsystems hatte die Anwendung der Absenkeinrichtung an jeder Haltestelle einen Anteil von immerhin 2 % am mittleren Kraftstoffbedarf, wohingegen der Anteil der Klimaanlage bis zu 11,5 % betrug.⁷³

Fahrzeugen der zweiten Generation, also Brennstoffzellenbussen mit zusätzlichem elektrischem Speicher, widmete sich das Projekt CHIC (Clean Hydrogen in European Cities), welches von 2010 bis 2016 lief. Gemäss dem Ende 2016 veröffentlichten Schlussbericht wurden bei 8 Betreibern insgesamt 54 Fahrzeuge von 5 verschiedenen Herstellern getestet.⁷⁴ Die wichtigsten Kennwerte der Fahrzeuge sowie die mittleren Kraftstoffverbrauchswerte können der Tabelle 3.4 entnommen werden. Der Fortschritt gegenüber den Fahrzeugen der ersten Generation hinsichtlich der Energieeffizienz ist augenfällig. Die Infrastruktur zur Bereitstellung von Wasserstoff war ebenfalls Bestandteil der Testreihen. Inzwischen betrage die Betankungszeit nach einem vollen Betriebstag im Mittel weniger als 10 Mi-

⁶⁷Schuckert 2006, S. 8.

⁶⁸Schuckert 2006, S. 9.

⁶⁹Schuckert 2006, S. 63.

⁷⁰Schuckert 2006, S. 67.

⁷¹Schuckert 2006, S. 75.

⁷²Saxe, Folkesson und Alvfors 2008.

⁷³Saxe, Folkesson und Alvfors 2008, S. 700 f.

⁷⁴Skiker u. a. 2016, S. 8–11.

nuten.⁷⁵ Nimmt man an, dass in diesen 10 Minuten 30 kg Wasserstoff (1000 kWh) ergänzt werden, entspricht das einer Ladeleistung von 6 MW, also dem 30-fachen des aktuell bei Batteriebussen üblichen Werts.

Zu den Angaben in der Tabelle 3.4 kann ergänzt werden, dass die Kölner Gelenkbusse (APTS Phileas) seit September 2011 im Einsatz sind, während die zwei Solobusse vom Typ Van Hool A330FC im Mai 2014 hinzukamen. Die vier Hamburger Fahrzeuge (Citaro O 530 FuelCell-Hybrid) verkehren seit April 2012; nicht in der Tabelle enthalten, da kein Teil des CHIC-Projekts, sind die vier seit April 2013 in Stuttgart im Einsatz befindlichen Fahrzeuge des gleichen Typs.⁷⁶ Zu den Ergebnissen der dortigen Versuche sind leider keine Publikationen bekannt.

Tabelle 3.4: Im Rahmen des CHIC-Projektes eingesetzte Brennstoffzellen-Hybridbusse

Ort (Land)	Anz.	Fahrzeug		Leistung ^a		Speicher		Verbrauch ^c
		Länge	Hersteller	EM	BZ	kg H ₂	elektrisch ^b	
Bozen (I)	5	12 m	EvoBus	240	120	35	LI/26,9	8,6 (28,9)
Brugg (CH)	5	12 m	EvoBus	240	120	35	LI/26,9	7,9 (26,6)
Hamburg (D)	4	12 m	EvoBus	240	120	35	LI/26,9	8,0 (26,9)
Köln (D)	2	13,2 m	Van Hool	170	150	40	LI/24	12,5 (42,0)
»	2	18,5 m	APTS	240	150	40	NM/26 + SC/2	16,5 (55,5)
London (UK)	8	11,9 m	Wrightbus	134	75	31	SC/20	9,7 (32,6)
Mailand (I)	3	12 m	EvoBus	240	120	35	LI/26,9	10,3 (34,6)
Oslo (N)	2	13,2 m	Van Hool	170	150	35	LI/17,4	13,2 (44,4)
Whistler (CDN)	20	12,5 m	New Flyer	170	150	56	LI/47	15,7 (52,8)

^a Leistung in kW; Abkürzungen: EM ... Elektromotor, BZ ... Brennstoffzelle

^b Abkürzungen: SC ... Superkondensatoren, LI ... Lithium-Ionen-Batterie, Ni ... Nickel-Metallhydrid-Batterie; Zahlenwert: Speicherkapazität in kWh

^c Angaben in kg H₂/100 km (in Klammern: Liter Dieseläquivalent je 100 km)

Quelle: Skiker u. a. 2016; eigene Umrechnung

In Berlin verkehrten zudem zwischen Juni 2006 und Dezember 2014 vier Solobusse des Herstellers MAN, die mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren ausgerüstet waren. Der Kraftstoffverbrauch lag bei 22,8 kg H₂/100 km, umgerechnet 76,7 Liter Dieseläquivalent je 100 km.⁷⁷ Bei Nutzung dieses Antriebskonzepts würde die Emissionsreduktion also mit einem Energieverbrauch erkauft, der etwa dem dreifachen der Brennstoffzellen-Hybridbusse entspricht. Solche Fahrzeuge standen zu Beginn dieses Versuches gewiss noch nicht zur Verfügung, dies hat sich inzwischen aber geändert. Somit dürfte aus heutiger Sicht der Wasserstoff-Verbrennungsmotor keine Zukunft haben.

⁷⁵Skiker u. a. 2016, S. 13.

⁷⁶Faltenbacher und Grafetstätter 2016, S. 66–73.

⁷⁷Skiker u. a. 2016, S. 24 f.

Erfahrungen in den USA und Kanada

Zum Vergleich lohnt sich abermals der Blick nach Übersee. Wie schon bei den Betriebsversuchen mit Hybridbussen wurden und werden auch die Versuchseinsätze von Brennstoffzellenbussen durch das NREL begleitet und öffentlich zugänglich dokumentiert. Die Ergebnisse werden, separat für jeden Betreiber, in jährlichen Einzelberichten detailliert zusammengestellt, darüber hinaus wird jedes Jahr ein zusammenfassender Bericht publiziert.

Tabelle 3.5: Überblick über die in den Jahren 2013 und 2014 in Nordamerika getesteten Brennstoffzellen-Hybridbusse

Betreiber	Zeitraum	Anzahl	Verfügbarkeit	Verbrauch		Differenz
				RF	BZ	
Im Jahre 2013 durchgeführte Vergleichstests [1]:						
AC Transit	03/2013 - 07/2013	12	81 %	61,1	32,1	-47,5 %
CTTRANSIT	08/2012 - 01/2013	4	51 %	60,5	33,1	-45,3 %
SunLine AT	08/2012 - 07/2013	1	31 %	75,4	40,4	-46,4 %
SunLine AFCB	08/2012 - 07/2013	1	75 %	75,4	32,7	-56,6 %
Im Jahre 2014 durchgeführte Vergleichstests [2]:						
AC Transit	08/2013 - 06/2014	12	72 %	59,5	32,4	-45,5 %
BC Transit	04/2013 - 03/2014	20	71 %	55,0	54,5	-1,0 %
SunLine AT	08/2013 - 07/2014	1	45 %	73,1	36,8	-49,7 %
SunLine AFCB	08/2013 - 07/2014	1	61 %	73,1	33,7	-53,9 %

Alle Verbrauchswerte sind in Litern Dieseläquivalent je 100 km angegeben und wurden aus den ursprünglich in Meilen je Gallone gegebenen Werten umgerechnet. Als Referenzfahrzeuge (RF) dienten Diesel-, bei SunLine Erdgasbusse.

Quellen: [1] Eudy und Gikakis 2013, S. 14-16; [2] Eudy und Post 2014, S. 12-15

Im Folgenden sollen beispielhaft die Ergebnisse aus den Jahren 2013 und 2014 kurz erörtert werden, diese sind in der Tabelle 3.5 zusammengefasst. Bei den Versuchsfahrzeugen handelte es sich sämtlich um Solobusse, als Energiespeicher wurden Lithium-Ionen-Akkus verwendet. Je nach Bustyp konnten zwischen 40 und 53 kg Wasserstoff (Behälterüberdruck 345 bar) mitgeführt werden. Die Effizienzsteigerung war beachtlich, denn die Brennstoffzellenbusse verbrauchten nur etwa halb so viel Energie wie die konventionellen Vergleichsfahrzeuge. Der «Ausreisser» von BC Transit⁷⁸ wurde mit dem strengen Betriebseinsatz, dem saisonal hohen Fahrgastaufkommen, den anspruchsvollen Steigungen und der grosszügig dimensionierten Heizung begründet.⁷⁹ Eine weitergehende Interpretation der Ergebnisse ist jedoch schwierig, da die Berichte, abgesehen von der mittleren Geschwindigkeit, keine Aussagen zu Linienprofilen oder zum Energiebedarf der Hilfsbetriebe, insbesondere Heizung und Klimatisierung, enthalten.

⁷⁸Die Fahrzeuge wurden im Wintersportort Whistler in British Columbia (Kanada) eingesetzt.

⁷⁹Eudy und Post 2014, S. 14.

Fazit

Aus den bisher veröffentlichten Versuchsergebnissen lässt sich erkennen, dass mit dem Einsatz von Brennstoffzellenbussen eine deutliche Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen erreicht werden kann. Die teils geringen Verfügbarkeiten weisen aber darauf hin, dass Verbesserungen hinsichtlich der Betriebstauglichkeit unumgänglich sind. Angesichts von (im Jahre 2014) weltweit 32 aktiven Projekten⁸⁰ kann man erwarten, dass in den folgenden Jahren hier einige Fortschritte erzielt werden. Eindrücklich ist der Einfluss der Hybridisierung auf den Wasserstoffverbrauch, gezeigt am Beispiel London: Während die (nicht mit einer Batterie ausgerüsteten) Busse aus dem CUTE-Projekt im Mittel 22 kg/100 km benötigten, kamen die hybridisierten Fahrzeuge der zweiten Generation mit 9 kg/100 km aus.⁸¹ Vergleichbare Verbrauchswerte konnten auch in anderen Städten gemessen werden, Brennstoffzellenbusse haben somit einen um ca. 26 % geringeren Kraftstoffverbrauch und – eine Wasserstoffproduktion auf Basis erneuerbarer Energien vorausgesetzt – um 85 % reduzierte CO₂-Emissionen gegenüber Dieselbussen gleicher Grösse.⁸²

Interessant ist ein Vergleich der Verbrauchswerte aus den Tabellen 3.4 und 3.5. Es fällt auf, dass zwar der Kraftstoffverbrauch der in Nordamerika eingesetzten Brennstoffzellenbusse ungefähr dem der in Europa getesteten Fahrzeuge entspricht, die Diesel-Referenzbusse jedoch deutlich mehr verbrauchten als in Europa üblich. Über die Ursachen hierfür konnten in den Quellen keine Belege gefunden werden.

3.2.6 Batteriebusse

Ladekonzepte

Unter Batteriebussen werden hier solche Fahrzeuge verstanden, welche ihre Traktions- und Hilfsbetriebeenergie grösstenteils⁸³ oder ausschliesslich einem mitgeführten Akkumulator entnehmen. Sie sind daher, ebenso wie der Trolleybus, vollelektrische Fahrzeuge und teilen dessen Vorzüge, keine (lokalen) Schadstoff- und Treibhausgasemissionen sowie niedrige Lärmemissionen zu verursachen. Sie sind ähnlich flexibel einsetzbar wie Dieselbusse, weisen allerdings eine deutlich geringere Reichweite auf.

Mit der Lithium-Ionen-Technologie stehen nun erstmals Batterien zur Verfügung, deren Energiedichte hoch genug ist, dass sie für eine Anwendung im Stadtverkehr interessant wird. Zwar wird die Speicherung der Energiemenge einer Tagesleistung (sogenannte Nachtlader) auch mit solchen Batterien mittelfristig nicht sinnvoll möglich sein, da die Batterien zu schwer würden. Mit dem An-

⁸⁰Hua u. a. 2014, S. 977.

⁸¹Hua u. a. 2014, S. 982.

⁸²Skiker u. a. 2016, S. 8.

⁸³Im Falle, dass eine Dieselmotorschaltung vorhanden ist.

satz der Zwischenaufladung (auch als Gelegenheitsladung bezeichnet) steht aber ein Konzept zur Verfügung, mit dem dieser Nachteil, unter Inkaufnahme einer gewissen Einschränkung der Flexibilität, ausgeglichen werden kann.



Abbildung 3.4: Beispiel einer Ladestation für konduktive Zwischenaufladung (Genf Flughafen, 14.03.2014)

Dazu existieren zwei verschiedene Verfahren: konduktiv (kontaktbehaftet) sowie induktiv (elektromagnetisch). Das konduktive Verfahren erfordert einen selbsttätig beweglichen Stromabnehmer auf dem Fahrzeug und dessen (stationäres) Gegenstück,⁸⁴ das, beispielsweise in Wien, eine kurze, zweipolige Oberleitung⁸⁵ oder, wie in Genf, eine in die Wartehalle integrierte Kontaktschiene (siehe Abbildung 3.4) sein kann.⁸⁶ Beim induktiven Verfahren könnte prinzipbedingt auf bewegliche Teile verzichtet werden, zur Erhöhung des Wirkungsgrads wird die unter dem Fahrzeugboden befindliche Empfangsspule aber vertikal beweglich ausgeführt und beim Halt an der Ladestation um einige Zentimeter abgesenkt. Beispiele für die Anwendung des induktiven Verfahrens sind die Versuchsbetriebe in Braunschweig⁸⁷ und Berlin.⁸⁸

Da die Zwischenaufladungen die Reisezeit nicht verlängern sollen, müssen diese während der planmässigen

Wendzeiten an den Endhaltstellen und, falls dies nicht ausreicht, zusätzlich während der planmässigen Halte an ausgewählten Zwischenhaltstellen erfolgen. Solche Halte dauern jedoch selten länger als 30 Sekunden. Zur Minimierung des Investitionsaufwands sollen zudem möglichst wenige Ladestationen installiert werden. Die einzige Möglichkeit, diese einander widersprechenden Forderungen zu erfüllen, ist die Anwendung grosser Ladeleistungen im Bereich von 200 bis 600 kW. Das speisende Netz ist oft nicht auf eine solche Leistungsaufnahme ausgelegt, wodurch an den Ladestationen eine Zwischenspeicherung der Ladeenergie (meist in Superkondensatoren) erforderlich wird.

⁸⁴Inzwischen kommt auch die entgegengesetzte Anordnung, bei welcher der bewegliche Stromabnehmer Bestandteil der Ladestation ist, zum Einsatz.

⁸⁵Behmann 2013.

⁸⁶Behmann 2014.

⁸⁷Marquardt 2013.

⁸⁸Hondius 2016.

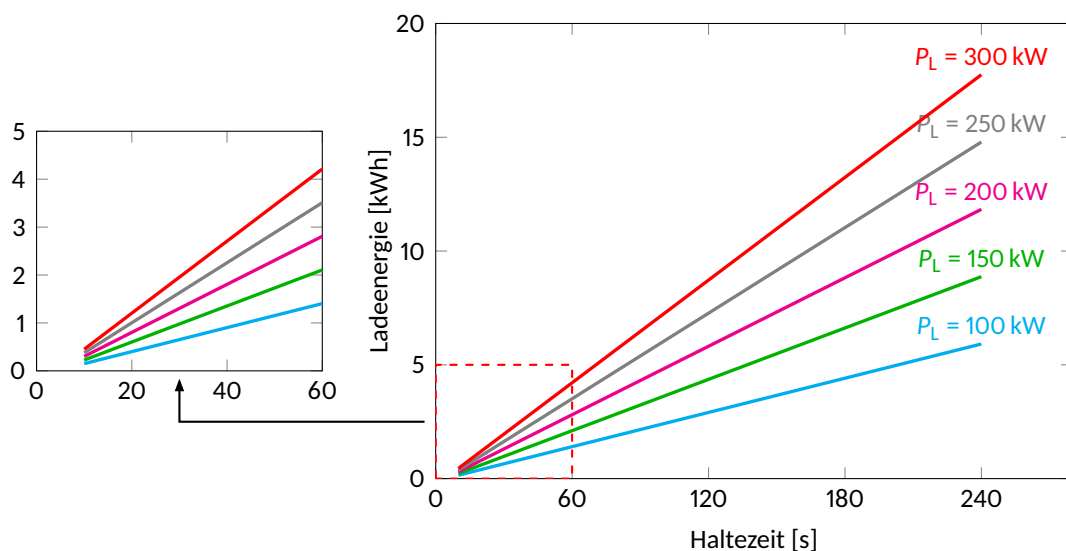


Abbildung 3.5: Ladeenergie in Abhängigkeit von Haltezeit und Ladeleistung. Annahmen: Ladezeit = Haltezeit abzüglich je 2 s für Kontaktauf- und -abbau, Ladeleistung ab Ausgang Ladestation, Batteriewirkungsgrad 95 % (Quelle: Eigene Berechnung)

Die Abbildung 3.5 zeigt, welche Ladeenergie in Abhängigkeit von der Haltezeit und der Ladeleistung übertragen werden kann.

Betriebsversuche

Bis zum Jahr 2014 wurden nur wenige Versuche mit Batteriebussen durchgeführt, so zum Beispiel im Jahre 2011 in Offenbach. Dort kam ein umgebauter Flughafenvorfelddbus der Firma Contrac mit einem 150 kWh-Batterie zum Einsatz. Der Testbetrieb auf der Linie 103 lief jedoch nur von Ende Oktober bis Ende November, vor allem, weil die Fahrgastraumheizung unzureichend war. Zwischenauf Ladungen waren nicht vorgesehen.⁸⁹ Beim bereits erwähnten Versuchsbetrieb in Wien werden die kurzen innerstädtischen Linien 2A und 3A mit 7,7 m langen Batteriebusen betrieben. Die Aufladung erfolgt an den Endhaltestellen mittels eines speziellen Stromabnehmers, der an eine kurze, zweipolige Oberleitung angelegt wird. Die elektrische Energie wird jeweils dem Fahrleitungsnetz der Strassenbahn entnommen (siehe Abbildung 3.6). Ergänzend wird die nächtliche Betriebsruhe für die Aufladung im Betriebshof genutzt.⁹⁰ Beim TOSA-Versuchsbetrieb in Genf,⁹¹ der von Mai 2013 bis März 2014 lief, pendelte ein Gelenkbus zwischen dem Flughafen und dem Messegelände auf einer 1,8 km kurzen Strecke. Durch das Nachladen an den Endhaltestellen genügte eine Bat-

⁸⁹Lampmann und Wüst-Rocktäschel 2012.

⁹⁰Behmann 2013.

⁹¹«Trolleybus Optimisation Systeme Alimentation», ein Akronym aus den Anfangsbuchstaben der beteiligten Firmen Transports publics genevois (tpg), Office de Promotion des Industries et des Technologies, Services Industriels de Genève (SIG) und ABB.

terie mit 38 kWh Kapazität, je Kilometer wurde ein Energiebedarf von 1,5 bis 3,5 kWh ermittelt.⁹²



Abbildung 3.6: Batteriebus der Wiener Linien (Schwarzenbergplatz, 12.09.2015)

Ab dem Jahr 2014 begann sich die Entwicklung zu beschleunigen; zu jener Zeit liefen in Deutschland immerhin schon in mindestens vier Städten⁹³ Versuche mit Batteriebussen: Osnabrück (2 Fahrzeuge), Grevesmühlen⁹⁴ und Kassel (je 1 Fahrzeug), der Versuchsbetrieb in Braunschweig (anfangs 1 Fahrzeug) befand sich im Aufbau. Ende des folgenden Jahres wurden bereits die Einsätze von 18 Fahrzeugen in 8 Städten begleitet.⁹⁵ Nicht alle Versuche sind jedoch im zitierten Bericht erfasst, ausserdem kamen im Jahre 2016 weitere Versuchsbetriebe hinzu. Die dem Autor bekannten sind in der Tabelle 3.6 mit ihren wichtigsten Kennwerten zusammengestellt. Aufgrund des bislang recht kurzen Untersuchungszeitraums sind die wenigen Zwischenresultate, auch wegen der geringen Anzahl an Messwerten, mit einer gewissen Vorsicht zu interpretieren. Beispielsweise liegen die mittleren täglichen Laufleistungen mit 103 km (Midi-) und 149 km (Solo- und Gelenkbusse) in recht bescheidenen Grössenordnungen, ebenso die monatlichen Betriebstage (18 bzw. 17).⁹⁶ Die Verfügbarkeit konnte verbessert werden, so lag sie für die Midibusse 2014 bei 67 %, während 2015 schon 86 % erreicht wurden.⁹⁷ Der Energiebedarf der Hilfsbetriebe kann im Winter, insbesondere wegen der Heizung, dem Traktionsenergiebedarf nahekommen.⁹⁸

⁹²Vogel 2014.

⁹³Faltenbacher und Vetter 2015, S. 11.

⁹⁴Im zitierten Bericht ist irrtümlich Wismar angegeben.

⁹⁵Faltenbacher und Grafetstätter 2016, S. 74–77.

⁹⁶Faltenbacher, Vetter u. a. 2016, S. 22.

⁹⁷Faltenbacher, Vetter u. a. 2016, S. 27.

⁹⁸Faltenbacher, Vetter u. a. 2016, S. 48.

Tabelle 3.6: Betriebsversuche mit Batteriebussen in Deutschland im Jahre 2016

Ort	Betreiber	Anz. ^a	Fahrzeugtyp	Batterie ^b	Ladung ^c	Klima ^d	Heizung ^d	IB ^e	Quelle
Bad Langensalza	k. A.	1 M	Bozankaya Sileo S10	LE/230	kD/k. A.	e/k. A.	ja	06/2016	[2]
Berlin	BVG	4 S	Solaris Urbino 12 E	LI/90	iE/200	e/24	d/20	So. 2015	[1]
Bonn	SWB	6 S	Bozankaya Sileo S12	LE/230	kD/k. A.	e/k. A.	ja	02/2016	[2]
Braunschweig	BSVAG	1 S	Solaris Urbino 12 E	LI/60	iEH/200	e/18	d/30	12/2013	[1]
»	»	4 G	Solaris Urbino 18 E	LI/90	iEH/200	e/36	d/80	03/2014	[1]
Bremen	BSAG	1 S	Bozankaya Sileo S12	LE/230	kD/k. A.	e/k. A.	ja	08/2016	[2]
Dresden	DVB	1 S	Solaris Urbino 12 E	LE/200	kE/200	nein	e/25	06/2015	[1]
Grevesmühlen	GBB	1 M	SOR EBN 8	LE/172	kD/k. A.	e/32	d/24	08/2012	[1]
Kassel	KVG	1 M	SOR EBN 10,5	LI/170	kD/k. A.	nein	d/25	06/2013	[1]
Köln	KVB	8 G	VDL Citea SLF-180 Electric	k. A./123	kED/k. A.	e/k. A.	ja	10/2015	[2]
Leipzig	LVB	2 S	Göppel Go4City	LI/86	kED/k. A.	nein	d/k. A.	01/2015	[1]
Mannheim	RNV	2 S	Hess	LI/60	iHD/200	k. A.	k. A.	04/2014	[1]
Münster	SWM	4 S	VDL Citea SLF-120 Electric	k. A./62,5	kED/k. A.	e/k. A.	ja	09/2015	[2]
Oberhausen	STOAG	2 S	Solaris Urbino 12 E	LE/200	kHD/k. A.	e/k. A.	ja	10/2015	[2]
Osnabrück	SWO	1 K	BredamenariniBus Zeus M200 E	LP/57	kD/8	e/17	d/9,1	08/2011	[1]
»	»	1 M	PVI Oréos 4X	LE/170	kD/25	e/32	d/30	08/2013	[1]
Stuttgart	Flughafen	6 S	eCobus 3000	LT/85	kD/k. A.	e/k. A.	e/k. A.	10/2015	[2]

^a Anzahl und Grösse der Fahrzeuge (K ... Kleinbus, M ... Midibus, S ... Solobus, G ... Gelenkbus)

^b Batterietyp (LE ... Lithium-Eisenphosphat, LI ... Lithium-Ionen, LT ... Lithium-Titanat); Speicherkapazität in kWh

^c Ladekonzept (k ... konduktiv, i ... induktiv, E ... Endstelle, H ... Haltestelle, D ... Depot); max. Ladeleistung in kW

^d Klimaanlage (e ... elektrisch) und Heizung (e ... elektrisch, d ... Dieseleinsatzheizung); Leistung in kW

^e Inbetriebnahme der Fahrzeuge (So. ... Sommer)

Quellen: [1] Faltenbacher und Grafetstätter 2016, S. 74-77; [2] ZeEUS eBus Report 2016, S. 22-32, 82, 85, 102 f., 111

Bislang wurden vor allem kleinere Fahrzeuge getestet, Batterie-Gelenkbusse kamen in Deutschland erstmals in Braunschweig zum Einsatz (siehe Tabelle 3.6). Zum Fahrplanwechsel 2016 wurde – nach umfangreichen Vorbereitungen⁹⁹ – die innerstädtische Linie 133 der Kölner Verkehrsbetriebe (KVB) auf den Betrieb mit Batteriebussen umgestellt. Hierfür wurden acht Fahrzeuge des Typs Citea SLFA-180 Electric des niederländischen Herstellers VDL Bus & Coach beschafft. Sie besitzen eine Batterie mit 122 kWh, welche an den beiden Endhaltestellen an den insgesamt drei Ladepunkten mit bis zu 250 kW nachgeladen wird. In der nächtlichen Betriebspause erfolgt die Aufladung im Betriebshof an acht Ladestationen mit bis zu 50 kW. Nicht unproblematisch sind die hohen Beschaffungskosten der Fahrzeuge (695'000 Euro gegenüber 300'000 Euro für einen Diesel-Gelenkbus).¹⁰⁰

Fazit

In den vergangenen drei Jahren haben zahlreiche Versuche mit Batteriebussen begonnen. Aktuell kann die Technik nicht als betriebsreif angesehen werden, sodass die Versuchsergebnisse der kommenden Jahre zeigen müssen, ob Batteriebusse eine Zukunft beschieden sein wird. Hierbei spielt auch die Frage des Heizenergiebezugs eine wichtige Rolle. Deren Entnahme aus der Traktionsbatterie reduziert die Reichweite, was man mit dem Einbau einer Ölheizung umgeht. Allerdings widerspricht dies dem Ziel der Emissionsreduktion, wenn ein vollelektrischer Bus auch direkte Schadstoff- und Treibhausgasemissionen verursacht. Sollen Batteriebusse eine Zukunft haben, so ist entscheidend, dass die folgenden Herausforderungen bewältigt werden: Die Kosten für die Fahrzeuge müssen sinken, die Lebensdauer der Batterien muss ausreichend gross sein und die Schnittstelle zur Ladeinfrastruktur bedarf einer Standardisierung.

Neben den genannten Herausforderungen spielt auch die Energiedichte der Batterien eine bedeutende Rolle. Die heute überwiegend verwendeten Lithium-Ionen-Batterien, die 1991 kommerziell eingeführt wurden, verzeichneten seitdem eine Verdoppelung der Energiedichte. Als Kathodenmaterialien kommen Metallverbindungen, wie z. B. Lithiumeisenphosphat (LiFePO_4), Lithiumkobaltoxid (LiCoO_2) oder Lithiummanganoxid (LiMn_2O_4) zum Einsatz.¹⁰¹ Zum Thema Energiedichte heisst es weiter:

Die theoretischen spezifischen Energiedichten für diese Zelltypen liegen meist zwischen 350 und 400 Wh/kg. Die Berücksichtigung der weiteren Bestandteile der Zelle wie Elektrolyt, Separator, Stromableiter, Additive, Gehäuse führen typischerweise zu einer Verringerung der Energiedichte um mehr als die Hälfte. Weitere Verluste ergeben sich durch den Übergang von der Einzelzelle zur eigentlichen

⁹⁹Anemüller 2016a.

¹⁰⁰Anemüller 2016b.

¹⁰¹Janek und Adelhelm 2013, S. 199.

Batterie, womit dann heute in Elektrofahrzeugen Werte von 80 bis 120 Wh/kg erreicht werden. Mit Blick auf die derzeit in kommerziellen Zellen erreichten Werte kann daher davon ausgegangen werden, dass eine weitere, signifikante Verbesserung der Energiedichte mit den konventionellen Technologien nicht mehr zu erreichen ist.¹⁰²

Als Alternativen werden insbesondere die sogenannten Lithium/Schwefel- und Lithium/Luft-Zellen untersucht. Erstere liesse in etwa eine Verdoppelung der heutigen Energiedichten erwarten, Letztere hätte gar das Potenzial für eine Verzehnfachung.¹⁰³ Die Entwicklung von Lithium/Schwefel-Zellen ist zwar recht weit fortgeschritten, der Nachteil der zu geringen Zyklenfestigkeit konnte bislang aber nicht überwunden werden.¹⁰⁴ Bei den Lithium/Luft-Zellen befindet man sich hingegen weiterhin im Stadium der Grundlagenforschung.¹⁰⁵ Somit besteht auf absehbare Zeit keine Aussicht, dass Nachtlader auf höher belasteten Linien eingesetzt werden können.

3.3 Energiebedarf

Unter Energiebedarf wird oft nur die Energie verstanden, die für den Betrieb des Fahrzeugs erforderlich ist (Antriebsenergiebedarf, meist ab Tank «tank-to-wheel» gerechnet), welche den Energiebedarf für Heizung, Lüftung und Klimatisierung einschliesst, ohne diesen jedoch explizit auszuweisen. Nicht vernachlässigbar, aber schwierig zu beziffern ist der Anteil der sogenannten grauen oder indirekten Energie, also der Energie, welche für die Errichtung, den Betrieb und den Rückbau der Infrastruktur sowie die Herstellung und Entsorgung der Fahrzeuge benötigt wird. Diese hat im Lebenszyklus des infrastrukturlastigen Eisenbahnsystems einen Anteil von etwa zwei Dritteln, im Strassenverkehrssystem immerhin von fast der Hälfte.¹⁰⁶ Dieser Anteil ist demnach so gross, dass er in umfassenden Energiebedarfsermittlungen nicht vernachlässigt werden sollte.

Auch wenn der Anteil der grauen Energie gross ist, kann er – wegen der Langlebigkeit der Infrastruktur und teils auch der Fahrzeuge – kurzfristig kaum beeinflusst werden. Im Strassenverkehr kommt hinzu, dass eine Aufteilung dieses Energiebedarfs auf die unterschiedlichen Nutzer der Infrastruktur sehr schwierig ist. Deshalb steht meist die Betriebsenergie im Mittelpunkt der Überlegungen zur Reduktion des Energiebedarfs. Während die Reduktion des Kraftstoffbedarfs durchaus erwünscht ist, wurde dem Anteil der Nebenverbraucher kaum Aufmerksamkeit gewidmet. Eine frühe Untersuchung¹⁰⁷ zeigt auf der Grund-

¹⁰²Janek und Adelhelm 2013, S. 199 f.

¹⁰³Janek und Adelhelm 2013, S. 199 f., Abb. 16 b.

¹⁰⁴Janek und Adelhelm 2013, S. 209.

¹⁰⁵Janek und Adelhelm 2013, S. 212.

¹⁰⁶Jonsson 2005, S. 10.

¹⁰⁷Niemann und Bezler 2000.

lage von Messfahrten in Stuttgart, dass im Betriebseinsatz¹⁰⁸ ein Drittel (34 %) des Kraftstoffverbrauchs auf die Hilfsbetriebe entfiel. Weitere 9 % wurden im Leerlauf verbraucht, fast die Hälfte (49 %) wurde benötigt, um allein das Leergewicht des Fahrzeugs zu bewegen. Somit entfielen ganze 8 % auf den eigentlichen Zweck, die Beförderung der Fahrgäste. Solche Werte sind zwar stark vom Höhenprofil, vom Fahrgastaufkommen und den Verkehrsverhältnissen abhängig, zumindest aber die Größenordnungen sind in jedem Falle bemerkenswert.

Im Rahmen der Betriebsversuche mit den ersten Brennstoffzellenbussen wurde der Bedarf an weitergehenden Untersuchungen in diesem Feld deutlich. Eine Analyse der einzelnen Komponenten der Nebenverbraucher¹⁰⁹ führte zur Erkenntnis, dass insbesondere beim Energiebedarf der Klimaanlage sowie des Druckluftsystems noch wesentliche Verbesserungspotenziale bestehen.¹¹⁰ Diese Thematik wird besonders bei Batteriebusen akut, da die Nebenverbraucher – insbesondere im Falle einer elektrischen Heizung – die möglichen Reichweiten stark verkürzen können. Mit einer gas- oder ölbetriebenen Zusatzheizung liesse sich die Energieentnahme aus der Traktionsbatterie reduzieren oder ganz vermeiden.¹¹¹ Dadurch schmälert man allerdings den Umweltvorteil des rein elektrischen Antriebs.

Um nicht allein auf die Ergebnisse aus Prüfstandsmessungen der Hersteller angewiesen zu sein, wurden mit Begleitung des Internationalen Verbandes für öffentliches Verkehrswesen (UITP) unter dem Projekttitel SORT (Standardized On-Road Test cycles)¹¹² drei standardisierte Fahrzyklen entwickelt, die den Vergleich des Kraftstoffverbrauchs von verschiedenen Dieselnissen unter standardisierten, aber dennoch möglichst realitätsnahen Bedingungen erlauben. Sie werden inzwischen auch, obwohl sie dafür ursprünglich nicht vorgesehen waren, als Ausgangsbasis für Simulationsrechnungen zur Abschätzung des Energiebedarfs angewendet. Wie schon im Abschnitt 2.2 kurz erörtert, wird diese Vorgehensweise hier als nicht ausreichend genau und zu wenig flexibel angesehen.

3.4 Zusammenfassung

Derzeit verhindern vor allem die hohen Kosten, teils auch die ungenügende Einsatzreife, dass sich die alternativen Antriebstechniken am Markt durchsetzen. Zudem hängt es oft von politischen Rahmenbedingungen ab, welcher Antriebstechnologie eine Förderung zuteil wird. Dass eine schnelle Verbreitung alternativer Antriebssysteme ohne Beiträge der öffentlichen Hand kaum möglich ist, wird exemplarisch beim Dieselhybridbus deutlich. Bei den derzeitigen Dieselpreisen können die Mehrkosten nicht durch die Kraftstoffeinsparung kompensiert wer-

¹⁰⁸Gemessen wurde an Gelenkdieselnissen des Typs Mercedes-Benz O 405 G auf der Linie 42.

¹⁰⁹Andersson 2004.

¹¹⁰Andersson 2004, S. 97 f.

¹¹¹So vorgeschlagen in Basile 2013.

¹¹²UITP 2009.

den. Es müssen sowohl die Anschaffungskosten sinken als auch der Dieselpreis steigen, damit es sich für die Verkehrsunternehmen auch wirtschaftlich lohnt.¹¹³ Dies gilt in viel stärkerem Masse für die Systeme, die aufwändige Infrastrukturen erfordern. So benötigt man für Brennstoffzellenbusse eine komplexe Betankungsanlage und vor allem eine günstige Bezugsmöglichkeit für Wasserstoff. Batteriebusse benötigen Ladestationen, während für Trolleybusse die Fahrleitungsanlage und ggf. zusätzliche Unterwerke zu errichten sind.

Solche Energieversorgungsinfrastrukturen, ob neu zu errichten oder bereits bestehend, könnten den ÖV-Betreibern immerhin ein neues Geschäftsfeld erschliessen. Am Beispiel der Energieversorgung von Strassenbahnsystemen wird erläutert, dass die Anlagen wegen der stark schwankenden Last mit grossen Reserven und für hohe Leistungen dimensioniert seien. Daran angeschlossene Ladestationen könnten somit Gleichstrom hoher Leistung liefern, welcher für eine schnelle Aufladung von Akkumulatoren nötig ist. Mit dem Aufkommen von Elektroautos könnten diese als Basis für den Aufbau einer Ladeinfrastruktur von Elektrofahrzeugen dienen. Dies sei für beide Seiten von Vorteil: Einerseits verringere sich der Installationsaufwand für die Ladeinfrastruktur, andererseits verbessere sich die Ausnutzung der Stromversorgungsinfrastruktur der Gleichstrombahnen. Für die ÖV-Unternehmungen bringe dies wichtige Zusatzeinnahmen.¹¹⁴

In jedem Falle ist es entscheidend, welchem Ziel die Einführung alternativer Technologien dienen soll. Strebt man die Unabhängigkeit vom Erdöl oder generell von fossilen Energieträgern an, so ist dies nur mit vollelektrischen Bussen und, eine Wasserstoffbereitstellung mittels Elektrolyse vorausgesetzt, mit Brennstoffzellenbussen möglich. Hierbei darf die elektrische Energie natürlich nicht aus fossiler Primärenergie gewonnen werden. Steht stattdessen die Emissionsreduktion im Vordergrund, kann diese mit allen alternativen Technologien – wenn auch in unterschiedlichem Ausmass – sowie mit dem Trolleybus erreicht werden. Hierbei muss aber in viel stärkerem Masse auf die Primärenergie geachtet werden. Erfolgt die Stromerzeugung überwiegend in konventionellen Wärmekraftwerken, ist nicht ausgeschlossen, dass die Energie- und Schadstoffbilanz eines vollelektrischen Busses sogar schlechter als die eines modernen Dieselmotors sein kann. Zielt man hingegen vorrangig auf die Reduktion des Energiebedarfs, so lässt sich die Systemwahl nicht mehr so einfach begründen. Abhängig von Einsatzgebiet und Strommix kann jeweils ein anderes System als das effizienteste in Frage kommen. Der Beantwortung dieser Frage widmen sich die folgenden Kapitel.

¹¹³Siehe z. B. Ruhl u. a. 2012; an den Grundaussagen hat sich nichts geändert, auch wenn zumindest Dieselhybridbusse inzwischen an der Schwelle zur Wirtschaftlichkeit stehen.

¹¹⁴Müller-Hellmann 2012.

4

Berechnungsmodell

4.1 Grundlagen

4.1.1 Ziel

Ein Vergleich verschiedener Antriebssysteme ist nur dann sinnvoll, wenn er auf einer einheitlichen Basis erfolgt. Das wichtigste Unterscheidungskriterium wird im Rahmen der folgenden Untersuchung der Energiebedarf für eine konkrete Transportaufgabe sein. Eine Betrachtung innerhalb der Systemgrenze *Fahrzeug* genügt hierbei nicht, da die Energie, welche dem Fahrzeug zugeführt wird, meist schon mehrere Wandlungsprozesse durchlaufen hat, weshalb der gesamte Energiefluss von der Primärenergiequelle bis zum Rad zu berücksichtigen ist («well-to-wheel»). Dieser beinhaltet zudem nicht nur den Traktionsenergiebedarf, sondern auch den Energiebedarf für die sogenannten Hilfsbetriebe oder Nebenverbraucher, welche die Heizung oder Klimatisierung des Fahrgastraumes einschliessen.

Oft werden standardisierte Fahrzyklen zur Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Diese gelten aber jeweils nur für eine bestimmte Kombination von Randbedingungen. Die wesentlichen Parameter, wie Streckentopographie, Besetzung oder Verkehrsverhältnisse sind aber oft selbst innerhalb ein und desselben Verkehrsnetzes sehr unterschiedlich und werden daher bei Anwendung von Standardzyklen nur ungenügend berücksichtigt. Deshalb wird hier der Ansatz verfolgt, die Fahrzyklen fahrdynamisch auf Basis dieser Linienparameter zu berechnen. Damit lassen sich die Antriebssysteme auf Basis eines konkreten Anwendungsfalles vergleichen, was Aussagekraft und Übertragbarkeit der Ergebnisse verbessert.

Ein Modell, das diesen Forderungen entspricht, soll im Folgenden schrittweise entwickelt werden. Nach einer kurzen Zusammenfassung der fahrdynamischen Grundlagen wird das generische Modell abgeleitet und auf die zu vergleichenden Antriebssysteme übertragen. Anschliessend wird beschrieben, wie der Leistungs- und der Energiebedarf ab Tank ermittelt werden. Die Bestimmung des Primärenergiebedarfs sowie die Abschätzung der Emissionen ist Gegenstand des 5. Kapitels.

4.1.2 Abgrenzung

Wie eingangs erläutert, ist das Ziel dieser Arbeit ein Vergleich verschiedener Antriebssysteme. Dieser Vergleich kann nur gelingen, wenn der gesamte Prozess – d. h. vor allem der gesamte Energiefluss – abgebildet wird. Aufgrund der Verschiedenheit und Komplexität der Subsysteme sind Abstriche bei der Genauigkeit der Modellierung jedoch unvermeidlich. Somit werden die technischen Parameter als gegeben betrachtet, eine Optimierung einzelner Subsysteme ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Beispielsweise ist allein schon das Energiemanagement von Dieselhybridbussen so komplex, dass es ein eigenes Forschungsgebiet darstellt.¹

Gleichermassen werden die Eigenschaften der Batterien als gegeben angenommen und es wird vorausgesetzt, dass sie betriebstauglich sind. Lade- und Entladekennlinien inklusive deren Nichtlinearität konnten hier nicht modelliert werden, eine Leistungsbeschränkung ist nicht implementiert. Somit bestünde die Gefahr, die Rekuperation von Bremsenergie bei niedrigen Ladezuständen zu überschätzen: Eine niedrige Spannung führt bei gegebener Ladeleistung zu höheren Strömen, welche gegebenenfalls den zulässigen Maximalstrom überschreiten, wodurch ein Teil der Bremsenergie nicht gespeichert werden kann. Durch die Vorgabe eines nicht zu niedrigen minimalen Ladezustands (mindestens 20 %) sowie einer moderaten Soll-Bremsverzögerung von $a_{Br} \leq 1,0 \text{ m/s}^2$ (dies reduziert die Bremsleistung) lässt sich diese Einschränkung aber gut kompensieren.

Die beiden Ladetechnologien (konduktiv und induktiv) werden als betrieblich gleichwertig angesehen, sodass eine getrennte Betrachtung entfallen kann, zumal auch ihre Wirkungsgrade nicht allzu stark voneinander abweichen (siehe Tabelle 4.6).

4.1.3 Vergleichsumfang

Aus heutiger Sicht ist nicht abzusehen, welche Antriebssysteme sich durchsetzen werden. Es ist sehr wahrscheinlich, dass zumindest während eines Übergangszeitraums mehrere Antriebssysteme parallel zum Einsatz kommen, wie dies heute zum Teil schon der Fall ist. Daher erscheint es angebracht, möglichst alle derzeit planmässig eingesetzten oder zumindest in Erprobung befindlichen Systeme in den Vergleich einzubeziehen. Hierbei handelt es sich um

- nichtelektrische Antriebssysteme:
 1. Dieselbus (als Referenzsystem),
 2. Erdgasbus;
- teilelektrische und hybride Antriebssysteme:
 3. dieselelektrischer Bus,
 4. serieller Dieselhybridbus,

¹Siehe z. B. Elbert 2014.

5. serieller Dieselhybridbus mit Zwischenaufladung,²
 6. paralleler Dieselhybridbus,
 7. paralleler Dieselhybridbus mit Zwischenaufladung,
 8. Brennstoffzellen-Hybridbus,
 9. Brennstoffzellen-Hybridbus mit Zwischenaufladung;³
- vollelektrische Antriebssysteme:
10. Batteriebus,
 11. Trolleybus,
 12. Trolley-Hybridbus.

Im Folgenden wird ein Modell entwickelt, das einen energetischen Systemvergleich aller hier aufgezählten Antriebssysteme ermöglicht.

4.2 Struktur des Berechnungsmodells

4.2.1 Modellaufbau

Überblick

Das auf den fahrdynamischen Grundbeziehungen basierende Berechnungsmodell, welches in diesem Kapitel hergeleitet und beschrieben wird, dient zur Bestimmung des Energiebedarfs auf der Systemebene *Fahrzeug* («tank-to-wheel»). Es fungiert als eigenständiges Werkzeug, sofern der Vergleich auf Basis der Energiebedarfswerte eines Umlaufs das Ziel ist. Zugleich bildet es den Kernbestandteil der im 5. Kapitel erläuterten Vergleichsmethodik, welche der Bestimmung des Primärenergiebedarfs sowie der Treibhausgas- und Schadstoffemissionen dient.

Die Berechnung erfolgt stets für einen Umlauf⁴ mit dem zuvor ausgewählten Fahrzeugtyp auf der durch vorzugebende Infrastrukturdaten und betriebliche Parameter charakterisierten Linie. Es wird an jeder Haltestelle gehalten, deren Haltezeitvorgabe grösser Null ist, zudem wird immer der gesamte Linienverlauf befahren. Kurse mit einem verkürzten Laufweg müssen daher in einer separaten Linie zusammengefasst werden. Das Fahrzeug wird als Massenpunkt betrachtet, die Fahrzeuglänge wird also vernachlässigt. Angesichts der Maximallänge von 25 m wird dies als vertretbar angesehen.

In der Abbildung 4.1 ist der Berechnungsablauf vereinfacht dargestellt. Grundprinzip ist die Berechnung in Zeitschritten gleicher Länge dt , innerhalb eines jeden Zeitschrittes werden alle physikalischen Zustandsgrößen als konstant angesehen. Diese Vorgehensweise kann natürlich nur dann funktionieren,

²Hybridbusse, die das Ladekonzept der Zwischenaufladung nutzen, werden auch als «Plug-In-Hybride» bezeichnet.

³Hier ist noch keine Anwendung bekannt.

⁴Es ist zudem möglich, Energiebedarf und Emissionen für ein volles Betriebsjahr zu berechnen, was im Kapitel 5 erläutert wird.

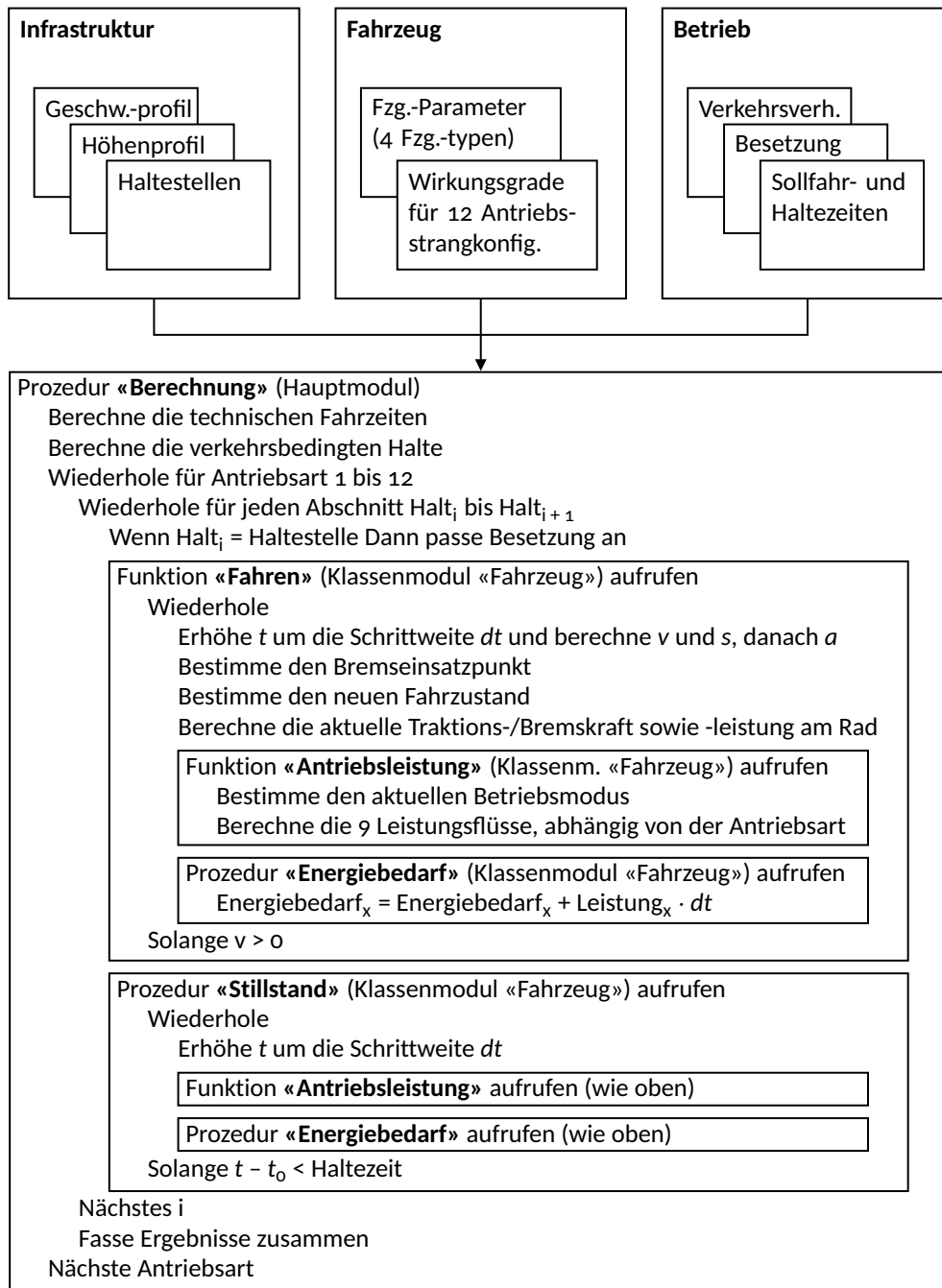


Abbildung 4.1: Grundaufbau des Berechnungsmodells (stark vereinfacht)

wenn für die Schrittweite ein möglichst kleiner Wert gewählt wird ($dt < 1$ s, Empfehlung: $dt = 0,1$ s), um die Abweichungen gering zu halten.

Implementiert wurde das Programm mit Visual Basic for Applications (VBA) für MS Excel 2011 (für Apple-Rechner), das Programm ist auch auf Windows-Rechnern lauffähig.⁵ Die Wahl gerade dieser Programmiersprache mag nicht unbedingt naheliegend sein; es ist dem Autor bewusst, dass geeignetere Werkzeuge für die Umsetzung eines solchen Modells existieren. Zwei Gründe waren für die Entscheidung ausschlaggebend: Erstens soll das Modell möglichst auch Nutzern in ÖV-Unternehmungen oder Behörden als Werkzeug dienen können. Dort ist die im akademischen Bereich übliche Spezialsoftware, deren Lizenzen teuer sind, in der Regel nicht verfügbar. Somit musste ein verbreitetes Programm als Basis dienen, was MS Excel zweifellos ist. Zweitens erleichtert die Möglichkeit, die Ein- und Ausgabe von Werten sowie Teile der Berechnungen mittels Tabellenblättern innerhalb derselben Datei abzuwickeln, die Handhabung des Programms sowohl für Entwickler als auch für Nutzer.

Bestimmung des Bremsesatzpunkts

Während die Bremszielpunkte bereits zu Beginn der Berechnung bekannt sind, gilt dies nicht für die Bremsesatzpunkte. Die eleganteste Methode wäre, diese mittels einer Rückwärtsrechnung ab den Bremszielpunkten zu bestimmen. Nach einigen Überlegungen wurde dieser Ansatz angesichts der gegebenen Möglichkeiten als zu ambitioniert verworfen; insbesondere wurde die Bestimmung der Schnittpunkte der Trajektorien aus Vorwärts- und Rückwärtsrechnung bei einem möglicherweise komplexen Geschwindigkeitsprofil als zu aufwändig erachtet. Somit verblieb als praktikabler, jedoch recht uneleganter Weg, eine konstante Bremsverzögerung vorzugeben, bei jedem Rechenschritt den Bremsweg aus der aktuellen Geschwindigkeit zu bestimmen und dann zu prüfen, ob die Bremsung eingeleitet werden muss oder nicht.

Immerhin ermöglicht die konstante Bremsverzögerung, bei der Berechnung des Bremswegs auf das Zeitschrittverfahren verzichten zu können und ihn stattdessen analytisch zu bestimmen – im Idealfall mit nur einem Rechenschritt. Bei dieser Vorgehensweise treten jedoch zwei Schwierigkeiten auf: Erstens kann sich innerhalb des Bremsweges die Neigung verändern, zweitens nimmt der Luftwiderstand mit sinkender Geschwindigkeit nichtlinear ab. Beides beeinflusst den Bremsweg und muss daher berücksichtigt werden. Für den Luftwiderstand lässt sich auf Basis der Referenzgeschwindigkeit v_m ein mittlerer Wert berechnen, die Formel samt Herleitung kann dem Anhang A.2 (S. 177) entnommen werden. Die verschiedenen Neigungen werden dadurch berücksichtigt, dass sich die Funktion *Bremsweg* mit dem Kilometerwert des Neigungswechsels als neuem Eingangsparameter selbst aufruft (Rekursion). Es kann nämlich vorkommen, dass die Steigung so gross ist, dass die Summe der Fahrwiderstandskräfte eine Bremskraft

⁵Getestet wurde dies mit MS Excel 2015 für Windows.

ergibt, welche die vorgegebene Bremsverzögerung überschreitet. In diesem Falle wird der betragsmässig grössere Wert herangezogen. Beide Massnahmen stellen sicher, dass die Berechnung des Bremsweges hinreichend genau ist.

Wahl des Fahrzustands

Wie die Abbildung 4.1 zeigt, erfolgt die Berechnung stets von Halt zu Halt, weshalb ein Fahrabschnitt nur mit dem Fahrzustand *Beschleunigung* beginnen kann. Ein Übergang zu einem anderen Fahrzustand findet dann statt, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind:

1. Beschleunigung/Beharrung/Auslauf → Bremsung:
Sobald der Bremseinsatzpunkt erreicht ist, wird, unabhängig vom gerade aktiven Fahrzustand, die Bremsung eingeleitet. Ein Wechsel in einen anderen Fahrzustand ist erst wieder möglich, nachdem die Zielgeschwindigkeit $v_{zul,2}$ erreicht wurde.
2. Beschleunigung → Beharrung:
 - (a) Wenn die örtlich zulässige Geschwindigkeit $v_{zul} \pm 0,1$ m/s erreicht ist⁶ *oder*
 - (b) wenn im aktuellen Berechnungsschritt v_{zul} noch nicht erreicht ist, im folgenden aber überschritten würde *oder*
 - (c) in einer Entfernung von 30 m oder weniger eine Geschwindigkeitsbeschränkung mit der soeben erreichten Geschwindigkeit folgt.
3. Beharrung → Beschleunigung:
 - (a) Wenn im aktuellen Berechnungsschritt v_{zul} noch nicht erreicht ist und im folgenden auch nicht überschritten würde *und nicht*
 - (b) in einer Entfernung von 30 m oder weniger eine Geschwindigkeitsbeschränkung mit der soeben erreichten Geschwindigkeit folgt.
4. Beschleunigung → Auslauf:
 - (a) Die Nutzung des Auslaufs ist erwünscht (Vorgabe des Benutzers) *und*
 - (b) die Summe der Fahrwiderstandskräfte ist grösser als Null *und*
 - (c) die Steigung beträgt weniger als 4 % *und*
 - (d) die aktuell gefahrene Geschwindigkeit ist grösser als 11 m/s *und*
 - (e) die nächste Bremszielgeschwindigkeit ist kleiner als 5,6 m/s *und*
 - (f) die ohne Auslauf verbleibende Fahrzeit in der Beharrung würde weniger als 10 s betragen.
5. Beharrung → Auslauf:
 - (a) Die Bedingungen für den Übergang in die Beschleunigung sind *nicht erfüllt und*

⁶Die Angabe eines Wertebereichs ist hier notwendig, um ein mögliches Pendeln zwischen Beschleunigung und Bremsung auszuschliessen. Für den Zeitschritt von $dt = 0,1$ s hat sich ein Bereich von 0,2 m/s als günstig herausgestellt.

- (b) alle Bedingungen des 4. Punkts sind erfüllt.
6. Bremsung → Auslauf:
- (a) Die Zielgeschwindigkeit der Bremsung wurde erreicht und ist grösser als 11 m/s *und*
 - (b) die Nutzung des Auslaufs ist erwünscht (Vorgabe des Benutzers) *und*
 - (c) die Summe der Fahrwiderstandskräfte ist grösser als Null *und*
 - (d) die Steigung beträgt weniger als 4 %.
7. Bremsung → Beharrung:
- Sofern auch nur eine Bedingung für den Übergang in den Auslauf nicht erfüllt ist, wird stattdessen in die Beharrung gewechselt.
8. Auslauf → Beschleunigung:
- (a) Es wird wieder beschleunigt, wenn die Geschwindigkeit um mehr als 3 m/s abgesunken *und*
 - (b) der Bremsenansatzpunkt mehr als 200 m entfernt ist *oder*
 - (c) falls die Geschwindigkeit unter 7 m/s abgesunken ist.

Die Bremsung hat stets Priorität; die oben aufgeführten Bedingungen werden also nur dann geprüft, wenn der Bremsenansatzpunkt noch nicht erreicht wurde. Ein direkter Übergang aus der Bremsphase in die Beschleunigung sowie aus der Auslaufphase in die Beharrungsfahrt ist nicht möglich. Ein Übergang in die Auslaufphase wird nur dann als sinnvoll angesehen, wenn die Anfangsgeschwindigkeit grösser als 11 m/s (etwa 40 km/h) ist (4.d, 6.a). Auch soll die Steigung nicht zu gross sein ($n < 4\%$), um die Bremswirkung des Streckenwiderstandes zu begrenzen (4.c, 6.d). Die Länge einer Auslaufphase soll 200 m nicht übersteigen, weshalb erst ab 10 s vor Erreichen des Bremsenansatzpunkts in den Auslauf gewechselt wird (4.f). Durch die vorgenannten Festlegungen kommen die im 8. Punkt genannten Bedingungen nur im Ausnahmefall zur Anwendung; sie verhindern, dass eine Auslaufphase zu einem vorzeitigen Halt führt.

4.2.2 Eingangsgrössen

Infrastruktur

Die Infrastrukturparameter gliedern sich in

1. Haltestellen,
2. Höhenprofil (die Neigungen werden aus den Höhenangaben berechnet) sowie
3. Geschwindigkeitsprofil (örtlich zulässige Geschwindigkeiten).

Zur Erleichterung der Eingabe können, sofern bekannt, die Höhenlagen der Haltestellen im Rahmen der Haltestellendaten vorgegeben werden, womit die gesonderte Vorgabe des Höhenprofils entfällt.

Zwingend ist einzig die Angabe der Haltestellenabstände,⁷ getrennt nach Richtung 1 und 2. Aus diesen Werten wird eine durchgehende Kilometrierung für den Umlauf ermittelt, welche eine unverzichtbare Eingangsgrösse für die Berechnung darstellt. Sind die Höhenlagen der Haltestellen nicht bekannt, kann das Höhenprofil alternativ auch anhand beliebiger Höhenpunkte bezogen auf die Kilometrierung angegeben werden. Damit das Programm das Geschwindigkeitsprofil berechnen kann, sind diejenigen Bereiche (wiederum auf die Kilometrierung bezogen) anzugeben, bei denen von der vorgegebenen Grundgeschwindigkeit abgewichen wird. Hinzu kommen die sogenannten trassierungsbedingten Geschwindigkeitseinbrüche, welche vor allem der Berücksichtigung von Abbiegevorgängen dienen, da das Programm diese aus den übrigen Angaben nicht ableiten kann. Sie sind einer Bezugshaltestelle zugeordnet und es ist die Entfernung in Metern von dieser anzugeben. Hierbei sind auch negative Werte zulässig, was bedeutet, dass der Geschwindigkeitseinbruch in Fahrtrichtung gesehen vor der Bezugshaltestelle liegt. An jedem dieser Punkte wird dem Geschwindigkeitsprofil eine Geschwindigkeitsreduktion auf 20 km/h mit einer Länge von 30 m hinzugefügt.

Sind Plug-In-Hybridbusse oder der Batteriebus mit Zwischenaufladung Teil des Vergleichs, müssen die Haltestellendaten um die Ladeleistungen der jeweiligen Ladestationen ergänzt werden (es wird vorausgesetzt, dass Ladestationen sich nur an Haltestellen befinden können). Da für Batteriebusse andere Ladestrategien als für Plug-In-Hybridbusse gelten, müssen die Eingaben getrennt für beide Antriebsarten erfolgen. Als Ladezeit dient die planmässige Haltezeit (oder, an Endhaltestellen, die Wendezeit), abzüglich der Zeit, die zum Auf- und Abbau des elektrischen Kontakts zur Ladestation benötigt wird. Für den Trolley-Hybridbus ist der Bereich anzugeben, welcher mit Fahrleitung ausgerüstet ist. Es wird angenommen, dass das An- und Abdrahten nur an Haltestellen während der planmässigen Haltezeit erfolgt. Beim «klassischen» Trolleybus wird angenommen, dass die gesamte Strecke mit einer Oberleitung ausgerüstet ist, sodass hierzu keine gesonderten Eingaben notwendig sind.

Fahrzeuge

Im Busverkehr von Städten und Agglomerationen haben sich im Wesentlichen vier Gefässgrössen etabliert: Midi-, Solo- (auch Standardbus genannt), Gelenk- und Doppelgelenkbus.⁸ Die Unterschiede der Hauptkenndaten zwischen verschiedenen Fahrzeugtypen ein und derselben Gefässgrösse sind verhältnismässig gering, wie man an den Beispielen im Anhang A.6 erkennt. Aus diesem Grund

⁷Ist die Vorgabe *trassierungsbedingter Geschwindigkeitseinbrüche* erforderlich, müssen zudem die Haltestellenbezeichnungen angegeben werden, da diese als Bezug dienen.

⁸Kleinbusse sollen hier nicht betrachtet werden, da ihnen nur eine vergleichsweise geringe Bedeutung zukommt und ihre Typenvielfalt die Ableitung eines generischen Fahrzeugs nicht gestattet. Soll eine mit Kleinbussen befahrene Linie betrachtet werden, sind die Daten eines konkreten Fahrzeugs heranzuziehen.

wurde entschieden, keine konkreten Fahrzeuge abzubilden, sondern stattdessen jeder der vier genannten Gefässgrössen ein sogenanntes generisches Fahrzeug zuzuordnen. Diejenigen Vorgabewerte, die für alle Antriebssysteme als gleich angesehen werden, sind in der Tabelle 4.1 zusammengestellt, die übrigen, systemspezifischen Werte enthält die Tabelle 4.2. Sämtliche Werte können geändert sowie alle in der Vorgabe noch einheitlichen Kenngrössen bei Bedarf auch systemspezifisch abgewandelt werden. Zudem lassen sich sowohl weitere Fahrzeugtypen ergänzen als auch die Kennwerte der generischen Fahrzeugtypen jederzeit durch Werte realer Fahrzeuge ersetzen.

Tabelle 4.1: Für alle Antriebssysteme gültige Kennwerte der generischen Fahrzeugtypen

Kennwert	Einheit	Midibus	Solobus	Gelenkbus	DG-Bus
Länge	m	9,5	12,0	18,0	24,5
Breite	m	2,40	2,55	2,55	2,55
Sitzplätze	-	25	30	45	60
Stehplätze (4 Pers./m ²)	-	22	34	62	94
Rollwiderstandsbeiwert	N/kN			12	
Massenfaktor	-			1,1	
Reibungsbeiwert (max.)	-			0,5	
Luftwiderstandsbeiwert	-			0,7	

Quelle: Eigene Annahmen auf Basis des Abschnitts 4.3.1 sowie der technischen Daten im Anhang A.6, S. 189–194

Die Sitz- und Stehplätze sind für jede Gefässgrösse, unabhängig vom Antriebssystem, als einheitlich angenommen. Rollwiderstandsbeiwert und Massenfaktor sind spezifische Grössen und werden als unabhängig von der Gefässgrösse angesehen. Hinsichtlich des Massenanteils auf den Treibachsen gilt, dass bei zweiachsigen Bussen (Midi- und Solobus) in der Regel nur die Hinterachse angetrieben ist und diese 60 % des Gewichts trägt.⁹ Im Falle des Gelenk- (3 Achsen) und Doppelgelenkbusses (4 Achsen) wird davon ausgegangen, dass beim Diesel- und Gasbus sowie beim Parallelhybridbus nur eine Achse angetrieben ist, bei allen übrigen Antriebssystemen werden zwei angetriebene Achsen angenommen.

Aus Platzgründen sind die Plug-In-Hybridbusse nicht in der Tabelle 4.2 enthalten. Ihre Kennwerte entsprechen dem jeweils bauartgleichen Hybridbus, mit Ausnahme der folgenden Abweichungen: Beim Parallelhybrid wird die vierfache Batteriekapazität, für den Brennstoffzellen-Hybridbus werden die halbe Leistung der Brennstoffzelle sowie eine um ca. 30 % höhere Batteriekapazität angenommen (jeweils im Vergleich zur «normalen» Hybridvariante). Beim seriellen Hybridbus hingegen unterscheiden sich die beiden Varianten nicht.

⁹Für den eher seltenen Fall eines dreiachsigen Solobusses muss der Wert entsprechend angepasst werden.

Tabelle 4.2: Systemspezifische Kennwerte der generischen Fahrzeugtypen

Kennwert		D	G	DE	SHy	PHy	BZHy	Batt	Tro TroHy
<i>Midibus</i>									
Leermasse	t	10,50	11,25	11,00	11,50	10,50	12,00	10,75	10,00
Querschnitt	m ²	7,2	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7
Gewicht auf TA	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Leistung VM/BZ	kW	170	170	160	120	150	80	0	0
Leistung EM	kW	0	0	150	150	90	140	140	150
Batterieladung	kWh	0	0	0	12	4	15	45	20
<i>Solobus</i>									
Leermasse	t	11,75	12,50	12,00	12,50	11,50	13,00	12,00	11,00
Querschnitt	m ²	7,9	8,7	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,7
Gewicht auf TA	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Leistung VM/BZ	kW	210	220	200	170	175	120	0	0
Leistung EM	kW	0	0	190	180	110	180	180	160
Batterieladung	kWh	0	0	0	18	5	20	60	30
<i>Gelenkbus</i>									
Leermasse	t	17,00	17,25	18,00	19,00	17,25	20,00	19,00	19,50
Querschnitt	m ²	7,9	8,7	8,4	8,4	8,4	8,4	8,2	8,7
Gewicht auf TA	-	0,4	0,4	0,7	0,7	0,4	0,7	0,7	0,7
Leistung VM/BZ	kW	260	250	250	200	180	150	0	0
Leistung EM	kW	0	0	240	260	150	240	260	280
Batterieladung	kWh	0	0	0	25	10	25	120	60
<i>Doppelgelenkbus</i>									
Leermasse	t	22,50	23,25	23,50	25,00	23,50	26,00	24,00	24,00
Querschnitt	m ²	8,2	8,7	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,7
Gewicht auf TA	-	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5
Leistung VM/BZ	kW	265	260	265	220	220	150	0	0
Leistung EM	kW	0	0	255	320	170	320	340	340
Batterieladung	kWh	0	0	0	45	18	45	200	80

Gewicht auf TA: relativer Anteil des Gesamtgewichts auf den Treibachsen

Quelle: Eigene Annahmen auf Basis der technischen Daten im Anhang A.6, S. 189–194

Betrieb

Die betrieblichen Parameter gliedern sich in

1. Sollfahr- und Sollhaltezeiten,
2. Besetzung (Anzahl der Fahrgäste je Streckenabschnitt) sowie
3. Verkehrsverhältnisse (Ausmass der Behinderung durch andere Verkehrsteilnehmer).

Mindestvorgabe ist eine mittlere relative Besetzung (anzugeben in der Fahrzeug-Tabelle als auf die Summe aus Sitz- und Stehplätzen bezogener Prozentwert), welche über den Umlauf als konstant angenommen wird. Liegen hingegen haltestellenspezifische Werte vor (anzugeben als absolute Zahlen), werden stattdessen diese Angaben verwendet und die Besetzung nach jedem Halt entsprechend angepasst. Die Angabe von Sollfahr- und Sollhaltezeiten (welche beispielsweise im Betriebsleitsystem hinterlegt sind) ist fakultativ, wobei sich zumindest die Angabe von Haltezeiten empfiehlt. Fehlen auch diese, werden für Zwischenhaltestellen einheitlich 20 s Haltezeit angenommen; an Endhaltestellen wird die Mindestwendezeit angesetzt, deren Vorgabewert 3 min ist und welcher selbstverständlich angepasst werden kann. Eine Haltezeit von 0 s wird als Durchfahrt an dieser Haltestelle interpretiert.

Die Berücksichtigung des Strassenverkehrsaufkommens ist angesichts der grossen örtlichen und zeitlichen Schwankungen schwierig, sodass vorerst eine vereinfachte Lösung implementiert wurde, indem sogenannte «verkehrsbedingte Halte» vorgegeben werden können. Darunter sind sowohl Halte an Lichtsignalanlagen als auch Halte aufgrund von Behinderungen durch andere Verkehrsteilnehmer zu verstehen. Es sind der Halteort sowie die Dauer des Haltes anzugeben. Wurden Sollfahrzeiten vorgegeben, werden diese Halte automatisch berechnet, sofern die Differenz zwischen der kürzesten Fahrzeit $t_{f,k}$ (diese wird auf Basis des Dieselbusses automatisch berechnet) und der Sollfahrzeit $t_{f,s}$ zwischen zwei benachbarten Haltestellen mehr als 20 s beträgt. Hierbei wird zwischen diesen Haltestellen die Anzahl Halte n_H gemäss

$$n_H = (t_{f,s} - t_{f,k}) \text{ div } 20 \quad (4.1)$$

in gleichmässigen Abständen eingefügt (mit div ist eine ganzzahlige Division gemeint). Die Fahrzeitverlängerung durch die zusätzlichen Brems- und Beschleunigungsvorgänge wird berechnet und die verbleibende Differenz zwischen Soll- und Istfahrzeit als Haltezeit gleichmässig auf die eingefügten Halte aufgeteilt. Um den Einfluss einer allfällig zu grossen Differenz zu beschränken, werden zwischen zwei Haltestellen höchstens vier verkehrsbedingte Halte eingefügt.

4.2.3 Ausgabewerte

Ausgegeben werden für alle Antriebssysteme die folgenden Energiewerte, sämtlich in Kilowattstunden:

- Luftwiderstand E_{Luft} am Rad (Antreiben/Bremsen), ab Tank/FL, ab Batterie
- Rollwiderstand E_{Roll} am Rad (Antreiben/Bremsen), ab Tank/FL, ab Batterie
- Steigungswiderstand E_{Steig} am Rad (Antreiben/Bremsen), ab Tank/FL, ab Batterie
- Beschleunigungswiderstand E_{Beschl} am Rad (Antreiben), ab Tank/FL, ab Batterie
- Bremsenergie (mechanisch/elektrisch) $E_{\text{B,mech}}$ und $E_{\text{B,el}}$ am Rad
- Energiebedarf der Hilfsbetriebe E_{HB} ab Gleichspannungszwischenkreis (oder «Klemme» Hilfsbetriebe), ab Tank/FL, ab Batterie
- Ladeenergie (intern) $E_{\text{Lad,int}}$ ab Tank/FL und ab Batterie
- Ladeenergie (extern) $E_{\text{Lad,ext}}$ ab Ausgang Ladestation
- Gesamter Energiebezug E_{Tank} und E_{Batt} ab Tank/FL und ab Batterie
- Rekuperierte Energie E_{Rekup} in Fahrleitung, Batterie und Hilfsbetriebe
- Summenwerte E_{TTW} und E_{Prim} ab Tank und ab Primärenergie

Zudem wird, bezogen sowohl auf den gesamten Energiebedarf ab Tank E_{TTW} und ab Primärenergie E_{Prim} , der spezifische Energiebedarf in folgenden Einheiten ausgegeben:

- Kilowattstunden je Fahrzeugkilometer
- Wattstunden je Bruttotonnenkilometer
- Liter Dieseläquivalent je 100 Fahrzeugkilometer
- Liter Dieseläquivalent je 100 Personenkilometer
- Wattstunden je Personenkilometer

Weiterhin werden die Verlustenergien (in Kilowattstunden) für jedes Subsystem des Modells angegeben (zum Modellaufbau siehe Abbildung 4.4).

Schliesslich werden, basierend auf den Energiewerten ab Tank E_{TTW} und den Emissionsfaktoren, die Treibhausgas- und Schadstoffemissionen abgeschätzt und ausgegeben. Details hierzu finden sich im Abschnitt 5.4 ab Seite 104.

4.3 Fahrdynamische Grundlagen

4.3.1 Basisfahrspiel

Die Ermittlung des Traktionsenergiebedarfs basiert auf dem Leistungsbedarf. Zu dessen Bestimmung wiederum ist die Kenntnis der Fahrwiderstandskräfte erforderlich, welche auf fahrdynamischer Basis berechnet werden. Es wird je Antriebssystem ein Umlauf auf einer durch ihre Parameter gegebenen Streckenführung (siehe Abschnitt 4.2.2) berechnet.

Eine Fahrt zwischen zwei Halten, auch Fahrspiel genannt, setzt sich üblicherweise aus drei Fahrzuständen zusammen: Beschleunigung (1), Beharrungsfahrt (2) und Bremsung (4). Bei kurzen Halteabständen entfällt die Beharrungsfahrt; die Bremsung folgt also unmittelbar auf die Beschleunigungsphase. Bei grösseren Halteabständen kann es, sofern es die aktuelle Verspätungssituation zulässt,

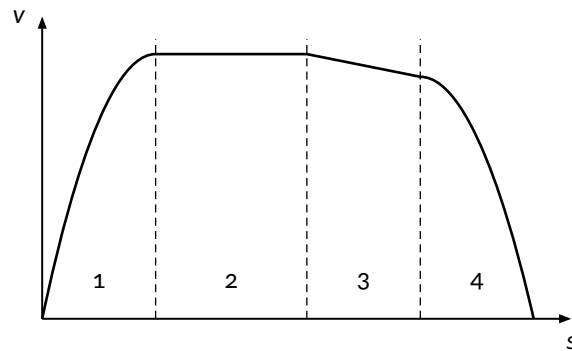


Abbildung 4.2: Basisfahrspiel (Schema)

sinnvoll sein, vor dem Bremsen einen Auslaufabschnitt (3) einzulegen, um Energie zu sparen (siehe Abbildung 4.2).

Beschleunigung

Allgemein gilt, dass es für eine Änderung des Bewegungszustands eines Fahrzeuges der Einwirkung einer Kraft bedarf. Damit ein Fahrzeug beschleunigen kann, müssen dessen Fahrwiderstandskräfte F_{Wn} überwunden werden. Die Antriebskraft F_Z muss sich also im Gleichgewicht mit diesen Fahrwiderstandskräften befinden:¹⁰

$$F_Z = \sum F_{Wn} = F_{WR} + F_{WL} + F_{WS} + F_{WB} \quad (4.2)$$

Dabei bedeuten

- F_{WR} Radwiderstand,
- F_{WL} Luftwiderstand,
- F_{WS} Steigungswiderstand und
- F_{WB} Beschleunigungswiderstand.

Dies funktioniert nur, wenn die Kraftschlussverhältnisse die Übertragung der Antriebskraft vom Antriebsrad auf die Strasse auch zulassen. Deshalb muss, sobald eine Traktionskraft aufzubringen ist, berechnet werden, welche Antriebskraft maximal übertragen werden kann:

$$F_{Z,max} = F_{G,A} \cdot \cos \alpha \cdot \mu_H \quad (4.3)$$

mit

- $F_{Z,max}$ maximal übertragbare Antriebskraft,
- $F_{G,A}$ Gewichtskraft auf der Antriebsachse/den Antriebsachsen,
- α Neigungswinkel und
- μ_H Haftreibungsbeiwert.

¹⁰Pütz 2011, S. 112.

Ist die maximal übertragbare Antriebskraft niedriger als die berechnete, so muss die Beschleunigung entsprechend reduziert werden. Es wird nicht geprüft, ob die maximale Steigfähigkeit überschritten wurde.¹¹

Eine komplexe Grösse ist der *Radwiderstand*, welcher sich aus den folgenden fünf Bestandteilen zusammensetzt:¹²

- Rollwiderstand (Walkwiderstand): Verlustarbeit aufgrund der Verformung des Reifenmaterials;
- Schwallwiderstand: Verlustarbeit beim Wegdrücken von Bodenmaterial oder Wasser (untergeordnete Bedeutung auf festen, trockenen Fahrbahnen);
- Wellenwiderstand: Schwingungsanregung und -dämpfung des Wagenkastens durch Bodenunebenheiten
- Vorspurwiderstand: Seitenkraft durch Vorspurwinkel und Konizität der Reifen
- Seitenkraftwiderstand (bei Kurvenfahrt)

Einen verhältnismässig guten Strassenzustand sowie trockene Fahrbahn vorausgesetzt, kann der Einfluss von Schwall- und Wellenwiderstand vernachlässigt werden. Vereinfachend wird hier zudem nur die Geradeausfahrt betrachtet, bei welcher der Rollwiderstand den grössten Anteil hat, da auch kein Seitenkraftwiderstand auftritt.¹³ Somit ergibt sich der Rollwiderstand zu

$$F_{WR} = f_R \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (4.4)$$

mit

- f_R Rollwiderstandsbeiwert,
- m Fahrzeugmasse inkl. Beladung,
- g Fallbeschleunigung (9,81 m/s²) und
- α Neigungswinkel.

Der Neigungswinkel geht in die Berechnung ein, weil nur der Gewichtskraftanteil senkrecht zur Bewegungsebene (die Normalkraft) wirksam ist.¹⁴ Im Strassenverkehr wird eine Neigung n nicht als Winkel, sondern üblicherweise in Prozent, also in n Meter Höhenänderung je 100 Meter in waagerechter Richtung, angegeben. Der Kosinus eines Winkels α im rechtwinkligen Dreieck ist definiert als das Verhältnis aus Ankathete zu Hypotenuse,¹⁵ somit ergibt sich unter Hinzuziehen des Satzes des Pythagoras

$$\cos \alpha = \frac{100}{\sqrt{10000 + n^2}} \quad (4.5)$$

¹¹Eine Begründung, warum dies zulässig ist, findet sich im Anhang A.3.

¹²Pütz 2011, S. 114 f.

¹³In Pütz 2011, S. 114 werden die jeweiligen Anteile der Komponenten des Radwiderstands leider nicht näher quantifiziert.

¹⁴Bei kleinen Winkeln gilt zwar $\cos \alpha \approx 1$, der Einfluss der Neigung soll aber, da es die Berechnung nicht verlangsamt, dennoch berücksichtigt werden.

¹⁵Die Fahrstrecke bewegt sich entlang der Hypotenuse und nicht entlang deren Projektion in die Ebene.

Der Rollwiderstandsbeiwert unterliegt, abhängig von Fahrbahnbelag und Strassenzustand, einer gewissen Schwankungsbreite:¹⁶

neuer, fester Asphalt; Beton; Pflaster: 0,005 ... 0,015;
ausgefahrener, welliger Asphalt: 0,02 ... 0,03.

Je nach Strassenzustand sind aus diesen Bereichen geeignete Werte zu wählen. Für die Energiebedarfsermittlung wird vorgeschlagen, einen Wert zu verwenden, der etwas über dem Mittelwert des Bereichs für neuen Asphalt liegt (0,012).

Die Berechnung des *Luftwiderstandes* erfolgt mittels der Formel¹⁷

$$F_{WL} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot c_W \cdot \rho_L \cdot v_\infty^2 \quad (4.6)$$

und ihren Eingangsgrößen

A Querschnittsfläche,
 c_W Luftwiderstandsbeiwert,
 ρ_L Luftdichte und
 v_∞ Anströmgeschwindigkeit.

Der Luftwiderstandsbeiwert ist eine fahrzeugspezifische Grösse und wird im Windkanal ermittelt, für Busse liegt er zwischen 0,6 und 0,7.¹⁸ Die Anströmgeschwindigkeit wäre dabei durch vektorielle Addition von Fahr- und Windgeschwindigkeit zu ermitteln. Vereinfachend geht man jedoch oft von einem Gegenwind mit einer konstanten Geschwindigkeit aus (sogenannter Windzuschlag Δv), man setzt also $v_\infty = v + \Delta v$. Im Rahmen einer Energiebedarfsermittlung kann, sofern die zu untersuchende Linie nicht in einer windreichen Region liegt, auf die Berücksichtigung eines Windzuschlags verzichtet werden.

Der *Steigungswiderstand* (oder genauer: Neigungswiderstand) einer Neigung mit dem Winkel α lässt sich folgendermassen berechnen:¹⁹

$$F_{WS} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (4.7)$$

Hierbei sind m die Fahrzeugmasse inklusive Beladung und g die Fallbeschleunigung. Mit der in Prozent angegebenen Neigung n ergibt sich²⁰

$$\sin \alpha = \frac{n}{\sqrt{10000 + n^2}} \quad (4.8)$$

Der *Beschleunigungswiderstand*²¹ gibt an, welche Kraft aufgebracht werden muss, um das Fahrzeug translatorisch zu beschleunigen, wofür eine Vielzahl drehender Teile rotatorisch beschleunigt werden müssen. Eine analytische Berechnung dieser Trägheitsmomente ist schwierig, weshalb dieser Anteil meist mittels

¹⁶Pütz 2011, S. 115, Tab. 8-3.

¹⁷Pütz 2011, S. 116.

¹⁸Pütz 2011, S. 116, Tab. 8-4.

¹⁹Pütz 2011, S. 114.

²⁰Im rechtwinkligen Dreieck ist der Sinus eines Winkels das Verhältnis aus Gegenkathete zur Hypotenuse.

²¹Pütz 2011, S. 112 f.

des sogenannten Massenfaktors λ berücksichtigt wird, der als Zuschlag auf die Fahrzeugmasse angerechnet wird:

$$F_{WB} = \lambda \cdot m \cdot a \quad (4.9)$$

Der Wert des Massenfaktors liegt in der Regel im Bereich von $\lambda \approx 1,1 \dots 1,5$ und ist wesentlich abhängig vom eingelegten Gang.²² Hier soll die untere Grenze ($\lambda = 1,1$) gewählt werden, um den Einfluss der rotierenden Massen nicht zu überschätzen.²³

Beharrungsfahrt

Der Beschleunigungszustand wird verlassen, sobald die örtlich zulässige Geschwindigkeit erreicht ist oder das Leistungsvermögen des Antriebs keine weitere Beschleunigung erlaubt. Die erreichte Geschwindigkeit wird gehalten, bis in den Auslauf übergegangen wird oder die Bremsung eingeleitet werden muss. Auch hier gilt die Formel (4.3), für den Beschleunigungswiderstand gilt jedoch definitionsgemäss $F_{WB} = 0$. Während der Beharrungsfahrt sind die folgenden drei Zustände möglich:

- Beharrungsfahrt mit Traktionskraft: Die Summe der Fahrwiderstände wirkt bremsend, sodass eine Traktionskraft aufgebracht werden muss, die die Fahrwiderstände ausgleicht, um die Geschwindigkeit zu halten.
- Beharrungsfahrt mit Bremskraft: Ist das Gefälle so gross, dass der Betrag des Steigungswiderstands die Summe aus Roll- und Luftwiderstand übertrifft, würde das Fahrzeug beschleunigen. Zum Halten der Geschwindigkeit muss daher gebremst werden.
- Beharrungsfahrt ohne zusätzliche Krafteinleitung: Dieser eher seltene Fall tritt bei Fahrt im Gefälle auf, sofern der (negative) Steigungswiderstand exakt der (positiven) Summe aus Roll- und Luftwiderstand entspricht.

Übersteigt die Summe der Widerstandskräfte bei der aktuellen Geschwindigkeit das Leistungsvermögen des Fahrzeugs (z. B., weil in eine Steigung eingefahren wird), verringert sich die Geschwindigkeit, bis sich ein neues Gleichgewicht eingestellt hat. Eine solche Übergangsphase wird der Beharrungsfahrt mit Traktionskraft zugeordnet.

Auslauf

Der Auslauf lässt sich am günstigsten in der Ebene oder bei geringer Neigung nutzen, um den Anteil der Beharrungsfahrt zu reduzieren, was den Leistungsbedarf (und damit auch den Energiebedarf) senkt. Traktionskraft und Bremskraft

²²Werte nach Pütz 2011, S. 113.

²³Die Werte für den Massenzuschlag des Lastzuges in Pütz 2011, S. 113, Tab. 8-1, welcher dem Bus am nächsten kommen dürfte, sind schon für den 2. Gang niedriger als 0,1.

sind Null, somit wirken allein die Fahrwiderstandskräfte bremsend. Sobald das Gefälle so gross ist, dass Luft- und Rollwiderstand überkompensiert werden, ist kein Auslauf mehr möglich, da gebremst werden muss, um ein Beschleunigen über die zulässige Geschwindigkeit hinaus zu verhindern.

Bremmung

Zum gezielten Verringern der Geschwindigkeit, zum Halten der Geschwindigkeit im Gefälle (dieser Fall wird der Beharrungsfahrt zugerechnet) sowie natürlich zum Anhalten muss gebremst werden. Die erforderliche Bremskraft F_B ist

$$F_B = F_{WB} - (F_{WR} + F_{WL} + F_{WS}) \quad (4.10)$$

mit den übrigen Kräften gemäss Formel (4.2). Der Beschleunigungswiderstand bildet hier die kinetischen Energie ab, die abzubremst ist, wobei eine konstante Bremsverzögerung angenommen wird, um die Berechnung zu vereinfachen. Übersteigt jedoch die Summe der Fahrwiderstände die gemäss Vorgabe erforderliche Bremskraft, wird die erforderliche Bremskraft gleich Null gesetzt, die tatsächliche Bremskraft sowie – daraus resultierend – auch die Bremsverzögerung ergeben sich aus der Summe der Fahrwiderstandskräfte.

Die Formel (4.3) gilt auch für die Bremskraft. Da nicht alle Achsen elektrisch angetrieben sind, wird die maximal übertragbare elektrische Bremskraft durch die Kraftschlussverhältnisse begrenzt, weshalb dies in der Berechnung entsprechend berücksichtigt wird. Bei der mechanischen Bremsung hingegen sind die Verhältnisse insofern günstiger, als dass üblicherweise alle Achsen gebremst sind und somit die Gewichtskraft des gesamten Fahrzeugs bei der Kraftübertragung wirksam ist. Im Rahmen einer Energiebedarfsermittlung ist es nicht sinnvoll, von ungünstigen Kraftschlussverhältnissen auszugehen, sodass auf eine Prüfung, ob die Bremskraft der mechanischen Bremse auf die Strasse übertragen werden kann, verzichtet wird.²⁴

4.3.2 Leistung und Energie

Aus der Traktionskraft und der dabei zu fahrenden Geschwindigkeit ergibt sich die benötigte *Antriebsleistung* als:

$$P_A = F_Z \cdot v \quad (4.11)$$

Diese Formel gilt nur für konstante Werte von F_Z und v . Da der Leistungsbedarf schrittweise berechnet wird und der Zeitschritt hinreichend klein gewählt

²⁴Die folgende Näherungsrechnung veranschaulicht, dass dies unkritisch ist: Um beispielsweise ein 25 t schweres Fahrzeug mit der (recht hohen) Verzögerung von 2 m/s^2 abzubremst, bedarf es einer Bremskraft von 50 kN. In der Ebene ($\alpha = 0$) wäre zur Übertragung dieser Bremskraft ein Haftreibungsbeiwert von mindestens 0,2 nötig, was für Gummireifen auf Asphalt ein sehr niedriger Wert ist.

ist, kann diese Bedingung als erfüllt angesehen werden. Aus der während eines Zeitschritts dt abgerufenen Leistung ergibt sich die mechanische *Arbeit*:

$$W_{\text{mech}} = P_A \cdot dt \quad (4.12)$$

Die im Fahrzeug gespeicherte Bewegungsenergie, d. h. dessen kinetische Energie, entspricht der während des Beschleunigungsvorgangs verrichteten mechanischen Arbeit. Alle in diesem Abschnitt behandelten Formeln beziehen sich auf den Radumfang, berechnen also die mechanische Arbeit. Entscheidend ist nun, auf welche Weise, also mit welcher Konfiguration des Antriebsstrangs, diese mechanische Arbeit zur Verfügung gestellt wird, denn deren Wirkungsgrade unterscheiden sich erheblich. Der Herleitung dieser Wirkungsgrade widmet sich der Abschnitt 4.5.

4.4 Generisches Modell des Antriebsstrangs

4.4.1 Entwicklung der Modellstruktur

Der Modellaufbau folgt einem systemtheoretischen Ansatz.²⁵ Im Mittelpunkt steht das System *Fahrzeug*, welches sich aus verschiedenen, abstrakten Subsystemen zusammensetzt.²⁶ Die drei wichtigsten Anforderungen an das Modell sind:

- Die gesamte Energieflusskette von der Quelle bis zum Rad ist abzubilden,
- die Modellstruktur muss alle zu untersuchenden Antriebssysteme beschreiben können und
- sie muss für alle Antriebssysteme einheitlich sein.

Bei der Betrachtung des Systems *Fahrzeug* werden nur diejenigen Subsysteme berücksichtigt, welche am Energieumsatz beteiligt sind. Sämtliche Hilfsbetriebe werden vereinfachend in einem gemeinsamen Subsystem zusammengefasst. Für die Ermittlung des Energiebedarfs «well-to-wheel» wird zusätzlich das außerhalb der Systemgrenze befindliche Subsystem *Bereitstellung* einbezogen.

Mit Abstand die grösste Verbreitung haben nach wie vor Dieselbusse. Es liegt somit nahe, das prinzipielle Energieflussmodell in einem ersten Schritt anhand dieser Antriebsart zu formulieren. Da ein Rückfluss von Energie (Energierückspeisung) hier nicht möglich ist, erhält man die unidirektionale Energieflusskette Bereitstellung (B) – Speicher (S) – Wandler (W) – Übertragung (Ü), siehe Abbildung 4.3 a.

In der Abbildung bezeichnen E_{Prim} die Primärenergie, welche im Subsystem *Bereitstellung* in E_x , eine prinzipiell beliebige, dem Fahrzeug zuzuführende und dort zu speichernde Energieform, umgewandelt wird. In der Regel handelt es sich

²⁵Zu den theoretischen Grundlagen siehe z. B. Ropohl 1979.

²⁶Der Abstraktionsgrad wird im Abschnitt 4.5 etwas reduziert, wenn den abstrakten Subsystemen konkrete Systemkomponenten zugeordnet werden.

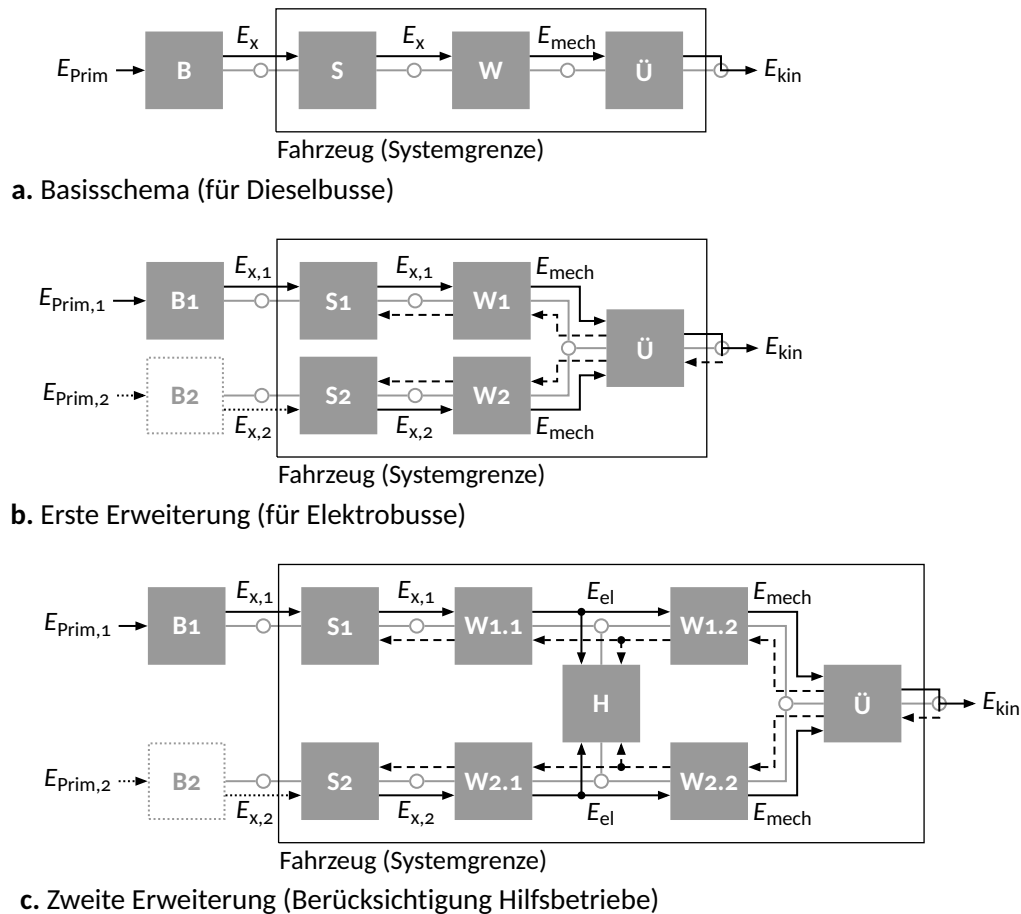


Abbildung 4.3: Herleitung des Energiefluss-Prinzipschemas

hierbei um chemische oder elektrische Energie. Das Subsystem *Speicher* dient dem Aufbewahren der Energie (Speichern im engeren Sinne) und bewerkstelligt die Prozesse des Speicherns (Aufladen) und der Entnahme (Entladen). E_{mech} bezeichnet die mechanische Energie als Ergebnis der Prozesse im Subsystem *Wandler*, das üblicherweise für die grössten Verluste verantwortlich ist. Das Subsystem *Übertragung* sorgt schliesslich dafür, dass die vom Motor abgegebene Rotationsenergie in die kinetische Energie der Fortbewegung E_{kin} umgeformt wird.²⁷

Die Subsysteme Bereitstellung, Wandler und Übertragung können jeweils wiederum aus mehreren Subsystemen zusammengesetzt sein. Das Bereitstellungssystem führt die Energie entweder kontinuierlich oder, weitaus häufiger, diskontinuierlich von aussen zu. Letzteres erzwingt die Speicherung einer definierten Energiemenge auf dem Fahrzeug.²⁸ Die Art der Energie bestimmt die Form ihrer Speicherung und, damit einhergehend, die speicherbare Energiemenge.

²⁷Dies wird hier nicht als Wandlung angesehen, da die Energieform (mechanische Energie) nicht verändert wird.

²⁸Das schliesst nicht aus, dass auch im Falle kontinuierlicher Energiezuführung ein Speicher vorhanden sein kann.

ge. Idealerweise fasst dieser Speicher mindestens die im Laufe eines Betriebstages maximal benötigte Energiemenge, sodass er erst während der Betriebspause wieder aufgeladen werden muss.

In einem zweiten Schritt wird das prinzipielle Modell erweitert, siehe Abbildung 4.3 b. Dies ist notwendig, da hybride Antriebsstränge durch das Vorhandensein eines zweiten Energiespeichers gekennzeichnet sind – heute ausschliesslich für elektrische Energie, meist in Form einer Batterie. Versuchsweise wurde früher auch die Speicherung in Form von Rotationsenergie in Schwungmassenspeichern erprobt, was sich aber nicht durchsetzen konnte. Die Bewegungsenergie wird also aus mehr als nur einer Energieform umgewandelt, ausserdem wird die Rückgewinnung eines Teils der beim Bremsen ansonsten in Wärme umgesetzten kinetischen Energie möglich (in der Abbildung 4.3 durch gestrichelte Linien repräsentiert).

Mit dem erweiterten Modell lassen sich für sämtliche zu vergleichenden Antriebsstrangkonfigurationen alle für die Traktion erforderlichen Energieflüsse abbilden. Damit würde jedoch der teils erhebliche Energiebedarf für Heizung und Klimatisierung des Fahrgastraums vernachlässigt. Bei Batteriebussen kann dieser die Reichweite erheblich reduzieren. Hinzu kommt noch der Energiebedarf für Lüftung, Druckluftanlage, Fahrgastinformationssystem, Beleuchtung usw. Im dritten und letzten Schritt ist das Modell daher so zu erweitern, dass es auch diesen Energiebedarf berücksichtigt. Im elektrischen Antriebsstrang mit der heute üblichen Drehstromantriebstechnik werden diese Komponenten normalerweise aus dem Gleichspannungszwischenkreis über einen separaten Wechselrichter mit Energie versorgt. Es bietet sich daher an, den *Wandler* an dieser Stelle zu teilen und die Hilfsbetriebe (einschliesslich der Klimaanlage und – sofern elektrisch – auch der Heizung) dazwischen einzufügen. Man erhält schliesslich das in der Abbildung 4.3 c dargestellte Modell. Jeweils nicht benötigte Blöcke (so fehlt z. B. beim Dieselbus der Block W 1.2) können durch Zuordnung des Wirkungsgrads $\eta = 1$ «abgeschaltet» werden, wodurch es auch auf die nichtelektrischen Antriebsstränge anwendbar ist.

Mit diesem funktionalen Modell als Ausgangspunkt können nun die Energieflüsse zugeordnet werden und es lässt sich anschliessend für jeden Fahrzeugtyp ein spezifisches Energieflussschema aufstellen. Dies soll im folgenden Abschnitt geschehen.

4.4.2 Ableitung der Betriebsmodi

Aus Gründen der Übersichtlichkeit beschränken sich die folgenden Betrachtungen auf die Systemgrenze «Fahrzeug». Die Ausnahme bildet der Trolleybus, da es aus systematischen Gründen sinnvoll ist, die Fahrleitung als Speicher S_1 zu betrachten. Hinsichtlich der Bereitstellung gilt, dass ein Bereitstellungspfad für mehrere Antriebsstränge zutreffen oder ein Antriebsstrang aus mehreren Pfaden versorgt werden kann. Es bietet sich somit an, die Bereitstellung gesondert zu betrachten (siehe Abschnitt 5.2.1).

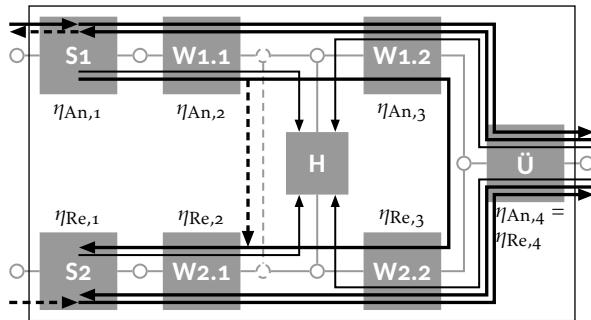


Abbildung 4.4: Funktionales Energieflussschema

Im Modell sind insgesamt neun Energieflüsse vorgesehen: vier, die jeweils einen Teil-Antriebsstrang vollständig passieren (zwei für die Traktion und zwei für die elektrische Bremsung), weitere vier, die der Energieversorgung der Hilfsbetriebe dienen sowie der Energiefluss des Aufladebetriebs (siehe Abbildung 4.4). Den Energieflüssen werden die folgenden Bezeichnungen zugeordnet; die Zahlen 1 und 2 bezeichnen einen Energiefluss im jeweiligen Teil-Antriebsstrang:

– T: Traktion

- T₁: S₁ → W_{1.1} → W_{1.2} → Ü
- T₂: S₂ → W_{2.1} → W_{2.2} → Ü

– B: Elektrische Bremsung mit Energierückspeisung ins Netz oder Speicherung

- B₁: Ü → W_{1.2} → W_{1.1} → S₁
- B₂: Ü → W_{2.2} → W_{2.1} → S₂

– L: Aufladebetrieb: S₁ → W_{1.1} → [W_{1.2} → W_{2.2}] → W_{2.1} → S₂

– HT: Energieversorgung der Hilfsbetriebe aus dem Speicher

- HT₁: S₁ → W_{1.1} → H
- HT₂: S₂ → W_{2.1} → H

– HB: Elektrische Bremsung mit Energieversorgung der Hilfsbetriebe

- HB₁: Ü → W_{1.2} → H
- HB₂: Ü → W_{2.2} → H

Allerdings können diese Energieflüsse nicht alle gleichzeitig auftreten, denn gegenläufige Energieflüsse dürfen sich nicht überlagern. So ist es z. B. nicht möglich (und auch nicht sinnvoll), der Batterie gleichzeitig sowohl Energie zu entnehmen als auch rekuperierte Bremsenergie zu speichern. Welche Energieflüsse gleichzeitig möglich sind, zeigt die Tabelle 4.3.

Es wird angenommen, dass die Hilfsbetriebe mit Energie zu versorgen sind, solange das Fahrzeug betriebsbereit ist. Somit ist stets zumindest einer der Energieflüsse HT₁, HT₂, HB₁ oder HB₂ aktiv, ein «reiner» Traktionsmodus ist demnach nicht vorgesehen. Aus dieser Annahme sowie den zulässigen Kombinationen ergeben sich insgesamt 48 Betriebsmodi, welche in der Tabelle 4.4 zusammengefasst sind. Deren Bezeichnungen kodieren die jeweils aktiven Energieflüsse, wie es die Abbildung 4.5 veranschaulicht. Die Ziffern geben dabei Aufschluss, welcher Teil-Antriebsstrang (1 oder 2) aktiv ist; die Ziffer 3 bedeutet, dass beide

Tabelle 4.3: Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Energieflüsse

	T1	T2	B1	B2	L	HT1	HT2	HB1	HB2
T1	+	+	-	-	+	+	+	-	-
T2	+	+	-	-	-	+	+	-	-
B1	-	-	+	+	-	-	+	+	+
B2	-	-	+	+	+	+	-	+	+
L	+	-	-	+	+	+	-	-	+
HT1	+	+	-	+	+	+	+	+	+
HT2	+	+	+	-	-	+	+	+	+
HB1	-	-	+	+	-	+	+	+	+
HB2	-	-	+	+	+	+	+	+	+

+ ... zulässige Kombination, - ... unzulässige Kombination

aktiv sind. Ein nachgestelltes L kennzeichnet den sogenannten Aufladebetrieb, bei dem die von der Motor-Generator-Einheit abgegebene Leistung ganz oder teilweise zur Aufladung der Batterie genutzt wird.

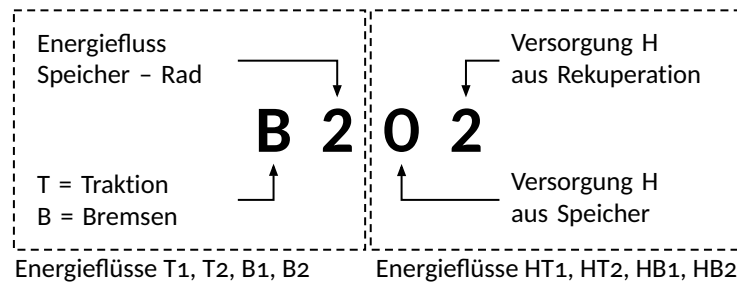


Abbildung 4.5: Bedeutung der einzelnen Positionen in der Bezeichnung der Betriebsmodi

Die Energieflussschemata einiger ausgewählter Betriebsmodi sind im Anhang A.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.4: Übersicht über die theoretisch möglichen Betriebsmodi

Nr.	Bez.	Energieflüsse								
		T1	T2	B1	B2	L	HT1	HT2	HB1	HB2
1	T110	X	-	-	-	-	X	-	-	-
2	T120	X	-	-	-	-	-	X	-	-
3	T130	X	-	-	-	-	X	X	-	-
4	T110L	X	-	-	-	X	X	-	-	-
5	T210	-	X	-	-	-	X	-	-	-
6	T220	-	X	-	-	-	-	X	-	-
7	T230	-	X	-	-	-	X	X	-	-
8	T310	X	X	-	-	-	X	-	-	-
9	T320	X	X	-	-	-	-	X	-	-

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 4.4: Übersicht über die theoretisch möglichen Betriebsmodi
(Fortsetzung)

Nr.	Bez.	Energieflüsse								
		T1	T2	B1	B2	L	HT1	HT2	HB1	HB2
10	T330	X	X	-	-	-	X	X	-	-
11	B120	-	-	X	-	-	-	X	-	-
12	B121	-	-	X	-	-	-	X	X	-
13	B122	-	-	X	-	-	-	X	-	X
14	B123	-	-	X	-	-	-	X	X	X
15	B101	-	-	X	-	-	-	-	X	-
16	B102	-	-	X	-	-	-	-	-	X
17	B103	-	-	X	-	-	-	-	X	X
18	B210	-	-	-	X	-	X	-	-	-
19	B211	-	-	-	X	-	X	-	X	-
20	B212	-	-	-	X	-	X	-	-	X
21	B213	-	-	-	X	-	X	-	X	X
22	B201	-	-	-	X	-	-	-	X	-
23	B202	-	-	-	X	-	-	-	-	X
24	B203	-	-	-	X	-	-	-	X	X
25	B210L	-	-	-	X	X	X	-	-	-
26	B212L	-	-	-	X	X	X	-	-	X
27	B202L	-	-	-	X	X	-	-	-	X
28	B301	-	-	X	X	-	-	-	X	-
29	B302	-	-	X	X	-	-	-	-	X
30	B303	-	-	X	X	-	-	-	X	X
31	B012L	-	-	-	-	X	X	-	-	X
32	B002L	-	-	-	-	X	-	-	-	X
33	B011	-	-	-	-	-	X	-	X	-
34	B012	-	-	-	-	-	X	-	-	X
35	B013	-	-	-	-	-	X	-	X	X
36	B021	-	-	-	-	-	-	X	X	-
37	B022	-	-	-	-	-	-	X	-	X
38	B023	-	-	-	-	-	-	X	X	X
39	B031	-	-	-	-	-	X	X	X	-
40	B032	-	-	-	-	-	X	X	-	X
41	B033	-	-	-	-	-	X	X	X	X
42	B001	-	-	-	-	-	-	-	X	-
43	B002	-	-	-	-	-	-	-	-	X
44	B003	-	-	-	-	-	-	-	X	X
45	B010L	-	-	-	-	X	X	-	-	-
46	B010	-	-	-	-	-	X	-	-	-
47	B020	-	-	-	-	-	-	X	-	-
48	B030	-	-	-	-	-	X	X	-	-

X ... Energiefluss aktiv, - ... Energiefluss inaktiv

Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, dass nicht alle theoretisch möglichen Betriebsmodi in das Modell implementiert werden müssen, da aufgrund der gegenüber dem allgemeinen Modell meist einfacheren Struktur der Antriebsstränge ein grösserer Anteil entfallen kann. Es werden für jede Antriebsart zuerst das Antriebsschema sowie das angepasste Energieflussschema gezeigt und die möglichen Betriebsmodi aufgeführt.

4.5 Modellierung der Antriebsstränge

4.5.1 Überblick

In den folgenden Unterabschnitten wird das generische Modell auf alle zu vergleichenden Antriebssysteme angewendet, indem jeweils die Antriebs- und Energieflussschemata abgeleitet werden. Anschliessend wird kurz beschrieben, wie die Auswahl der Betriebsmodi (also das Energiemanagement) erfolgt.

Die Schemata zeigen die technischen Subsysteme, zusammengefasst in den Untereinheiten (also den Blöcken des Modells) und zugeordnet zu den Teil-Antriebssträngen. Hierbei gilt folgender Grundsatz: Der Teil-Antriebsstrang 1 ($S_1 - W_{1.1} - W_{1.2}$) wird entweder aus einem Kraftstofftank (für Diesel, Erdgas oder Wasserstoff) oder aus einer Fahrleitung versorgt. Im Teil-Antriebsstrang 2 ($S_2 - W_{2.1} - W_{2.2}$) hingegen ist S_2 stets ein Speicher für elektrische Energie. Daraus folgt, dass der Batteriebus das einzige Antriebssystem ist, welches keinen Teil-Antriebsstrang 1 besitzt, während nicht-hybridisierte Busse nur den Teil-Antriebsstrang 1 aufweisen.

Bevor die einzelnen Schemata vorgestellt werden, soll daran erinnert werden, dass Elektromotoren im Bremsbetrieb als Generatoren arbeiten, was aus Gründen der Übersichtlichkeit in den Abbildungen aber nicht gekennzeichnet wird. Sämtliche in den Schemata verwendeten Abkürzungen sind im Abkürzungsverzeichnis aufgeführt.

In den folgenden drei Abschnitten werden die zu vergleichenden Antriebsstränge, aufsteigend nach ihrem Grad der Elektrifizierung, vorgestellt. Zudem werden im Abschnitt 4.5.5 zwei heute obsoletere Antriebssysteme erwähnt, die bedeutende Schritte in der Entwicklung elektrischer Bussysteme darstellten.

4.5.2 Nichtelektrische Antriebsstränge

Beim *Dieselbus* (Abbildung 4.6) wird die zu speichernde Energie als chemische Energie in Form von Dieseldieselkraftstoff bereitgestellt. Dieser liegt unter Normalbedingungen in flüssigem Aggregatzustand vor, sodass seine Speicherung vergleichsweise unproblematisch ist. Dessen hohe Energiedichte²⁹ führt dazu, dass problemlos die gesamte Energie für eine Tagesleistung mitgeführt werden kann.

²⁹Dieseldieselkraftstoff hat mit 11,9 kWh/kg die etwa 120-fache Energiedichte der heute üblichen Batterietechnologien (ca. 0,1 kWh/kg).

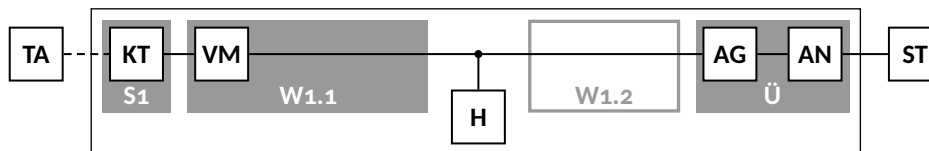


Abbildung 4.6: Antriebsschema des Diesel- und Gasbusses

Im Verbrennungsmotor erfolgt erst die Umwandlung in thermische und direkt im Anschluss in mechanische Energie. Eine Rückgewinnung von Bremsenergie ist nicht möglich, allerdings kann die Abwärme des Motors zur Beheizung des Fahrgastraums genutzt werden. Das Energieflussschema zeigt die Abbildung 4.7. Beide Schemata gelten gleichermaßen für Gasbusse.

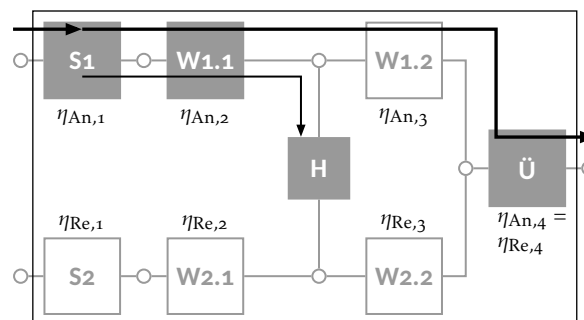


Abbildung 4.7: Energieflussschema des Diesel- und Gasbusses

Die beiden möglichen Energieflüsse lassen nur zwei Betriebsmodi zu: Solange eine Traktionskraft erforderlich ist, gilt Modus T110, ansonsten B010, da gemäss Definition die Hilfsbetriebe stets zu versorgen sind (siehe auch Tabelle A.4 auf Seite 183).

4.5.3 Teilelektrische und hybride Antriebsstränge

Der *dieselelektrische Bus* kann als Bindeglied zwischen dem Dieselbus und dem (seriellen) Dieselhybridbus angesehen werden. In der moderneren Version treibt der Dieselmotor einen Drehstromgenerator an, die dort erzeugte elektrische Energie durchläuft anschliessend eine zweimalige Frequenzwandlung und wird danach im Drehstrom-Asynchronmotor in mechanische Energie umgewandelt (Abbildungen 4.8 und 4.9). Der Dieselmotor ist also von der Antriebsachse mechanisch entkoppelt, was eine Drehzahlregelung unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit ermöglicht.

Diese Art des Antriebsstrangs kommt heute nur noch beim *Duobus* zum Einsatz, wenn fahrleitungslose Abschnitte befahren werden. Durch eine Kombination des Trolleybusses mit dem Dieselbus sollten eine grössere Flexibilität im Betriebseinsatz gewährleistet und der Bedarf an Erweiterungen des Fahrleitungsnetzes reduziert werden. Dies wurde grundsätzlich erreicht, wegen der hohen Betriebskosten war (und ist) er stets nur eine Randerscheinung geblieben. Je nach

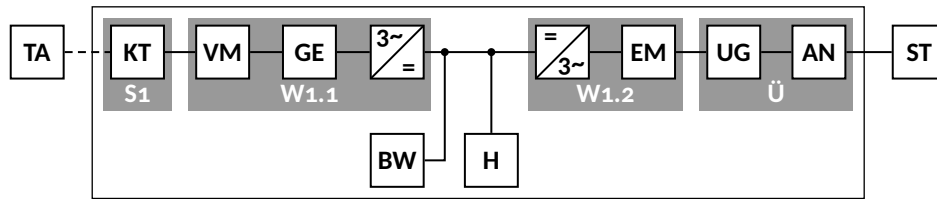


Abbildung 4.8: Antriebsschema des dieselelektrischen Busses

Betriebsart fährt er entweder als dieselelektrischer Bus oder als Trolleybus, so dass sich für den Duobus ein separates Energieflussschema erübrigt. Da in der Schweiz mit Fribourg/Freiburg einer von nur wenigen Orten weltweit liegt, wo Duobusse eingesetzt werden, soll der dieselelektrische Bus in den Systemvergleich einbezogen werden.

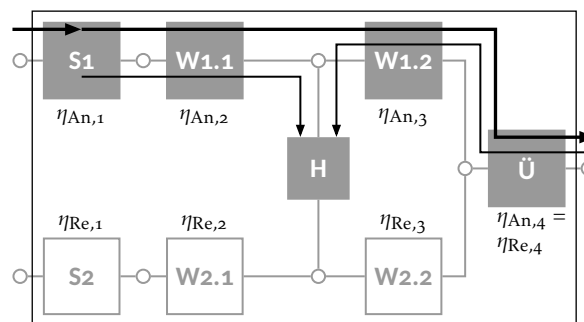
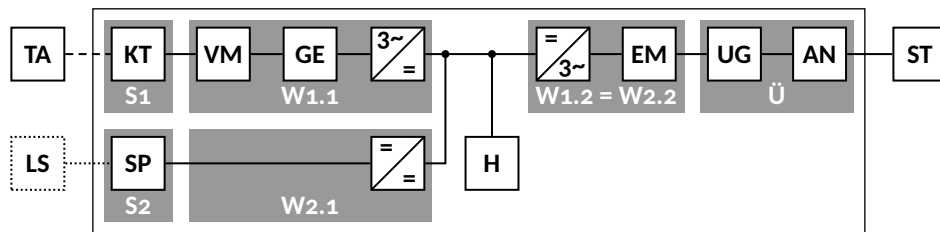


Abbildung 4.9: Energieflussschema des dieselelektrischen Busses

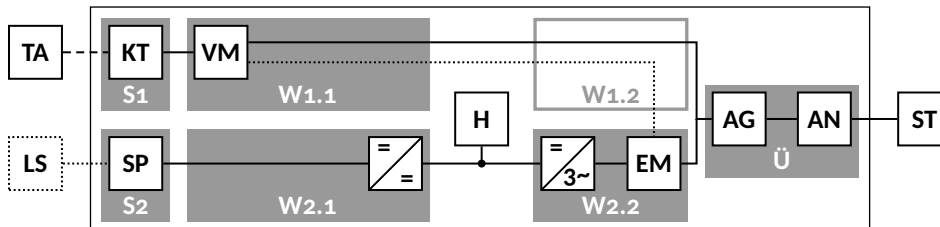
Komplexer werden die Schemata beim Hybridbus. Wie der Name schon sagt, erfolgt die Energieversorgung aus mehr als einer Energieform, üblicherweise aus chemischer und elektrischer Energie; der Antriebsstrang setzt sich somit aus zwei Teil-Antriebssträngen zusammen. Hier werden die beiden gebräuchlichsten Grundkonfigurationen betrachtet: der serielle sowie der parallele Dieselhybridbus; der Antriebsstrang des Brennstoffzellen-Hybridbusses entspricht in seinem Aufbau grundsätzlich dem des seriellen Dieselhybridbusses. Gemeinsames Merkmal ist das Vorhandensein eines Speichers für elektrische Energie.

Die Abbildung 4.10 a zeigt das Antriebsschema des *seriellen Hybridbusses*, welches im Teil-Antriebsstrang 1 mit dem des dieselelektrischen Busses übereinstimmt (vgl. Abbildung 4.8). Es kann sowohl dieselelektrisch – mit Speisung des Elektromotors nur aus dem Generator oder zusätzlich aus der Batterie – als auch rein elektrisch gefahren werden. Bei geringen Leistungsanforderungen (vor allem im Stand) ist zudem ein Aufladebetrieb möglich.

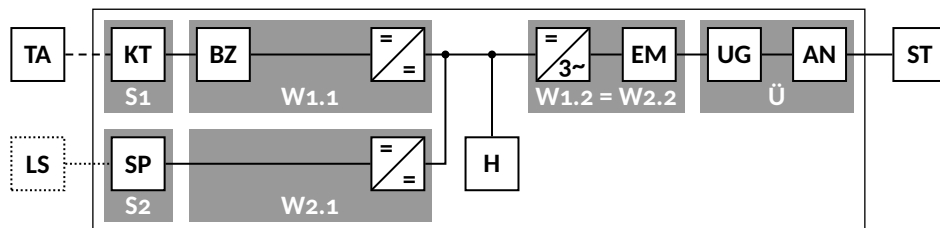
Der *Parallelhybrid* entspricht, vereinfacht gesagt, einem Dieselbus, der mit einem zusätzlichen, elektrischen Antriebsstrang ausgerüstet ist (Abbildung 4.10 b). Der Elektromotor sitzt auf der Abtriebswelle zwischen Dieselmotor und Getriebe. Damit sind beim Fahren drei Betriebsmodi möglich: reiner Dieselbetrieb, elektrisch unterstützter Dieselbetrieb und rein elektrischer Betrieb.



a. Serieller Dieselhybridbus



b. Paralleler Dieselhybridbus



c. Brennstoffzellen-Hybridbus

Abbildung 4.10: Antriebsschemata der hybriden Antriebsstränge

Bei den bislang erörterten Antriebssystemen dient als Hauptenergiewandler ein Dieselmotor. Beim *Brennstoffzellen-Hybridbus* (oft auch vereinfachend als Wasserstoffbus bezeichnet) tritt an seine Stelle das namensgebende Brennstoffzellensystem. Dieses wandelt die (in der Regel in Form von reinem Wasserstoff) bereitgestellte chemische Energie direkt in elektrische Energie (Gleichstrom) um. Nach Umformung in Drehstrom folgt der letzte Energiewandlungsschritt im Elektromotor (siehe Abbildung 4.10 c). Während die ersten Wasserstoffbusse noch nicht mit einem elektrischen Energiespeicher ausgerüstet waren, ist dies bei den heute im Einsatz stehenden Fahrzeugen inzwischen Standard, weshalb diese in Abgrenzung zu den frühen Brennstoffzellenbussen (siehe Abschnitt 4.5.5) als Brennstoffzellen-Hybridbusse zu bezeichnen sind. Die Energieflussschemata der drei Hybridbustypen sind in der Abbildung 4.11 einander gegenübergestellt.

Das Energiemanagement ermöglicht bereits beim dieselektrischen Bus eine rudimentäre Form der Rekuperation, indem beim Bremsen die Hilfsbetriebe, je nach elektrischer Bremsleistung, entweder teilweise oder vollständig aus rekuperierter Bremsenergie versorgt werden (siehe Tabelle A.4 auf Seite 183). Im letzteren Falle wird zudem angenommen, dass der Dieselmotor abgeschaltet ist (Start-Stopp-Automatik). Bei den hybriden Antriebssträngen gestaltet sich das Ener-

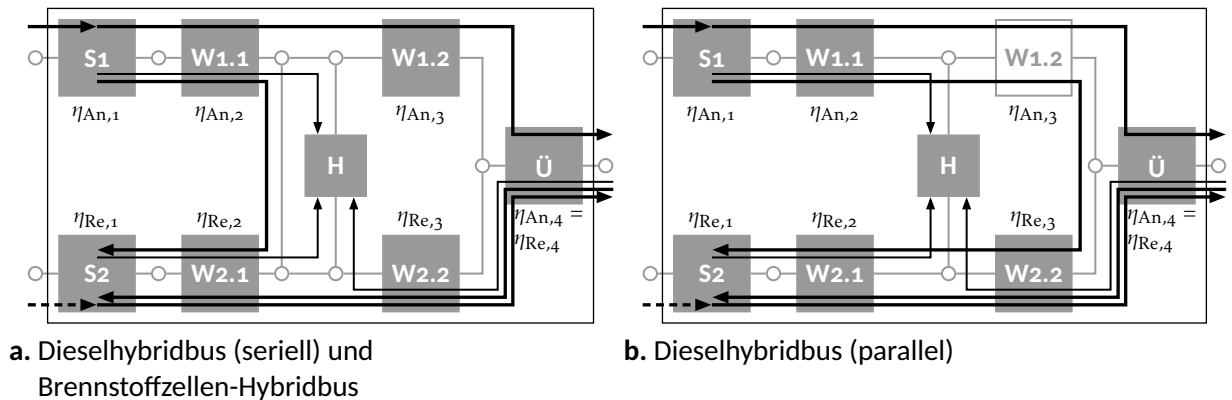


Abbildung 4.11: Energieflussschemata von Diesel- und Brennstoffzellen-Hybridbussen

giemanagement komplexer, die bestimmende Regelgröße ist der Batterieladezustand. Während bei zu hohem Ladezustand die Rekuperation eingeschränkt werden muss, so kommt es bei zu niedrigem Ladezustand zu einer Einschränkung der Traktionsleistung, da dann nur noch die Dieselmotorleistung zur Verfügung steht. Welcher Betriebsmodus gewählt wird, kann dem Anhang entnommen werden: Die Tabelle A.1 (S. 179) zeigt die Regelung für den seriellen, die Tabelle A.2 (S. 180) die für den parallelen Hybridbus. Für beide gilt, dass der Dieselmotor beim Bremsen abgeschaltet wird, sofern der Batterieladezustand dies erlaubt (also kein Aufladebetrieb nötig ist). Beim Brennstoffzellen-Hybridbus besteht die Besonderheit, dass zur Verlängerung der Lebensdauer der Brennstoffzelle ein Dauerbetrieb angenommen wird und die Leistungsschwankungen begrenzt werden sollen. Vorgabewert ist ein Bereich zwischen 20 % ($P_{BZ,min}$) und 70 % ($P_{BZ,soll}$) der Maximalleistung $P_{BZ,max}$. In diesem Sollbereich ist zudem der Wirkungsgrad am günstigsten, sodass erst bei sehr niedrigem Batterieladezustand die Maximalleistung abgerufen wird. Weitere Details können der Tabelle A.3 auf Seite 181 entnommen werden.

4.5.4 Vollelektrische Antriebsstränge

Den höchsten Grad der Elektrifizierung des Antriebsstrangs stellen diejenigen Systeme dar, bei welchen keine Energiewandlung aus chemischer Energie mehr erforderlich ist. Beim *Batteriebus* wird die elektrische Energie auf dem Fahrzeug gespeichert.³⁰ Somit ist auf dem Fahrzeug nur noch ein Wandlungsschritt erforderlich (siehe Abbildung 4.12), was diesem Antriebssystem – zumindest auf die Systemebene *Fahrzeug* bezogen – eine hohe Energieeffizienz verleiht. Das zugehörige Energieflussschema zeigt die Abbildung 4.13.

³⁰Akkumulatoren sind zwar elektrochemische Speicher, da sie aber direkt elektrische Energie aufnehmen und abgeben, werden sie im Sinne des hier zu Grunde liegenden Verständnisses nicht als Energiewandler angesehen.

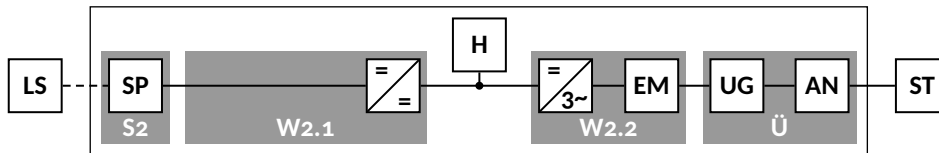


Abbildung 4.12: Antriebsschema des Batteriebus

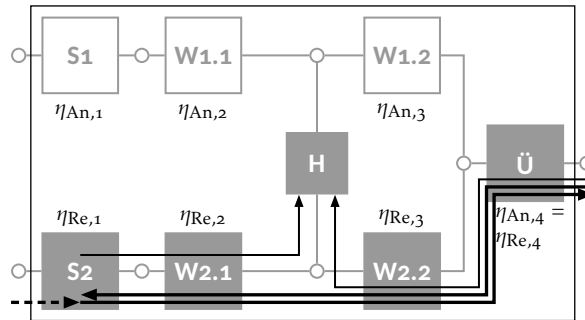


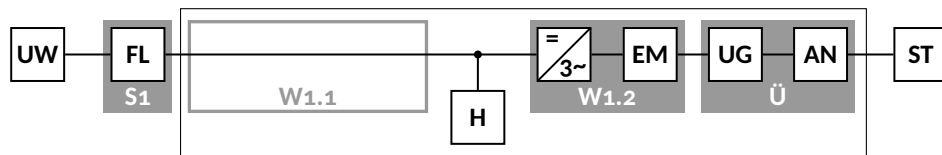
Abbildung 4.13: Energieflussschema des Batteriebus

Einen gewissen Sonderstatus unter den hier betrachteten Antriebskonfigurationen hat der *Trolleybus* inne, da bei diesem auf jegliche Energiespeicherung auf dem Fahrzeug verzichtet wird.³¹ Dies verleiht den Fahrzeugkonstrukteuren zwar einen zusätzlichen Freiheitsgrad bei der Gestaltung des Fahrgastraums, bedingt aber das Vorhandensein einer Fahrleitungsanlage zur kontinuierlichen Energieübertragung sowie einer ausreichend leistungsfähigen Energieversorgung (Unterwerke). Das Antriebsschema (Abbildung 4.14 a) liesse sich ohne Änderung auch auf Strassenbahnen anwenden, allerdings ist bei der Berechnung der niedrigeren Rollwiderstandsbeiwert zwischen Rad und Schiene zu berücksichtigen.

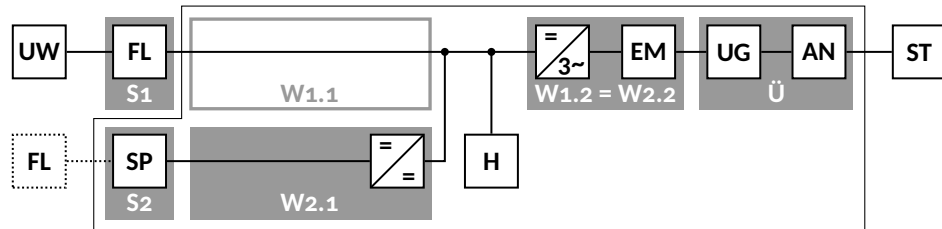
Die Fortschritte in der Batterietechnik haben dazu geführt, dass Trolleybusse heute häufiger mit einer Batterie anstelle eines Diesel-Hilfsantriebs ausgerüstet sind. Bei entsprechender Auslegung können so auch längere fahrleitungslose Abschnitte befahren werden. Solche Fahrzeuge werden als *Trolley-Hybridbusse* bezeichnet.³² Deren Antriebsschema zeigt die Abbildung 4.14 b, es gilt ebenfalls für Strassenbahnfahrzeuge, welche mit einer Traktionsbatterie ausgerüstet sind

³¹Trolleybusse, die mit einem Diesel-Hilfsantrieb ausgerüstet sind, besitzen streng genommen einen Speicher. Wie der Name schon sagt, wird dieser Antrieb wegen seiner geringen Leistung im Regelbetrieb nicht verwendet, sodass er im Antriebsschema nicht berücksichtigt wurde. Das stellt jedoch keine Einschränkung dar, da ein mit Hilfsantrieb fahrender Trolleybus, je nach Bauform des Hilfsantriebs, als Dieselbus oder als dieselelektrischer Bus angesehen werden kann.

³²Diese Bezeichnung ist etwas irreführend, da ein Trolleybus, ob nun im Fahrleitungs- oder im Batteriebetrieb, stets elektrisch fährt und somit streng genommen nicht «hybrid» genannt werden dürfte. Unter dem Begriff *Hybridbus* versteht man üblicherweise ein Fahrzeug mit einem Dieselmotor als Hauptenergiewandler. In Hammer u. a. 2017, S. 68 wird alternativ der Terminus «Batteriestützter O-Bus» eingeführt.



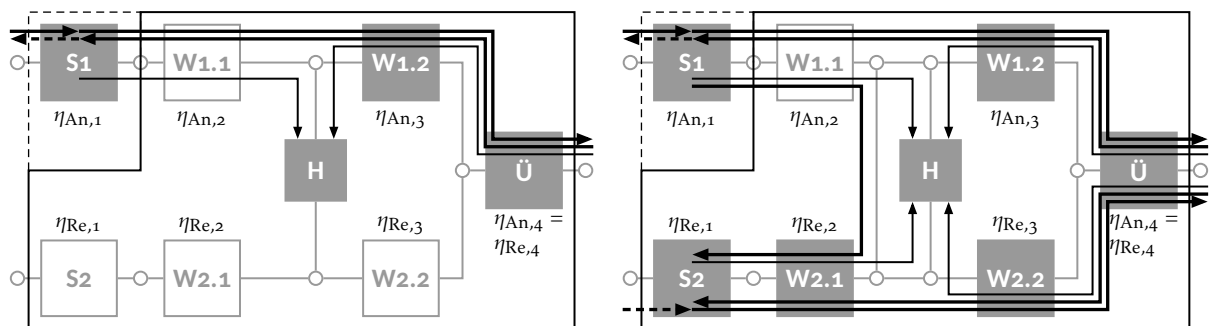
a. Trolleybus



b. Trolley-Hybridbus

Abbildung 4.14: Antriebsschemata des Trolley- und Trolley-Hybridbusses

(so beispielsweise 19 Fahrzeuge³³ der Rhein-Neckar-Verkehr GmbH). Die Energieflussschemata können der Abbildung 4.15 entnommen werden.



a. Trolleybus

b. Trolley-Hybridbus

Abbildung 4.15: Energieflussschemata des Trolley- und Trolley-Hybridbusses

Da es sich nicht um hybride Antriebsstränge handelt, ist das Energiemanagement für den Batteriebus und den Trolleybus vergleichsweise einfach, wie die Tabelle A.4 auf Seite 183 zeigt. Beim Trolleybus muss der Rekuperationsgrad beachtet werden, welcher hier mangels Simulation des speisenden Netzes als mittlerer Wert vom Nutzer vorzugeben ist; dies gilt gleichermassen für den Trolley-Hybridbus im Fahrleitungsbetrieb. Die Bremsleistung wird, wie bei den anderen rückspeisefähigen Antriebssträngen auch, zuerst zur Deckung des Leistungsbedarfs der Hilfsbetriebe herangezogen. Der allfällig verbleibende Anteil dient zum Laden der Batterie (genügt dieser Anteil nicht, wird der Rest der Soll-Ladeleistung der Fahrleitung entnommen). Sofern die Batterie bereits geladen

³³Klohr und Maroschik 2012.

oder der verbleibende Bremsleistungsanteil grösser als die gewünschte Ladeleistung ist, erfolgt, unter Berücksichtigung des Rekuperationsgrades, die Rückspeisung in die Fahrleitung. Die Bedingungen für die Wahl der Betriebsmodi können der Tabelle A.5 (S. 184) entnommen werden.

4.5.5 Obsolete Antriebsstränge

Die beiden in diesem Abschnitt kurz vorgestellten Antriebssysteme kommen heute nicht mehr zum Einsatz. Da sie aber in der Entwicklung der elektrischen Antriebssysteme wichtige Meilensteine darstellten, sollen sie hier kurz erwähnt werden.

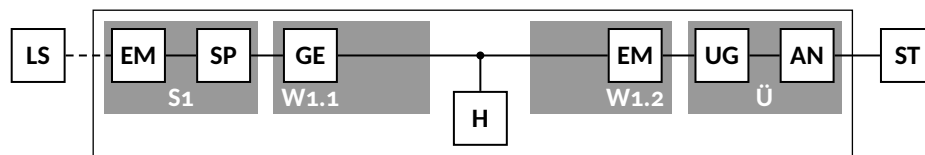


Abbildung 4.16: Antriebsschema des Gyrobusses

Eine besondere und frühe Form des vollelektrischen Busses stellte der *Gyrobuss* dar. Historisch gesehen blieb er zwar nur eine Episode, der damalige Ansatz einer Energiezufuhr (Zwischenaufladung) während des Aufenthalts an ausgewählten Haltestellen wurde aber inzwischen wiederbelebt und dürfte den Einsatz von Batteriebussen wesentlich begünstigen. Somit erscheint es angebracht, das Antriebsschema (siehe Abbildung 4.16) hier mit aufzunehmen, damit diese durchaus als Pioniertat zu bezeichnende Technik nicht vollends in Vergessenheit gerät. Die Anbindung der Hilfsbetriebe zwischen Generator und Fahrmotor kann nur vermutet werden, da dies aus den Quellen nicht hervorgeht. Der im Generator erzeugte Drehstrom ist ohne Frequenzwandlung direkt dem Fahrmotor zugeführt worden.

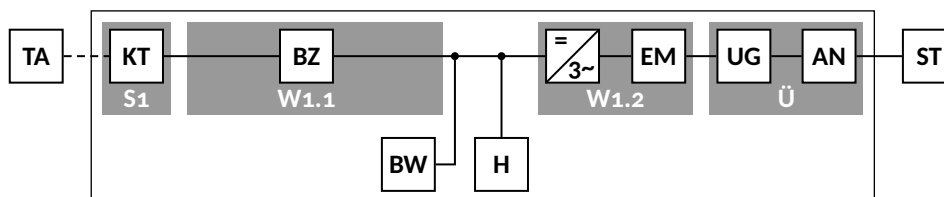


Abbildung 4.17: Antriebsschema des Brennstoffzellenbusses

Auch der *Brennstoffzellenbus* soll hier kurz erwähnt werden, denn er war der Vorläufer der heutigen Brennstoffzellen-Hybridbusse. Mit diesen Fahrzeugen wurde die mobile Anwendung der Brennstoffzelle als Lieferant elektrischer Energie erprobt. Um die Komplexität zu reduzieren, verzichtete man auf eine Batterie und nahm den höheren Wasserstoffverbrauch in Kauf. Abbildung 4.17 zeigt das Antriebsschema.

4.5.6 Zusammenfassung

Zur besseren Übersicht sollen für jedes in den Systemvergleich einbezogene Antriebssystem die jeweils möglichen Betriebsmodi angegeben werden (siehe Tabelle 4.5). Bei den im Folgenden aufgezählten Antriebssystemen ist in der technischen Realisierung W1.2 identisch mit W2.2 (siehe die Antriebs schemata in den Abbildungen 4.10 a und c sowie 4.14 b) oder W1.2 ist nicht vorhanden (siehe Abbildung 4.10 b), wodurch die jeweils aufgelisteten Betriebsmodi entfallen:

- Serieller Dieselhybridbus: B211, B213, B201, B203, B011, B013, B021, B023, B031, B033, B001, B003
- Paralleler Dieselhybridbus: zusätzlich zu den beim seriellen Hybridbus genannten entfallen B210L, B212L, B202L, B002L, B012L
- Brennstoffzellen-Hybridbus: B211, B213, B011, B013, B031, B033
- Trolley-Hybridbus: B122, B123, B102, B103, B211, B213, B201, B203, B302, B303, B012, B013, B021, B023, B032, B033, B002, B003

Tabelle 4.5: Übersicht über die theoretisch möglichen Betriebsmodi für die verschiedenen Antriebsstrangkonfigurationen

Nr.	Bez.	D, G	DE	SHy	PHy	BZHy	Batt	Tro	TroHy
1	T110	X	X	X	X	X	-	X	X
2	T120	-	-	X	X	X	-	-	X
3	T130	-	-	X	X	X	-	-	X
4	T110L	-	-	X	X	X	-	-	X
5	T210	-	-	X	X	X	-	-	X
6	T220	-	-	X	X	-	X	-	X
7	T230	-	-	X	X	X	-	-	X
8	T310	-	-	X	X	X	-	-	X
9	T320	-	-	X	X	X	-	-	X
10	T330	-	-	X	X	X	-	-	X
11	B120	-	-	-	-	-	-	-	X
12	B121	-	-	-	-	-	-	-	X
13	B122	-	-	-	-	-	-	-	o
14	B123	-	-	-	-	-	-	-	o
15	B101	-	-	-	-	-	-	X	X
16	B102	-	-	-	-	-	-	-	o
17	B103	-	-	-	-	-	-	-	o
18	B210	-	-	X	X	X	-	-	X
19	B211	-	-	o	o	o	-	-	o
20	B212	-	-	X	X	X	-	-	X
21	B213	-	-	o	o	o	-	-	o
22	B201	-	-	o	o	-	-	-	o
23	B202	-	-	X	X	-	X	-	X

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 4.5: Übersicht über die theoretisch möglichen Betriebsmodi für die verschiedenen Antriebsstrangkonfigurationen (Fortsetzung)

Nr.	Bez.	D, G	DE	SHy	PHy	BZHy	Batt	Tro	TroHy
24	B203	-	-	o	o	-	-	-	o
25	B210L	-	-	X	o	X	-	-	X
26	B212L	-	-	X	o	X	-	-	X
27	B202L	-	-	X	o	X	-	-	X
28	B301	-	-	-	-	-	-	-	X
29	B302	-	-	-	-	-	-	-	o
30	B303	-	-	-	-	-	-	-	o
31	B012L	-	-	X	o	X	-	-	X
32	B002L	-	-	X	o	X	-	-	X
33	B011	-	X	o	o	o	-	X	X
34	B012	-	-	X	X	X	-	-	o
35	B013	-	-	o	o	o	-	-	o
36	B021	-	-	o	o	-	-	-	o
37	B022	-	-	X	X	-	X	-	X
38	B023	-	-	o	o	-	-	-	o
39	B031	-	-	o	o	o	-	-	X
40	B032	-	-	X	X	X	-	-	o
41	B033	-	-	o	o	o	-	-	o
42	B001	-	X	o	o	-	-	X	X
43	B002	-	-	X	X	-	-	-	o
44	B003	-	-	o	o	-	-	-	o
45	B010L	-	-	X	X	X	-	-	X
46	B010	X	X	X	X	X	-	X	X
47	B020	-	-	X	X	-	X	-	X
48	B030	-	-	X	X	X	-	-	X

X ... Betriebsmodus möglich
o ... Betriebsmodus möglich, entfällt aber (s. Haupttext)
- ... Betriebsmodus nicht möglich

4.6 Leistungs- und Energiebedarf

4.6.1 Wirkungsgrade

Der Wirkungsgrad ist definiert als das Verhältnis von abgegebener zu zugeführter Leistung:³⁴

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} \quad (4.13)$$

³⁴Fischer 1996, S. 113.

Mittels fahrdynamischer Berechnung wird der Leistungsbedarf am Rad bestimmt, woraufhin das Energiemanagement den erforderlichen Betriebsmodus auswählt. Um nun für die einzelnen Energieflüsse des gewählten Betriebsmodus bestimmen zu können, welche Leistung z. B. der Dieselmotor oder die Batterie abgeben (Traktion) oder welche Leistung die Batterie oder die Fahrleitung aufnehmen müssen (Rekuperation), ist die Kenntnis der einzelnen Subsystem-Wirkungsgrade erforderlich, auf deren Basis die Leistung am Rad schlussendlich in die Leistung ab Speicher umgerechnet wird.³⁵ Die Leistung ab Speicher (oder Fahrleitung) wiederum ist für die Berechnung des Energiebedarfs unerlässlich. In der Tabelle 4.6 finden sich die Wirkungsgrade der Subsysteme samt Quellenangaben. Diese Wirkungsgrade sind grundsätzlich auf einen Arbeitspunkt nahe der maximalen Leistung bezogen. Wegen der vor allem im Stadt- und Agglomerationsverkehr häufigen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, die weitaus überwiegend mit der maximalen Leistung erfolgen, wird hier ein Grossteil der benötigten Energie umgesetzt. Die Teillastphasen dominieren zwar hinsichtlich ihrer Dauer, jedoch nicht hinsichtlich des Energieumsatzes, da jeweils nur eine geringe Leistung abgerufen wird.

Der Wirkungsgrad eines Dieselmotors liegt, je nach Drehzahl und gefordertem Drehmoment, zwischen etwa 36 und 46 %.³⁶ In welchen Drehzahlbereichen der Motor am häufigsten betrieben wird, ist vom Antriebsstrang abhängig. Beim Dieselbus und beim Parallelhybrid, bei denen der Dieselmotor mechanisch mit der Antriebsachse verbunden ist, muss von einem nennenswerten Anteil energetisch ungünstigerer Drehzahlbereiche ausgegangen werden, weshalb ein Wirkungsgrad von $\eta = 0,40$ angenommen wird. Fehlt jedoch diese mechanische Verbindung, bestehen grössere Freiheitsgrade bei der Regelung des Motors, was höhere Wirkungsgrade erwarten lässt. Somit werden für den dieselektrischen Bus $\eta = 0,42$ und für den seriellen Hybridbus, bei dem zusätzlich das sogenannte «Downsizing» den Betriebspunkt in wirtschaftlichere Drehzahlbereiche verschiebt, $\eta = 0,44$ angesetzt. Der Antriebsstrang des Gasbusses ist analog zum Dieselbus aufgebaut, vereinfachend wird daher als Wirkungsgrad des Erdgasmotors der gleiche Wert wie beim Dieselbus ($\eta = 0,40$) angenommen.

Ein Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems von $\eta = 0,55$ ist, trotz der in der Tabelle 4.6 angegebenen Beispiele, deren Wirkungsgrad bei 50 % liegt, als realistisch einzuschätzen, da bei technischen Systemen die Effizienz mit steigender Grösse in aller Regel zunimmt und sich die Beispiele auf kleine Strassenfahrzeuge (Moped und PW) beziehen. Die beim Bus deutlich leistungsfähigere Batterie ermöglicht einen gleichmässigeren und damit effizienteren Betrieb der Brennstoffzelle. Ein solcher gleichmässiger Betrieb trägt zudem zu einer längeren Lebensdauer des Brennstoffzellensystems bei.

³⁵Hierbei ist zu beachten, dass die Berechnung im Falle der Traktion entgegen der Richtung des Energieflusses erfolgt, da die Traktionsleistung die abgegebene Leistung ist. Es muss also durch den jeweiligen Wirkungsgrad dividiert werden, um die zugeführte Leistung zu erhalten.

³⁶Gemäss dem in Merker und Teichmann 2014, S. 259 angegebenen Beispiel (Nutzfahrzeug-Dieselmotor der Schadstoffklasse EURO V mit 375 kW bei 1800 min⁻¹).

Tabelle 4.6: Mittlere Wirkungsgrade der Subsysteme

Subsystem	Kürzel	Wirkungsgrad	Quelle
Kraftstofftank	KT	1,00	Eigene Schätzung
Wasserstoff-Druckbehälter	KT	0,99	Eigene Schätzung
Dieselmotor	VM	0,40 ... 0,44	Eigene Schätzung auf Basis von [1]
Erdgasmotor	VM	0,40	Eigene Schätzung
Brennstoffzelle	BZ	0,55	Eigene Schätzung auf Basis von [2]
Generator	GE	0,95 ^a	[3]
Elektromotor	EM	0,93	[3]
Stromrichter	3~/=, =/3~, =/=	0,98	[3, 6]
Batterie	SP	0,95	[4]
Automatikgetriebe	AG	0,93	Eigene Schätzung auf Basis von [5]
Untersetzungsgetriebe	UG	0,97	[6]
Kardanwelle	AN ^b	0,99	[3]
Portalachse		0,95	[3]
Diesel- oder Erdgastankstelle ^c	TA	1,00	Eigene Schätzung
Transformator	TF	0,98 ^d	[6]
Fahrleitung	FL	0,94	Eigene Berechnung ^e
Ladestation	LS	0,92	[7]

^a In der Quelle ist nur der Wert 0,93 für die Kombination aus Generator und Gleichrichter angegeben. Division durch 0,98 (Wirkungsgrad des Stromrichters) ergibt den Wert 0,95 für den Generator.

^b Die Wirkungsgrade für Kardanwelle und Portalachse werden unter «Antriebsachse» (AN) zusammengefasst ($\eta = 0,94$).

^c Zum Wirkungsgrad der Wasserstofftankstelle siehe Abbildung 5.1.

^d In der Quelle ist $\eta \approx 0,99$ für einen Trafo der Leistungsklasse 10 ... 40 MVA angegeben. Im Stadtverkehr sind die Leistungen aber niedriger, sodass hier ein etwas geringerer Wirkungsgrad angenommen wurde.

^e Siehe Abschnitt 4.6.2

Quellen: [1] Merker und Teichmann 2014, S. 259; [2] Nach Kurzweil 2013, S. 79 liegt der Zellenwirkungsgrad zwischen 50 und 68 %, Messwerte für BZ-Systemwirkungsgrade: 50 % für ein 2,5 kW-System (Corbo, Migliardini und Veneri 2011, S. 175) und 48 % für ein 30 kW-System (Corbo, Migliardini und Veneri 2011, S. 240); [3] Hondius 2014; [4] Müller-Hellmann 2017; [5] Gemäss Pütz 2011, S. 224, Abb. 10.21 liegt der maximale Wirkungsgrad von Automatikgetrieben zwischen 90 und 95 %; [6] Schmidt 1975, S. 21; [7] Faltenbacher, Vetter u. a. 2016, S. 52 nennen Messwerte zwischen etwa 90 (induktiv) und 94 % (konduktiv). Hier soll kein Entscheid zugunsten einer der beiden Techniken erfolgen, sodass der Mittelwert (92 %) angesetzt wird.

Tabelle 4.7: Wirkungsgrade der Antriebsstrangkonfigurationen

Antriebssystem	T.	S1		S2		VM		Wn.1		3~/=		Wn.2		Ü		Ges.
		KT	FL	SP		BZ	GE	=/=	3~/=	=/3~	EM	AG	AN	UG		
Dieselbus	1	1,00	-	-	-	0,40	-	-	-	-	-	-	-	0,93	0,94	0,350
Gasbus	1	1,00	-	-	-	0,40	-	-	-	-	-	-	-	0,93	0,94	0,350
Dieselektrischer Bus	1	1,00	-	-	-	0,42	0,95	-	0,98	0,98	0,93	0,93	0,93	0,97	0,94	0,325
Dieselhybridbus (seriell)	1	1,00	-	-	-	0,44	0,95	-	0,98	0,98	0,93	0,93	0,93	0,97	0,94	0,340
	2	-	0,95	-	-	-	-	0,98	-	-	0,98	0,93	0,93	0,97	0,94	0,774
Dieselhybridbus (parallel)	1	1,00	-	-	-	0,40	-	-	-	-	-	-	-	0,93	0,94	0,350
	2	-	0,95	-	-	-	-	0,98	-	-	0,98	0,93	0,93	0,93	0,94	0,742
Brennstoffzellen-Hybridbus	1	0,99	-	-	-	0,55	-	-	-	-	0,98	0,93	0,93	0,97	0,94	0,452
	2	-	0,95	-	-	-	-	0,98	-	-	0,98	0,93	0,93	0,97	0,94	0,774
Batteriebus	2	-	0,95	-	-	-	-	0,98	-	-	0,98	0,93	0,93	0,97	0,94	0,774
Trolleybus, Tram	1	0,94	-	-	-	-	-	-	-	-	0,98	0,93	0,93	0,97	0,94	0,781
	2	-	0,95	-	-	-	-	0,98	-	-	0,98	0,93	0,93	0,97	0,94	0,774

T. ... Teil-Antriebsstrang, - ... nicht zutreffend; die übrigen Abkürzungen sind im Abkürzungsverzeichnis aufgeführt.
Quelle: Die Zahlenwerte der Subsystem-Wirkungsgrade stammen aus der Tabelle 4.6.

Allfällige Verdampfungsverluste beim Kraftstofftank werden vernachlässigt, woraus dessen Wirkungsgrad $\eta = 1,00$ resultiert. Angesichts des hohen Betriebsdrucks der Wasserstoffbehälter sind geringfügige Leckageverluste nicht auszuschliessen, weshalb ein Wirkungsgrad von $\eta = 0,99$ angenommen wird. Der Betriebsdruck der Gasbehälter beim Gasbus ist niedriger, sodass die Verluste als vernachlässigbar angesehen werden.

Die Zuordnung der Subsystemwirkungsgrade zu den Antriebssträngen kann der Tabelle 4.7 entnommen werden. Angegeben sind auch die jeweiligen Gesamtwirkungsgrade der Teil-Antriebsstränge, Präzisierungen können bei Bedarf jederzeit vorgenommen werden. Die Wirkungsgrade gelten für die Traktion sowie, falls der Antriebsstrang dies zulässt, auch für die Rekuperation. Zu beachten ist, dass der Rekuperationswirkungsgrad allein noch keine Aussage darüber erlaubt, welcher Anteil der kinetischen Energie überhaupt rekuperierbar ist. Der Wirkungsgrad für den elektrischen Speicher kommt sowohl während des Lade- als auch des Entladevorgangs zum Tragen.

4.6.2 Exkurs: Wirkungsgrad der Trolleybusfahrleitung

Die Trolleybusfahrleitung stellt im Vergleich zu den Fahrleitungsbauförmern für schienenengebundene Verkehrssysteme eine Sonderbauart dar, da sie auch die vollständige Rückleitung des Fahrstroms übernehmen muss. In der Fachliteratur konnten keine brauchbaren Angaben zum Wirkungsgrad einer solchen Fahrleitungsanlage gefunden werden, was nicht weiter überrascht, wenn man bedenkt, dass die Verlustleistung – unabhängig von der Fahrleitungsbauart – stark vom Betrag des Stromflusses und der Entfernung des Fahrzeugs vom Speisepunkt abhängig ist. Eine Netzberechnung, die einen genauen (aber nur für das untersuchte Netz gültigen) Wert liefern würde, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden. Somit verbleibt als einzige Möglichkeit, den Wirkungsgrad mittels einer Näherungsberechnung abzuschätzen. In Systemen des strassengebundenen Stadtverkehrs wird ausschliesslich Gleichstrom angewendet, was die Berechnungen erleichtert. Zur weiteren Vereinfachung wird von dem eher ungünstigen Fall einer einseitigen Speisung mit Anordnung des Speisepunktes in der Mitte des Speiseabschnitts ausgegangen, was das Risiko einer Überschätzung des Wirkungsgrades verringert.

Das ohmsche Gesetz gibt den Spannungsabfall U über einem elektrischen Widerstand R in Abhängigkeit vom Strom I an:

$$U = R \cdot I \quad (4.14)$$

Die elektrische Leistung P eines Gleichstroms ist definiert als Produkt aus Strom und Spannung:

$$P = U \cdot I \quad (4.15)$$

Setzt man (4.14) in (4.15) ein, erhält man die am Widerstand R umgesetzte elek-

trische Leistung als

$$P = R \cdot I^2 \quad (4.16)$$

Der Widerstand R ist abhängig von der stromdurchflossenen Länge l des Fahrdrabtes, dessen Querschnitt A und dem Material gemäss der Bemessungsformel³⁷

$$R = \frac{l \cdot \rho}{A} \quad (4.17)$$

Mit ρ wird der – temperaturabhängige – spezifische elektrische Widerstand gemäss³⁸

$$\rho = \rho(\vartheta) = \rho_{20} \cdot [1 + \alpha_R \cdot (\vartheta - 20)] \quad (4.18)$$

bezeichnet, worin ρ_{20} den spezifischen Widerstand bei 20 °C, α_R den Temperaturkoeffizienten und ϑ die Temperatur des Fahrdrabtes in Grad Celsius repräsentieren. Für Elektrolytkupfer gelten die folgenden Werte:³⁹

$$\rho_{20} = 0,01777 \, \Omega \, \text{mm}^2 \, \text{m}^{-1}$$

$$\alpha_R = 0,0038 \, \text{K}^{-1}$$

Der Widerstand für einen Fahrdrabt R_{FD} ergibt sich durch Einsetzen des spezifischen Widerstands ρ gemäss Formel (4.18) in (4.17), wobei zudem die relative Abnutzung n_{Ab} (im Normalfall 0 ... 0,2) berücksichtigt wird. Man erhält

$$R_{\text{FD}} = \frac{\rho_{20} \cdot [1 + \alpha_R \cdot (\vartheta - 20)]}{(1 - n_{\text{Ab}}) \cdot A} \cdot l \quad (4.19)$$

Wie die Formel (4.16) zeigt, geht der Strom quadratisch in die Verlustleistung ein, eine Verdoppelung des Stroms vervierfacht also die Verlustleistung. Durch den Spannungsabfall aufgrund des ohmschen Widerstandes des Hinleiters liegt am Fahrzeug zudem nicht die volle Speisespannung an, weshalb für eine definierte Leistung ein höherer Strom fließen muss, was wiederum höhere Verluste zur Folge hat. Die Verlustenergie ist somit von zahlreichen Faktoren abhängig:

- Stromstärke,
- Speisespannung,
- Dauer des Leistungsbezugs,
- Entfernung vom Speisepunkt (Länge des elektrischen Leiters),
- Fahrdrabttemperatur,
- Querschnitt des Fahrdrabtes (Nennquerschnitt abzüglich Abnutzung).

³⁷Fischer 1996, S. 329.

³⁸Kießling, Puschmann und Schmieder 2014, S. 310.

³⁹Kießling, Puschmann und Schmieder 2014, S. 673.

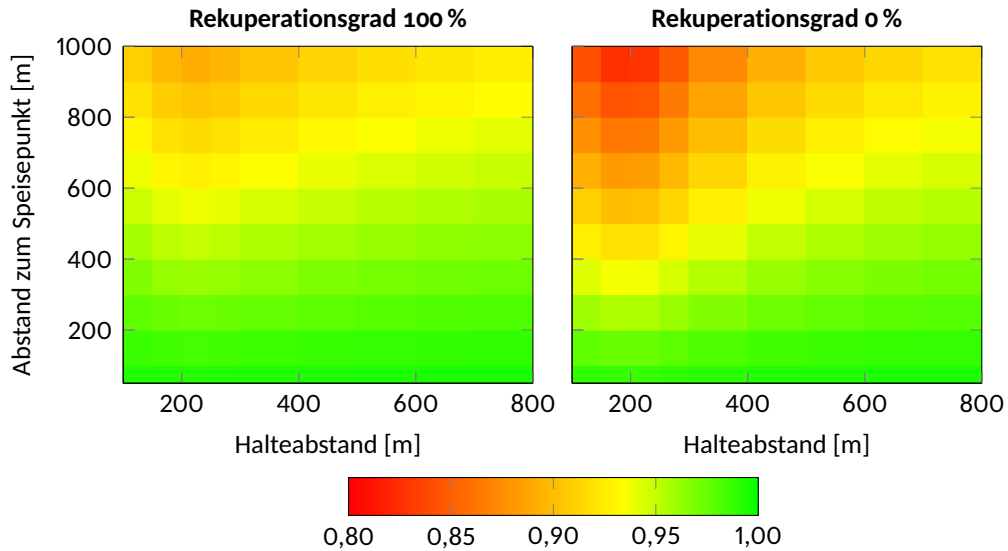


Abbildung 4.18: Abhängigkeit des Wirkungsgrades der Trolleybusfahrleitung vom Halteabstand und vom Abstand zum Speisepunkt. Annahmen: Fahrzeugesamtmasse 21,1 t (19,5 t + 1,6 t Zuladung), Motorleistung 280 kW, Höchstgeschwindigkeit 50 km/h, kein Auslauf, Fahrdrahtquerschnitt neu 100 mm², Abnutzung 0 %, Fahrdrahttemperatur 20 °C, Speisespannung 660 V (Quelle: Eigene Berechnungen)

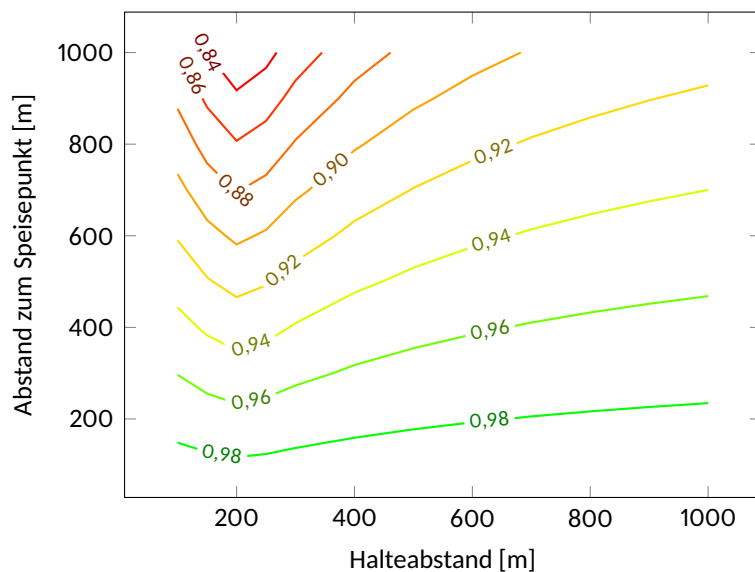


Abbildung 4.19: Wirkungsgrad der Trolleybusfahrleitung in Abhängigkeit vom Halteabstand und dem Abstand zum Speisepunkt. Annahmen: Fahrzeugesamtmasse 21,1 t (19,5 t + 1,6 t Zuladung), Motorleistung 280 kW, Höchstgeschwindigkeit 50 km/h, kein Auslauf, Fahrdrahtquerschnitt neu 100 mm², Abnutzung 10 %, Fahrdrahttemperatur 30 °C, Speisespannung 660 V, Rekuperationsgrad 33 % (Quelle: Eigene Berechnungen)

Da zwar der Leistungsbezug des Fahrzeugs ab Stromabnehmer P_{Fzg} bekannt ist, jedoch nicht die Spannung, welche schlussendlich am Fahrzeug anliegt, lässt sich der Strom nicht direkt berechnen, weshalb es einer Iterationsrechnung bedarf. Ausgangspunkt ist die Annahme, dass die volle Speisespannung am Fahrzeug anliegt. Daraufhin wird der Strom bestimmt und damit der Spannungsabfall U_{FD} im Hinleiter der Fahrleitung berechnet. Zu Beginn des zweiten Iterationsschritts wird am Fahrzeug nun die um U_{FD} verminderte Speisespannung angenommen. Die Iteration wird so lange fortgesetzt, bis $I_i - I_{i-1} \leq 0,1 \text{ A}$ gilt, also die Differenz des Stromwertes zum vorherigen Iterationsschritt nicht mehr als $0,1 \text{ A}$ beträgt. Die Verlustleistung der Fahrleitung $P_{\text{V,FL}}$ ergibt sich durch Einsetzen des Stromes sowie des Fahrdrabt-widerstands gemäss (4.19) in (4.16), wobei sowohl Hin- als auch Rückleiter (Fahrdrähte sind baugleich) zu berücksichtigen sind

$$P_{\text{V,FL}} = (R_{\text{FD,H}} + R_{\text{FD,R}}) \cdot I^2 = 2 \cdot R_{\text{FD}} \cdot I^2 \quad (4.20)$$

womit sich schliesslich der (momentane) Wirkungsgrad der Fahrleitung

$$\eta_{\text{FL}} = \frac{P_{\text{Fzg}}}{P_{\text{Fzg}} + P_{\text{V,FL}}} \quad (4.21)$$

bestimmen lässt.

Als weiterer Einflussfaktor kommt hinzu, dass die Ströme beim Rekuperieren der Bremsenergie niedriger als die Traktionsströme sind. Dies liegt, neben der relativ niedrig angesetzten Bremsverzögerung von $0,8 \text{ m/s}^2$, vor allem an der höheren Spannung (720 V ab Stromabnehmer⁴⁰ gegenüber 660 V ab Unterwerk) sowie an der Wirkungsgradkette, wodurch bei Energiebezug die Leistung am Stromabnehmer höher als die Motorleistung, bei Energieabgabe hingegen niedriger als die Motorleistung ist und damit auch die Ströme reduziert. Ein hoher Rekuperationsgrad steigert also den Wirkungsgrad, wie in der Abbildung 4.18 zu ersehen ist, welche die beiden Extremfälle (vollständige sowie keine Rekuperation) einander gegenüberstellt.

Für die Bestimmung eines mittleren Wirkungsgrades sind diese beiden Extremfälle jedoch wenig geeignet. Der Rekuperationsgrad hängt wesentlich von der Art der Speisung ab. Im Rahmen der Annahme einer einseitigen Speisung soll hier von einem Rekuperationsgrad von 33% ausgegangen werden, auch wenn man damit die Verhältnisse bei zweiseitiger Speisung tendenziell unterschätzt. Die mit diesem Wert errechneten Wirkungsgrade sind in der Tabelle 4.8 aufgeführt. Grau hinterlegt sind die für den Stadtverkehr relevanten Bereiche, deren arithmetischer Mittelwert ($0,938$) dem in der Tabelle 4.6 angegebenen Fahrdrabt-wirkungsgrad von $0,94$ zu Grunde liegt.

Auf Basis der Werte aus Tabelle 4.8 lassen sich «Höhenlinien», also Linien gleichen Wirkungsgrades, interpolieren, die in Abbildung 4.19 dargestellt sind und das Ablesen eines konkreten Wirkungsgradwertes erleichtern.

⁴⁰Dies ist die höchste Dauerspannung bei Nennspannung 600 V gemäss EN 50163 (zitiert nach Kießling, Puschmann und Schmieder 2014, S. 137).

Tabelle 4.8: Wirkungsgrad der Trolleybusfahrleitung. Der Mittelwert der grau hinterlegten Werte ergibt den verwendeten Wirkungsgrad. Es gelten die gleichen Annahmen wie in Abbildung 4.19.

AS ^a	Halteabstand [m]						
	100	150	200	250	300	400	500
50	0,993	0,992	0,991	0,992	0,993	0,994	0,994
100	0,987	0,984	0,983	0,984	0,985	0,987	0,989
200	0,973	0,969	0,966	0,968	0,971	0,975	0,977
300	0,960	0,953	0,949	0,951	0,956	0,962	0,966
400	0,946	0,937	0,931	0,935	0,941	0,950	0,955
500	0,932	0,921	0,914	0,919	0,927	0,937	0,943
600	0,919	0,906	0,897	0,902	0,912	0,924	0,932
700	0,905	0,889	0,879	0,886	0,897	0,911	0,921
800	0,891	0,873	0,861	0,869	0,881	0,898	0,909
900	0,877	0,857	0,843	0,852	0,866	0,885	0,897
1000	0,862	0,840	0,825	0,834	0,850	0,871	0,885

^a Abstand vom Speisepunkt [m]

Quelle: Eigene Berechnungen

4.6.3 Leistungsbedarf für die Traktion

Für den aktuellen Zeitschritt werden zunächst die Fahrwiderstandskräfte berechnet. Anschliessend wird der Bremsweg ermittelt und der neue Fahrzustand

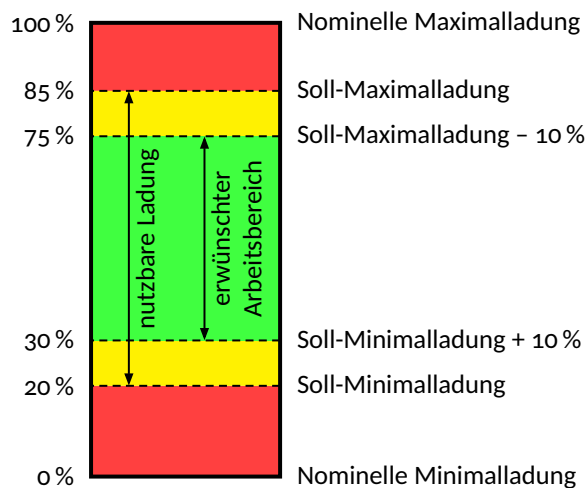


Abbildung 4.20: Nutzbarer Bereich des Batterieladestands

festgelegt (siehe Abbildung 4.1). Daraufhin werden entweder die Traktions- oder die Bremskraft am Rad ermittelt und der Betriebsmodus wird ausgewählt. Jedem Betriebsmodus entspricht genau eine Aufteilung der Leistungsflüsse analog zu den Energieflüssen T₁ und T₂ oder B₁ und B₂ gemäss Abbildung 4.4. Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade ergeben sich schliesslich die auf die Speicher S₁ und S₂ bezogenen Leistungen – entweder als Leistungsabgabe oder -aufnahme. Leistungsflüsse vom Speicher zum Rad (T₁ und T₂) haben stets ein positives Vorzeichen, während die entgegengesetzten Leistungsflüsse vom Rad zum Speicher (B₁ und B₂) stets durch ein negatives Vorzeichen gekennzeichnet sind.

Bei den hybriden Antriebssträngen ist die Aufteilung der Leistungen auf die beiden Teil-Antriebsstränge hauptsächlich vom Batterieladezustand, also dem Ladezustand des Speichers S_2 , abhängig. Um eine möglichst grosse Batterie-lebensdauer zu erzielen und um beim Rückspeisen Energieverluste durch die Strombegrenzung aufgrund einer niedrigen Klemmenspannung zu vermeiden, kann nicht das gesamte Speichervermögen ausgenutzt werden. Deshalb wird der Batterieladezustand durch das Energiemanagement innerhalb der in der Abbildung 4.20 grün und gelb gekennzeichneten Bereiche gehalten.

4.6.4 Leistungsbedarf der Hilfsbetriebe

Bei Dieselnissen stellt die Energiebereitstellung keinen unmittelbar begrenzenden Faktor dar, weshalb dem Leistungs- (und damit dem Energiebedarf) der Hilfsbetriebe keine grosse Aufmerksamkeit zuteil wurde; dies gilt gleichermaßen für Trolleybusse. Ist die Kapazität des Energiespeichers hingegen begrenzt, kann ein hoher Energiebedarf der Hilfsbetriebe die Reichweite empfindlich reduzieren, sodass dieser keinesfalls vernachlässigt werden darf.

Tabelle 4.9: Korrekturfaktoren für die Heiz- und Kühlleistung

Gefässgrösse	Midibus	Solobus	Gelenkbus	Doppelgelenkbus
Abmessungen ^a in m	9,5 x 2,4 x 2,8	12,0 x 2,5 x 3,0	18,0 x 2,5 x 3,0	24,5 x 2,5 x 3,0
Volumen in m ³	63,8	90,0	135,0	183,8
Korrekturfaktor	0,47	0,67	1,00	1,36

^a Länge x Breite x Höhe (Längen und Breiten auf Basis der Tabelle 4.1, Höhen geschätzt)

Um den Implementierungsaufwand in Grenzen zu halten, bot es sich an, die Hilfsbetriebeleistung aufzuteilen: Einem von der Differenz zwischen der Aussen-temperatur und der Soll-Innenraumtemperatur des Fahrgastraumes abhängigen Anteil für Heizung oder Klimatisierung steht ein als temperaturunabhängig angenommener, konstanter Anteil für die übrigen Hilfsbetriebe gegenüber, der vom Anwender vorzugeben ist. Die Temperaturdifferenz wird während eines Umlaufs als unveränderlich angenommen, die Modellstruktur liesse es aber zu, bei Bedarf eine Veränderung der Temperatur während des Umlaufs zu implementieren. Für die Abhängigkeit zwischen Temperaturdifferenz und Leistungsbedarf der Heizung findet sich die lineare Beziehung⁴¹

$$P_{\text{Heiz}} = 1,3882 \cdot \Delta T - 3,8776 \quad (4.22)$$

mit der mittleren Temperaturdifferenz ΔT (in Kelvin) zwischen Aussen- und Innentemperatur, wodurch man die mittlere Heizleistung in Kilowatt erhält. Diese Formel basiert auf Langzeitmessungen an einem Gelenktrolleybus (HESS Swisstrolley4) der Verkehrsbetriebe Lausanne, somit ist für andere Gefässgrössen eine

⁴¹Oelhafen 2017, S. 18.

Skalierung erforderlich. Hierzu wird das Volumen des zu untersuchenden Fahrzeuges durch das Volumen des Gelenkbusses dividiert; die Heizleistung gemäss Formel (4.22) wird anschliessend mit diesem Korrekturfaktor multipliziert (siehe Tabelle 4.9). Da die Messungen im Fahrgastbetrieb stattfanden, ist der Einfluss der Fahrgäste (durch deren Wärmeabstrahlung) inbegriffen, sodass dessen gesonderte Betrachtung entfallen kann.

Die genannten Messungen ergaben auch einen, ebenfalls linearen, Zusammenhang für den Leistungsbedarf der Klimatisierung⁴²

$$P_{\text{Kühl}} = -0,6099 \cdot \Delta T + 3,0903 \quad (4.23)$$

welcher die von der Temperaturdifferenz ΔT abhängige Kühlleistung in Kilowatt angibt. Die zuvor erwähnte Skalierung für vom Gelenkbus abweichende Gefässgrössen ist hier ebenfalls erforderlich, es gelten die Korrekturfaktoren gemäss Tabelle 4.9.

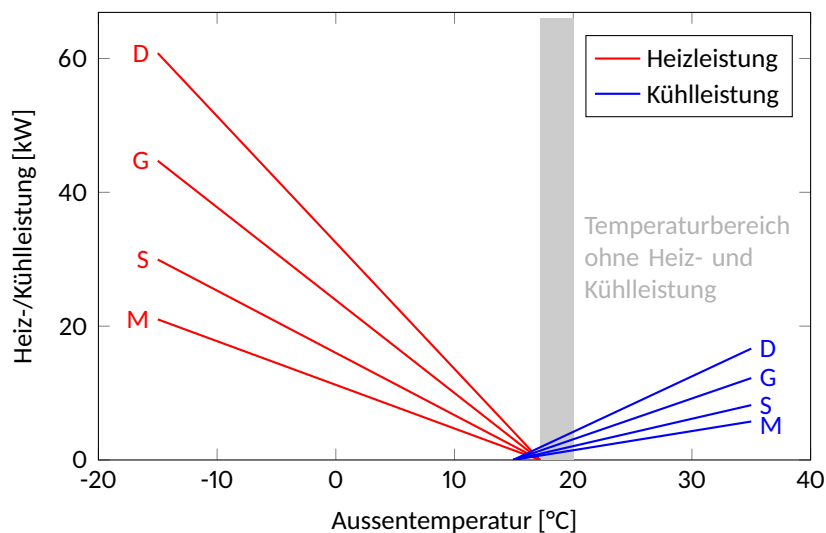


Abbildung 4.21: Erforderliche Heiz- und Kühlleistungen in Abhängigkeit von der Aussentemperatur (Quelle: Eigene Berechnung auf Basis der Formeln (4.22) und (4.23) für eine Soll-Innenraumtemperatur von 20 °C; Abkürzungen: D ... Doppelgelenk-, G ... Gelenk-, S ... Solo-, M ... Midibus)

Legt man sich auf eine Soll-Innenraumtemperatur fest, so lassen sich Heiz- und Kühlleistung in Abhängigkeit von der Aussentemperatur darstellen, wie es die Abbildung 4.21 für den Sollwert von 20 °C zeigt. Interessant ist, dass sich beide Kurven im Bereich zwischen etwa 15 und 17 °C überschneiden, was vermutlich an der Erwärmung des Fahrzeugs durch allfällige Sonneneinstrahlung liegt. Ist die Aussentemperatur aber 20 °C oder niedriger, so sollte der Erwärmung allein durch stärkere Belüftung (oder, sofern vorhanden, durch Öffnen der

⁴²Oelhafen 2017, S. 18.

Dachluken) begegnet werden können. Somit wird hier davon ausgegangen, dass die Klimaanlage erst bei Temperaturen über 20 °C benötigt wird.⁴³

Der Leistungsbedarf der Hilfsbetriebe wird schliesslich gemäss dem aktuellen Betriebsmodus auf bis zu vier verschiedene Leistungsflüsse, analog zu den Energieflüssen HT1 und HT2 sowie HB1 und HB2 gemäss der Abbildung 4.4 aufgeteilt.

4.6.5 Energiebedarf

Der Energiebedarf je Zeitschritt in Kilowattstunden ergibt sich aus der Multiplikation des Leistungswerts in Kilowatt mit dem Wert des Zeitschritts in Sekunden, dividiert durch 3600 (Umrechnung in Kilowattstunden). Es werden nicht nur der Energiebedarf ab Tank oder Batterie, sondern auch die Verluste in den einzelnen Blöcken, die Rekuperation und der Hilfsbetriebeenergiebedarf gesondert berechnet und ausgewiesen (siehe Abschnitt 4.2.3). Mittels der Umrechnungsfaktoren aus der Tabelle 1.2 (siehe Seite 13) wird der Bezug zu den stofflichen Energieträgern hergestellt.

⁴³Ausserdem kann hinterfragt werden, ob beim Klimatisieren überhaupt eine Solltemperatur von 20 °C angestrebt werden sollte.

5

Vergleichsmethodik

5.1 Umfang

Nachdem im 4. Kapitel Grundlagen, Herleitung und Aufbau des Berechnungsmodells zur Bestimmung des Energiebedarfs ab Tank/Fahrleitung beschrieben wurden, sollen in diesem Kapitel die darauf aufbauenden Berechnungen näher erläutert werden.

Unter Vergleichsmethodik wird hier die Gesamtheit der Berechnungsschritte verstanden, welche die für den Vergleich der verschiedenen Antriebssysteme benötigten Ergebnisse liefern. Das Berechnungsmodell bildet dabei den Kern der Vergleichsmethodik. Weiterhin gehören hierzu die Bestimmung des Energiebedarfs ab Primärenergie, wofür die Bereitstellungswirkungsgrade benötigt werden, sowie die Abschätzung der während des Betriebes und während der Energiebereitstellung emittierten Mengen von Klimagasen und Schadstoffen. Letzteres erfordert die Kenntnis von auf den Energiebedarf bezogenen spezifischen Emissionsfaktoren. Darüber hinaus wird der Versuch einer Quantifizierung der grauen Energie unternommen.

5.2 Primärenergiebedarf

5.2.1 Bereitstellungspfade und deren Wirkungsgrade

Für die Berechnung des Primärenergiebedarfs müssen, um alle im Abschnitt 4.1.3 aufgelisteten Antriebssysteme miteinander vergleichen zu können, drei Hauptpfade berücksichtigt werden:

1. Chemische Energieträger aus fossiler Primärenergie:
 - (a) Dieselkraftstoff,
 - (b) Erdgas (CNG);
2. Elektrische Energie, erzeugt zu unterschiedlichen Anteilen aus
 - (a) Kohle,

- (b) Erdgas,
 - (c) Kernenergie (Energieträger Uranerz) sowie
 - (d) Erneuerbaren Energien (Wasser, Wind, Photovoltaik, Biomasse);
3. Wasserstoff (elektrolytisch aus Wasser mit Strom aus erneuerbarer Energie).

Erneuerbare Energien werden in dieser Betrachtung als gleichwertig angesehen, da aufgrund ihrer theoretisch unbegrenzten Verfügbarkeit der Wirkungsgrad der Stromerzeugung vernachlässigt werden kann (dieser wird also einheitlich mit 1 angesetzt). Somit werden nur die Übertragungsverluste berücksichtigt.

Eine Wasserstoffgewinnung aus Erdgas oder mit aus fossiler Primärenergie erzeugter Elektrizität würde die ansonsten nahezu emissionsfreie Nutzung des Wasserstoffs in den Brennstoffzellen mit CO₂-Emissionen aus der Bereitstellung belasten. Ein wesentliches Ziel der Elektrifizierung des Antriebsstrangs ist aber gerade die Emissionsreduktion, sodass diese beiden Pfade hier nicht berücksichtigt werden.

Die Wirkungsgrade der Bereitstellungs-Energiepfade lassen sich wegen der Vielfalt der Prozesse nur schwierig ermitteln. Im Jahre 2014 wurde eine von der Europäischen Kommission beauftragte Studie¹ veröffentlicht, welche die «Well-to-tank»-Energieverluste verschiedener Energieträger vergleicht. Diesem Bericht konnten Zahlenwerte für die drei zuvor genannten Hauptpfade entnommen werden. Die zugrundeliegenden Verarbeitungsschritte sowie deren Wirkungsgrade sind in der Abbildung 5.1 zusammengefasst, die dort verwendeten Abkürzungen sind im Abkürzungsverzeichnis enthalten. Für die Herleitung der Zahlenwerte wird auf den Anhang A.5 verwiesen.

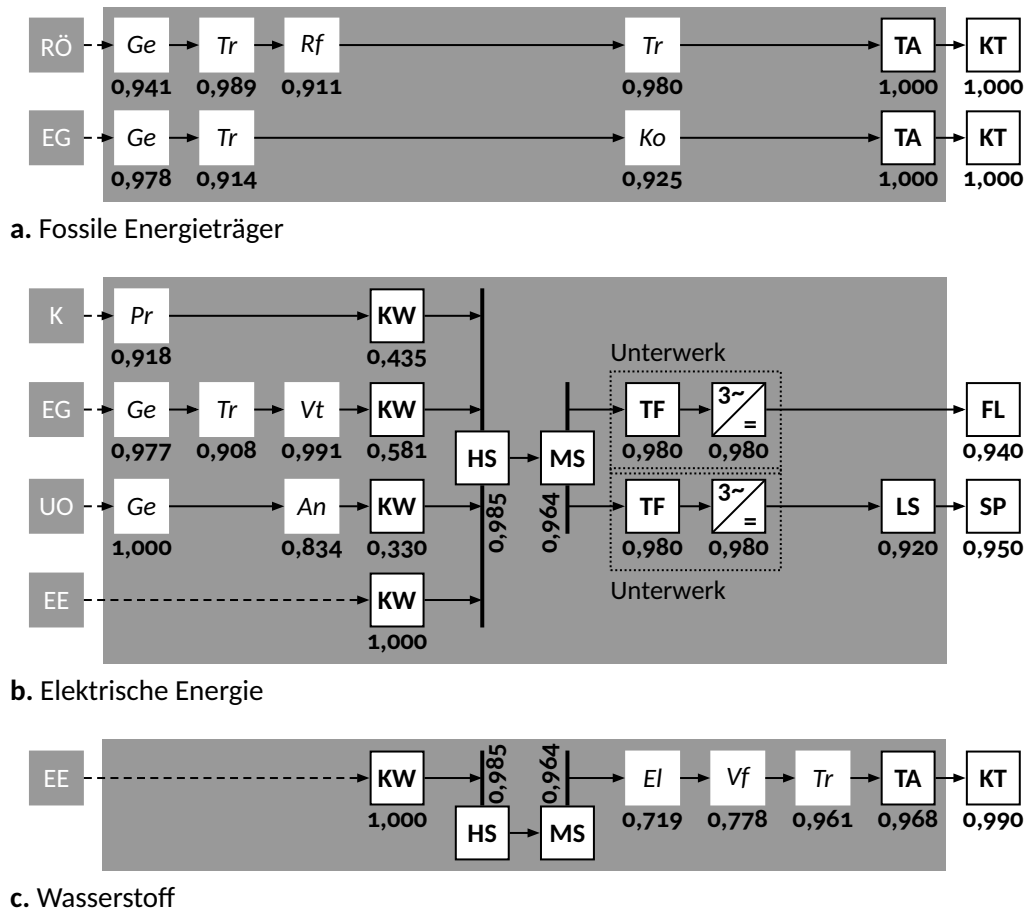
5.2.2 Elektrizitätserzeugung

Im zentralen Energieversorgungsnetz wird die Energie von einer Vielzahl unterschiedlicher Kraftwerke geliefert. Um den Gesamtwirkungsgrad der Elektrizitätserzeugung bestimmen zu können, werden neben den Wirkungsgraden der einzelnen Pfade auch die relativen Anteile dieser Erzeugungspfade, der sogenannte Strommix, benötigt. Dieser variiert stark von Land zu Land und wird zudem erheblich durch die Anteile importierter elektrischer Energie beeinflusst. Vereinfachend wird hier nur die Stromerzeugung im Inland berücksichtigt; um Vergleiche zu ermöglichen, werden ausser der Schweiz auch Deutschland und Österreich mit einbezogen. Die Aufschlüsselung auf die verschiedenen Primärenergiequellen zeigt die Tabelle 5.1. Natürlich präsentieren sich die Angaben in den verschiedenen Statistiken nicht in einer einheitlichen Form, sodass folgende Anpassungen nötig waren:

- Schweiz: In der Elektrizitätsbilanz² findet sich keine explizite Angabe zur Stromerzeugung aus Kohle, es sind dort 4,376 TWh aus «konventionell-

¹Edwards u. a. 2014.

²BFE 2016, S. 8.



Legende: EE Primärenergie Ge Prozess KW Subsystem

Abbildung 5.1: Energieflussschemata der Energiebereitstellung inkl. der Wirkungsgrade der einzelnen Verarbeitungsschritte. Die Werte wurden Edwards u. a. 2014 und der Tabelle 4.6 entnommen (Herleitung der Wirkungsgrade siehe Anhang A.5). Die Gesamtwirkungsgrade finden sich in der Tabelle 5.2.

Tabelle 5.1: Bruttostromerzeugung im Inland in TWh

Primärenergie	Schweiz 2015	Deutschland 2015	Österreich 2014
Gesamt	63,6	646,5	61,6
davon fossil/nuklear	23,6	459,1	11,7
Braunkohle	0,0	154,5	0,0
Steinkohle	1,5	117,7	4,9
Kernenergie	22,1	91,8	0,0
Erdgas	0,0	61,7	5,4
Mineralölprodukte	0,0	6,2	0,6
übrige Energieträger	0,0	27,2	0,7
davon erneuerbar	39,9	187,4	49,9
Photovoltaik	1,1	38,7	4,2
Windkraft (an Land)	0,1	70,9	0,4
Windkraft (auf See)	0,0	8,3	0,0
Wasserkraft	37,2	19,0	41,1
Biomasse (fest)	0,2	14,1	3,2
Biogas	0,2	30,5	1,0
übrige Erneuerbare	1,1	5,9	0,0
Quellen:	[1]	[2]	[3]

Quellen: [1] BFE 2016, S. 8 und Kaufmann 2016, S. 60;

[2] AG Energiebilanzen e.V. 2016 und Memmler u. a. 2014, S. 54

und 58; [3] Statistik Austria 2016, S. 7 und E-Control 2015, S. 19

thermischen Kraftwerken und anderen» angegeben. Da es unwahrscheinlich ist, dass die Schweiz Braunkohle zur Stromerzeugung importiert, wird dieser Wert, abzüglich von 2,831 TWh (Summe aus 1,115 TWh für den erneuerbaren Anteil aus thermischen Kraftwerken sowie 1,716 TWh für die übrigen Erneuerbaren³) als Erzeugung aus Steinkohle interpretiert.

- Deutschland: Für die Stromerzeugung aus Biomasse liegt für 2015 nur ein Summenwert⁴ vor. Für die Emissionsberechnung werden jedoch die Anteile für Biomasse (fest) und Biogas benötigt (der Anteil flüssiger Biomasse an der Stromerzeugung ist vernachlässigbar). Hier wird die Aufteilung für das Jahr 2013 herangezogen⁵ (31,7 % feste Biomasse und 68,3 % Biogas) und auch für das Jahr 2015 als gültig angenommen, wodurch sich die in der Tabelle aufgeführten Werte ergeben.

Aus den absoluten Werten in Tabelle 5.1 lassen sich die prozentualen Anteile ableiten, welche sowohl bei der Bestimmung der Gesamtwirkungsgrade der Bereitstellung als auch für die Abschätzung der dabei verursachten Emissionen benötigt werden.

³Kaufmann 2016, S. 60, Tabelle B.

⁴44,6 TWh gemäss AG Energiebilanzen e.V. 2016.

⁵Memmler u. a. 2014, S. 54 und 58.

5.2.3 Gesamtwirkungsgrade der Energiebereitstellung

Aus den Wirkungsgraden der Abbildung 5.1 sowie den Anteilen der Bereitstellungspfade in der Elektrizitätserzeugung gemäss Tabelle 5.1 können die Gesamtwirkungsgrade der Energiebereitstellung berechnet werden (siehe Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Gesamtwirkungsgrade der Energiebereitstellung

Energie(träger)	Primärenergie	Wirkungsgrad	Anteil an Erzeugung ^a		
			CH	DE	AT
Dieselmotorkraftstoff	Erdöl	0,830			
Erdgas (CNG)	Erdgas	0,827			
Wasserstoff	Erneuerbare	0,494			
Elektrische Energie (ab Unterwerk)	Kohle	0,364	2,4 %	42,1 %	8,0 %
	Erdgas	0,469	0,0 %	9,5 %	8,8 %
	Uranerz	0,251	34,7 %	14,2 %	0,0 %
	Erneuerbare	0,912	62,8 %	29,0 %	81,1 %
<i>Gesamtwirkungsgrade der Stromerzeugung^b</i>			0,669	0,498	0,810

^a Bruttostromerzeugung im Inland in der Schweiz (CH), in Deutschland (DE) und in Österreich (AT)

^b Von Primärenergie bis Sammelschiene Unterwerk

Basis: Wirkungsgrade gemäss Abbildung 5.1 sowie die Werte aus der Tabelle 5.1

Der Primärenergiebedarf ergibt sich durch Division des Energiebedarfs ab Tank oder ab Batterie durch den Wirkungsgrad des entsprechenden Bereitstellungspfades.

5.3 Indirekte oder «graue» Energie

5.3.1 Anteil am Gesamtenergiebedarf

Wie bereits im Abschnitt 3.3 erwähnt, hat die indirekte oder graue Energie einen wesentlichen Anteil am systemweiten Energiebedarf. Die Abbildung 5.2 zeigt, dass beispielsweise in Schweden, betrachtet man den Lebenszyklus des gesamten Verkehrssystems «Strasse», 45 % des Energieverbrauchs der grauen Energie zuzurechnen sind; im Schienenverkehrssystem, dessen Infrastruktur aufwändiger als die des Strassensystems ist, sind es sogar 64 %.⁶ Diese Werte lassen sich zwar kaum direkt auf die Schweiz übertragen. So kommt einerseits der Betriebsenergie wegen des hierzulande dichteren Verkehrs ein grösseres Gewicht zu. Andererseits ist davon auszugehen, dass auch die Zahl der Kunstbauten im Schweizer Verkehrsnetz grösser als in Schweden ist. Immerhin vermitteln die Zahlen aber einen Eindruck hinsichtlich der Grössenordnungen der einzelnen Energieanteile.

⁶Jonsson 2005, S. 10.

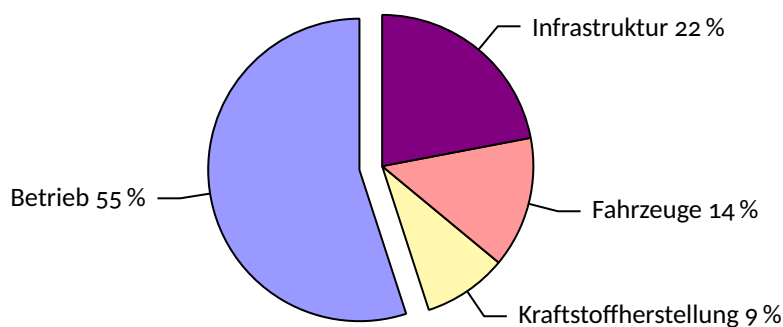


Abbildung 5.2: Energie im Strassenverkehrssystem Schwedens (nach Jonsson 2005, S. 10)

Im Folgenden soll der Versuch unternommen werden, die Anteile der Fahrzeuge und der busspezifischen Infrastruktur im Hinblick auf den Vergleich von Bus-Antriebssystemen zu quantifizieren, die Kraftstoffherstellung ist hier Teil des Bereitstellungswirkungsgrades und wurde bereits im Abschnitt 5.2.1 betrachtet.

5.3.2 Fahrzeuge

Der Anteil der Fahrzeuge setzt sich aus den Energieaufwendungen für Herstellung, Wartung/Instandhaltung sowie Verschrottung zusammen.

Die Angaben zum Energiebedarf für die *Herstellung* weisen eine starke Streuung auf, wie die in der Tabelle 5.3 zusammengestellten Zahlen zeigen. Da es sich bei allen drei zitierten Quellen um Sekundärliteratur handelt, ist zudem jeweils das Erstveröffentlichungsjahr des angegebenen Wertes angegeben. Die Wahl eines Referenzwertes ist schwierig, da, abgesehen von den in der Tabelle angegebenen Werten, keine weiteren Randbedingungen bekannt sind. Insbesondere erlauben die Daten auch keine Differenzierung nach Antriebssystemen. Gerade der höhere Anteil an Kupfer in den (teil)elektrischen Fahrzeugen liesse zwar einen höheren Energiebedarf erwarten, während inzwischen erreichte Effizienzgewinne – man beachte das Alter mancher Werte – diesen Mehrbedarf an anderer Stelle kompensieren könnten. Es erscheint angebracht, einen nicht zu niedrigen Wert anzunehmen, sodass hier ein Energiebedarf von 130 GJ/t zu Grunde gelegt wird. Für die vier generischen Fahrzeuge gemäss Tabelle 4.1 ergeben sich somit die in der Tabelle 5.3 unter «Eigene Schätzung» aufgeführten Werte.

Ähnlich schwierig gestaltet sich die Abschätzung des Energiebedarfs für *Wartung und Instandhaltung*. Die wenigen gefundenen Werte sind in der Tabelle 5.4 zusammengefasst. Man erkennt, dass sie noch stärker streuen als die Angaben zur Herstellungsenergie. Es fällt auf, dass in der Quelle [2] sämtliche Werte⁷ deutlich grösser als die Werte aus den anderen beiden Studien sind. In derselben Quelle sind ausserdem Energiebedarfswerte für die Wartung und Instandhaltung von LKW aufgeführt, welche zwischen 0,78 und 0,88 MJ/Fzkm, also um etwa

⁷Es handelt sich um die Zahlen aus Tabelle B22 in Jonsson 2005, S. 91.

60 bis 75 % unter den Angaben für Busse, liegen.⁸ Eine überschlägige Berechnung verstärkt die Zweifel an der Korrektheit der Zahlen: Beispielsweise liegt der Primärenergiebedarf (Traktion, ohne Heizung) von Batterie-Solobussen bei etwa 7 MJ/Fzkm (Schweizer Erzeugungsstrommix). Dass der Energiebedarf für den Fahrzeugunterhalt fast der Hälfte des Traktionsenergiebedarfs entsprechen soll, erscheint wenig plausibel. Mangels weiterer Vergleichswerte soll hier von 1 MJ/Fzkm ausgegangen werden.

Tabelle 5.3: Energiebedarf für die Herstellung der Fahrzeuge

Fahrzeugtyp	Leermasse in t	Energie ^a		zitiert nach	Wert erst- veröffentlicht
		in GJ	in GJ/t		
<i>Veröffentlichte Werte</i>					
Regionalbus	10,6	123	11,6	[1]	1991
Bus	10,9	468	42,9	[3]	2006
Bus	14,0	818	58,4	[3]	2005
Stadtbus	8,5	1080	127,1	[2]	1975
Stadtbus	9,1	1080	118,7	[2]	1975
Linienbus	8,8	1135	129,0	[2]	1978
Stadtbus	9,7	1481	152,7	[2]	1978
Bus	11,8	1572	133,2	[3]	2011
Expressbus	11,8	1800	152,5	[2]	1978
Bus	11,3	2000	177,0	[3]	2011
<i>Eigene Schätzung für die generischen Fahrzeuge</i>					
Midibus	11	1430	130		
Solobus	12	1560	130		
Gelenkbus	18	2340	130		
Doppelgelenkbus	23	2990	130		

^a Energiebedarf für die Herstellung eines Fahrzeugs

Quellen: [1] Maibach, Peter und Seiler 1999, S. 131; [2] Jonsson 2005, S. 88 f.; [3] Simonsen 2012, S. 6

Im Vergleich zum Energieaufwand für die Herstellung (und angesichts der Streuung der Werte) kann derjenige für die *Verschrottung* vernachlässigt werden: Eine nahezu vollständige Wiedergewinnung des Stahls vorausgesetzt, werde hierbei sogar Energie «zurückgewonnen», womit gemeint ist, dass für die Eisenrückgewinnung weniger Energie als für die Neugewinnung aus Eisenerz benötigt wird. Für die Verschrottung eines durchschnittlichen LKW könne ein Energierückgewinn von 66 GJ angenommen werden.⁹ Werte für Busse fehlen leider, sie dürften aber eine vergleichbare Grössenordnung aufweisen.

⁸Jonsson 2005, S. 92, eigene Umrechnung; Werte gelten für LKW zwischen 13 und 23 t Gesamtgewicht.

⁹Jonsson 2005, S. 32.

Tabelle 5.4: Energiebedarf für Fahrzeugwartung und -instandhaltung

Fahrzeug	Laufleistung in km	Lebensdauer in Jahren	Energie in MJ/Fzkm	zitiert nach	Wert erst- veröffentlicht
Regionalbus	540'000	12	0,120	[1]	1993
Bus	1'000'000	18	0,220	[3]	2006
Bus	811'000	12	0,333	[3]	2008
Bus	805'000	12	1,260	[3]	2011
Expressbus	840'000	15	1,929	[2]	1992
Regionalbus	425'000	15	2,178	[2]	1992
Stadtbus	670'000	15	2,396	[2]	1992
Expressbus	750'000	15	3,040	[2]	1979
Linienbus	965'600	15	3,138	[2]	1978
Expressbus	1'900'000	15	3,363	[2]	1978
Stadtbus	700'000	15	3,600	[2]	1979
Stadtbus	965'600	15	3,728	[2]	1978

Quellen: [1] Maibach, Peter und Seiler 1999, S. 134; [2] Jonsson 2005, S. 91;
[3] Simonsen 2012, S. 6

5.3.3 Infrastruktur

Die Quantifizierung der grauen Energie der Infrastruktur gestaltet sich keineswegs einfacher als die der Fahrzeuge. In den im vorigen Abschnitt zitierten Quellen finden sich zwar auch allgemeine Werte für z. B. Strassen- oder Brückenbau, auf deren Berücksichtigung im Rahmen einer Vergleichsbetrachtung aber verzichtet werden kann, da diese Infrastrukturen von Fahrzeugen aller Antriebssysteme gleichermaßen genutzt werden – und in den weitaus meisten Fällen zudem nicht speziell für Busse gebaut wurden. Relevant sind hier aber diejenigen Infrastrukturen, die nur für einen Teil der zu vergleichenden Antriebssysteme benötigt werden, wie beispielsweise Fahrleitungen oder Ladestationen. Diese müssten dann allein dem Energiebedarf der betroffenen Systeme zugeordnet werden. Leider fanden sich keine passenden Werte, sodass hier stattdessen beispielhaft eine (grobe) Abschätzung des Energiebedarfs für Herstellung und Errichtung einer Trolleybus-Energieversorgung versucht werden soll.

Die aus dem Mittelspannungsnetz in Form von Drehstrom bezogene elektrische Energie wird in Gleichrichterunterwerken in Gleichstrom umgeformt und mittels Fahrleitungen zu den Fahrzeugen übertragen. Das Unterwerk besteht aus den Komponenten Gebäude, Transformator und Kabelanlagen samt Gleichrichter, die Fahrleitung aus den Masten, den Fahrdrähten sowie Quertragseilen und Querverbindern; Weichen und Kreuzungen werden vernachlässigt. Es soll hier der – wegen des Materialaufwands hinsichtlich des Energiebedarfs für die Herstellung ungünstige – Fall einer ausschliesslich an Masten angebrachten Fahrleitung betrachtet werden. Die Kennwerte der hauptsächlich verwendeten Rohmaterialien zeigt die Tabelle 5.5. Mit Hilfe dieser Werte sowie einiger Annahmen

Tabelle 5.5: Energiebedarf für die Bereitstellung von 1 t Rohmaterial

Rohmaterial	Dichte in g/cm ³		Energie in GJ/t	
	Wert	Quelle	Wert	Quelle
Kupfer	8,9	[1], S. 1028	60	[2]
Aluminium	2,7	[1], S. 1028	177	[3]
Stahlblech	7,8	[1], S. 1016	25	[4]
Beton	2,4 ^a	[1], S. 988	1	[5]
Silizium			882	[6]

^a In [1] ist ein Bereich von 2200 ... 2500 kg/m³ angegeben, gewählt wurden hier 2400 kg/m³.

Quellen: [1] Zilch u. a. 2012; [2] UBA 2017a; [3] UBA 2017b; [4] UBA 2017c; [5] UBA 2017d; [6] UBA 2017e

wurde der Energiebedarf abgeschätzt, die Tabelle 5.6 fasst den Rechenweg und die Ergebnisse zusammen. Da die Linienlängen differieren und die Lebensdauer der Infrastruktur deutlich grösser als die der Fahrzeuge ist, bot es sich an, den Energiewert als spezifischen Wert je Kilometer und Jahr anzugeben.

5.3.4 Fazit

Die Werte der grauen Energie allein sind wenig anschaulich. Dies ändert sich erst durch ihre Verwendung als Vergleichsbasis. Interessant ist insbesondere das Verhältnis der grauen Energie zur Betriebsenergie, also derjenigen Energie, welche während eines Betriebsjahres für den «eigentlichen» Betrieb, also das Fahren der planmässigen Kurse, aufgewendet wird.

Der Primärenergiebedarf für ein Betriebsjahr als Eingangsgrösse für einen solchen Vergleich findet sich in der Tabelle 5.7, welcher mit dem im 4. Kapitel vorgestellten Berechnungsmodell auf Basis realer Sollfahr- und Haltezeiten sowie Fahrgastzählwerten berechnet wurde. Für die Trolleybusse wurde der Schweizer Erzeugungs-Strommix gemäss Tabelle 5.1 angesetzt.

Führt man nun alle Werte zusammen, so ergibt sich das in der Tabelle 5.8 ersichtliche Bild. Den fahrzeugspezifischen Wert für die Erstellung der Infrastruktur ermittelt man folgendermassen: 19 GJ/(km · a) aus Tabelle 5.6 multipliziert mit der Streckenlänge des Zürcher Trolleybusnetzes¹⁰ von 59,1 km liefert 1123 GJ/a; dividiert man diesen nun durch 64 Fahrzeuge (gemäss Tabelle 5.7),

¹⁰Auf Basis der Haltestellenabstände (entnommen aus Stadt Zürich 2016) ergibt sich die Linielänge der Trolleybuslinien zu 53,8 km (Mittelwert der Linienlängen beider Fahrtrichtungen). Abzüglich der doppelt gezählten (da von zwei Linien genutzten) Abschnitte Bahnhof Wipkingen–Rosengartenstrasse (Linien 33 und 46) sowie Rosengartenstrasse–Albisriederplatz (Linien 33 und 72) mit einer Gesamtlänge von 2,7 km erhält man 51,1 km Streckenlänge. Hinzu kommen 6,1 km Dienstverbindungen und 1,9 km Wendeschleifen (Kamm 2007, S. 65), was zu einer Gesamtstreckenlänge von 59,1 km führt.

Tabelle 5.6: Abschätzung der grauen Energie der Infrastruktur einer Trolleybus-Energieversorgung**1 km Fahrleitung (2 Fahrspuren)**

Längsspannweite:	40 m				
Mastabstand in Querrichtung:	10 m				
Mittensabstand der Fahrleitungen:	6 m				
Fahrdrahtquerschnitt:	100 mm ²				
Komponente	Material	Anzahl je km	Masse in kg/Stk.	Masse in t/km	Energie in GJ/km
Fahrdraht	Kupfer	4	890,0	3,56	214
Querverbinder	Kupfer	8	5,3	0,04	3
Mast	Stahl	50	200,0	10,00	250
Quertragseil	Stahl	25	7,8	0,20	5
Summe				13,80	471

1 Gleichrichterunterwerk

Breite x Tiefe x Höhe:	3,0 x 2,0 x 2,5 m			
Dicke der Bodenplatte:	0,3 m			
Wandstärke (auch Dach):	0,2 m			
Anteil Armierungsstahl:	100 kg/m ³			
Komponente	Material	Benötigte Menge	Masse in t	Energie in GJ
Gebäude	Beton	9 m ³	21,60	22
»	Stahl	900 kg	0,90	23
Transformator	Stahl	8000 kg	8,00	200
»	Kupfer	2000 kg	2,00	120
Kabel usw.	Kupfer	1000 kg	1,00	60
»	Aluminium	500 kg	0,50	89
»	Silizium	20 kg	0,02	18
Summe			34,02	530

Gesamt

Unterwerksabstand:	3 km		
Lebensdauer der Anlagen:	40 a		
Prozess	Einheit	Energie	
Herstellung der Fahrleitung	GJ/km	471	
Herstellung des Unterwerks	GJ/km	177	
Errichtung der Anlagen	GJ/km	100	
Summe	GJ/km	748	
Jahreswert	GJ/(km · a)	19	

Quellen: Energie- und Dichtewerte aus Tabelle 5.5 sowie eigene Annahmen

Tabelle 5.7: Primärenergiebedarf eines Betriebsjahres der mit Solo- und Gelenkbussen betriebenen VBZ-Diesel- und Trolleybuslinien

Linie	Anz. Fzg.	Primärenergiebedarf MWh/a	Primärenergiebedarf GJ/(Fzg · a)	Linie	Anz. Fzg.	Primärenergiebedarf MWh/a	Primärenergiebedarf GJ/(Fzg · a)
<i>Solo-Dieselbus:</i>				<i>Gelenk-Trolleybus:</i>			
67	6	2297	1378	33	13	4405	1220
69	3	621	745	34	4	1378	1240
70	3	1750	2100	46	11	2856	935
76	3	441	530	72	10	3222	1160
77	2	677	1219				
89	6	3185	1911				
94	1	157	565				
Gesamt	24	9128	1369	Gesamt	38	11861	1124
<i>Gelenk-Dieselbus:</i>				<i>Doppelgelenk-Trolleybus:</i>			
61/62	9	4489	1796	31	12	4563	1369
63	4	1825	1643	32	14	4637	1192
69	5	1835	1321				
75	6	2926	1755				
80	13	8268	2290				
94	3	1091	1310				
Gesamt	40	20434	1839	Gesamt	26	9200	1274

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5.8: Graue Energie – Zusammenfassung und Vergleich. Angegeben ist der Energiebedarf je Fahrzeug und Betriebsjahr, als Fahrzeuglebensdauer wurden 15 Jahre angenommen.

Energiebedarf pro Betriebsjahr	Einheit	Dieselbus		Trolleybus	
		Solo	Gelenk	Gelenk	DGelenk
Herstellung der Fahrzeuge	GJ	104	156	156	199
Fahrzeugkilometer gesamt ^a	km	1'676'515	3'001'060	3'113'052	2'127'120
Kilometer je Fahrzeug ^b	km	69'855	75'027	81'922	81'812
Wartung der Fahrzeuge	GJ	70	75	82	82
Erstellung der Infrastruktur ^c	GJ	-	-	18	18
Graue Energie insgesamt	GJ	174	231	256	299
Energiebedarf für Betrieb	GJ	1369	1839	1124	1274
Graue Energie : Betrieb	%	12,7	12,6	22,8	23,5

^a Werte aus den Tabellen 5.13 und 5.15^b Fahrzeugkilometer gesamt dividiert durch Anzahl Fahrzeuge aus Tabelle 5.7^c Die Herleitung dieses Wertes wird im Text erläutert.

Quelle: Eigene Berechnungen

so erhält man rund 18 GJ/(Fzg · a). Es fällt auf, dass dieser Wert beim Trolleybus einen eher geringen Einfluss hat, was vor allem an der recht langen Lebensdauer der Infrastruktur liegen dürfte. Insgesamt ist der relative Anteil der grauen Energie beim Trolleybus dennoch knapp doppelt so gross wie beim Dieselbus. Dies liegt, angesichts des geringen Beitrages der Infrastruktur, vorrangig daran, dass – insbesondere bei einem wasserkraftbetonten Strommix – die Effizienz der Energiebereitstellung hoch ist und somit einen geringen Primärenergiebedarf zur Folge hat. Zudem verzeichnen die Fahrzeuge eine grössere Fahrleistung, die einen höheren Energiebedarf für deren Wartung zur Folge hat.

5.4 Emissionen

5.4.1 Emissionen der Energiebereitstellung

Mit den während der Energiebereitstellung emittierten Schadstoffen und Treibhausgasen beschäftigt sich eine Studie des deutschen Umweltbundesamtes.¹¹ Sie ist den Emissionsminderungspotenzialen der erneuerbaren Energien gewidmet, sodass sich dort als Vergleichsbasis auch Angaben zu fossilen Energieträgern finden, während die Kernenergie hingegen nicht erwähnt wird. Leider sind die Emissionsfaktoren der Kraftstoffe fehlerhaft bezeichnet. Obwohl angegeben ist, dass es sich um die Emissionsfaktoren der Bereitstellung handeln sollte (indirekte Emissionen), sind offenbar auch die direkten Emissionen mit einberechnet. Somit bedurfte es für diese Emissionsfaktoren einer weiteren Datenquelle, die mit ProBas¹² schliesslich gefunden wurde. Die fehlenden Emissionsfaktoren der Kernenergie konnten ebenfalls ProBas entnommen werden.

Die spezifischen Emissionsfaktoren für die Energiebereitstellung (WTT) können der Tabelle 5.9 entnommen werden. Diese Werte sind auf die bereitgestellte Endenergie bezogen und gelten für den durchschnittlichen Anlagenbestand in Deutschland.¹³ Neben der Berechnung des Primärenergiebedarfs sollen auch Abschätzungen der Emissionen der Schweizer und der österreichischen Stromerzeugung möglich sein. Für Österreich liessen sich aber keine Emissionsfaktoren, die den gleichen Detaillierungsgrad aufweisen, auffinden. Deshalb – sowie nicht zuletzt aus Gründen der Vereinfachung – sollen die deutschen Emissionsfaktoren auch auf die Energiebereitstellung in diesen beiden Ländern angewendet werden. Die Anwendbarkeit der Werte auf die Schweizer Stromerzeugung kann mittels eines Vergleichs mit den im Auftrag des BAFU ermittelten Treibhausgas-Emissionsfaktoren des Schweizer Erzeugungs-Strommixes¹⁴ abgeschätzt werden. Obwohl einzelne Faktoren recht stark differieren, gleichen sich die Differenzen,

¹¹Memmler u. a. 2014.

¹²Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme; weitere Informationen finden sich unter www.probas.umweltbundesamt.de

¹³Memmler u. a. 2014, S. 14 f.

¹⁴Frischknecht, Itten und Flury 2012, S. 11.

Tabelle 5.9: Spezifische Emissionsfaktoren in g/kWh für die Elektrizitätserzeugung und die Bereitstellung von Kraftstoffen

Energie(träger)	Treibhausgase			Säurebildner			Übrige		Quelle		
	Summe CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Summe SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub		CO	NM- VOC
Elektrizität											
Braunkohle	1070,100	1059,500	0,021	0,033	1,065	0,586	0,688	0,030	0,426	0,012	[1], S. 39
Steinkohle	919,000	850,200	3,106	0,011	0,853	0,469	0,551	0,033	0,098	0,029	[1], S. 39
Kernenergie	55,099	52,870	0,071	0,002	0,137	0,048	0,128	0,015	0,068	0,004	[2]
Erdgas	429,700	400,100	1,265	0,010	0,408	0,015	0,565	0,013	0,272	0,026	[1], S. 39
Erdöl	777,300	768,700	0,222	0,013	1,488	0,899	0,847	0,079	0,312	0,149	[1], S. 39
Photovoltaik	55,190	51,860	0,135	0,002	0,113	0,060	0,077	0,032	1,221	0,005	[1], S. 39
Windenergie (Land)	8,760	8,090	0,030	0,000	0,027	0,013	0,020	0,009	0,120	0,002	[1], S. 42
Windenergie (See)	4,270	3,930	0,016	0,000	0,013	0,007	0,009	0,005	0,069	0,001	[1], S. 45
Wasserkraft	2,690	2,590	0,004	0,000	0,007	0,001	0,007	0,002	0,014	0,000	[1], S. 48
Biomasse (fest)	25,360	16,110	0,098	0,023	0,717	0,130	0,843	0,067	0,360	0,176	[1], S. 56
Biogas	422,600	71,450	11,130	0,379	1,723	0,543	1,694	0,087	1,163	0,146	[1], S. 62
Kraftstoffe											
Dieselmotortreibstoff	39,602	37,807	0,058	0,001	0,158	0,095	0,091	0,012	0,047	0,040	[3]
Ottomotortreibstoff	54,323	52,276	0,062	0,002	0,190	0,115	0,107	0,014	0,053	0,522	[4]
Erdgas (CNG)	40,513	22,795	0,695	0,001	0,070	0,005	0,094	0,004	0,064	0,010	[5]

Quellen: [1] Memmler u. a. 2014; [2] UBA 2017f; [3] UBA 2017g; [4] UBA 2017h; [5] UBA 2017i

über den gesamten Strommix betrachtet, einigermaßen aus; mit den Werten der BAFU-Studie gerechnet, liegt der Gesamt-Emissionsfaktor knapp 20 % unter dem mit den UBA-Faktoren berechneten Wert (siehe Tabelle 5.10). Angesichts der hier zu Grunde gelegten Erzeugungs-Strommixe, die einen eher theoretischen Ansatz darstellen (der wirkliche Strommix beinhaltet auch die Stromimporte) und die Emissionen ohnehin nur vergleichsweise grob annähern, erscheint die Differenz als tolerabel.

Tabelle 5.10: Vergleich der THG-Emissionsfaktoren der Elektroenergieerzeugung in Deutschland und der Schweiz

Energieträger	Strommix Schweiz ^a	Emissionsfaktoren in g/kWh		Emissionen in g/kWh	
		UBA-Studie	BAFU-Studie	gem. UBA	gem. BAFU
Braunkohle	0,0 %	1070,1	1093,0	0,00	0,00
Steinkohle	2,4 %	919,0		22,33	26,56
Kernenergie	34,7 %	55,1	10,5	19,15	3,65
Erdgas	0,0 %	429,7	585,4	0,00	0,00
Erdöl	0,0 %	777,3	730,7	0,00	0,00
Photovoltaik	1,8 %	55,2	81,6	0,97	1,44
Windenergie	0,2 %	8,8	17,2	0,02	0,03
Wasserkraft	58,5 %	2,7	5,5	1,57	3,22
Biomasse (fest)	0,3 %	25,4	30,0	0,07	0,09
Biogas	0,4 %	71,5	240,6	0,25	0,86
Gesamt	98,2 %			44,36	35,83

^a Die Anteile wurden auf Basis der Werte in Tabelle 5.1 ermittelt. Die fehlenden 1,8 % für die «übrigen» Energieträger werden hier nicht berücksichtigt.

Quellen: Tabelle 5.9, Spalte CO₂-Äq. (UBA-Studie); Frischknecht, Itten und Flury 2012, S. 11 (BAFU-Studie)

Zu beachten ist weiterhin, dass sowohl die direkten Emissionen aus dem Anlagenbetrieb als auch die Vorkettenemissionen, die z. B. bei Gewinnung und Aufbereitung der Rohstoffe und bei der Herstellung der Anlagen entstehen, einberechnet sind.¹⁵

5.4.2 Emissionen während des Betriebes

Die chemischen Vorgänge bei der Kraftstoffverbrennung sind komplex, weshalb deren Modellierung sehr aufwändig ist.¹⁶ Dies kann im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden, weshalb der einfachere Ansatz der Verwendung von Emissionsfaktoren verfolgt wird. Im Strassenverkehr sind diese üblicherweise auf die Laufleistung bezogen (g/km), was hier aber wenig hilfreich ist, da für die Berechnung der Emissionen auf Basis des Energiebedarfs Werte in g/kWh benötigt werden.

¹⁵Memmler u. a. 2014, S. 15.

¹⁶Merker und Teichmann 2014, S. 463.

Die CO₂-Emissionen werden für jeden Fahrzeugtyp messtechnisch ermittelt. Dies ist für die hier zu Grunde liegenden generischen Fahrzeuge nicht möglich, weshalb eine Näherungsbetrachtung erforderlich ist. Unter der Annahme einer vollständigen Verbrennung¹⁷ können allgemeingültige, kraftstoffspezifische CO₂-Emissionsfaktoren angegeben werden.¹⁸ Mit den Umrechnungsfaktoren¹⁹ lassen sich daraus die in der Tabelle 5.11 aufgeführten Summenwerte in CO₂-Äquivalenten bestimmen.

Tabelle 5.11: Direkte spezifische Emissionsfaktoren fossiler Kraftstoffe

	Umrechnungs- faktor	Emissionsfaktoren in g/kWh	
		Dieselmotorkraftstoff	Erdgas (CNG)
<i>Treibhausgase</i>			
CO ₂	1	266,400	200,900
CH ₄	25	0,000	0,500
N ₂ O	298	k. A.	k. A.
CO ₂ -Äquivalent		266,400	213,400
<i>Schadstoffe</i>			
SO ₂	-	k. A.	
NO _x	-	0,400	
Staub	-	0,010	
CO	-	4,000	
NMVOG	-	0,160	

Quellen: CO₂-Emissionsfaktoren aus Jührich 2016, S. 35 und 44 (hier umgerechnet von t/TJ in g/kWh), Umrechnungsfaktoren gemäss Memmler u. a. 2014, S. 13 sowie Methan- und Schadstoffgrenzwerte für den europäischen instationären Zyklus (ETC) aus der Verordnung (EG) 595/2009 (Europäisches Parlament 2009, S. 10).

Hinsichtlich der direkten Schadstoffemissionen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor gelten europaweit einheitliche Grenzwerte, für schwere Nutzfahrzeuge sind sie in der Verordnung (EG) 595/2009 festgelegt.²⁰ Die Einhaltung dieser Grenzwerte wird durch innermotorische Massnahmen (z. B. Abgasrückführung und Optimierung der Gemischbildung) sowie durch Abgasnachbehandlung (Katalysatoren, Filter) erreicht.²¹ Da diese Methoden aufwändig sind und auch kein Anreiz besteht, die ohnehin niedrigen Grenzwerte weiter zu unterbie-

¹⁷Diese Annahme dürfte zumindest beim Dieselmotor durchaus realistisch sein, denn gemäss Merker und Teichmann 2014, S. 505, Abb. 7.1 b beträgt der Anteil von Kohlenmonoxid, das bei einer unvollständigen Verbrennung entsteht, an den Rohemissionen nur 0,008 %.

¹⁸Jührich 2016.

¹⁹Memmler u. a. 2014, S. 13.

²⁰Europäisches Parlament 2009, S. 10.

²¹Merker und Teichmann 2014, S. 750.

ten, soll davon ausgegangen werden, dass die Fahrzeughersteller die Abgasnachbehandlung so regeln, dass die Grenzwerte eingehalten, aber nicht unterschritten werden. Somit wird hier für eine Abschätzung angenommen, dass der Schadstoffausstoss während des Betriebes im Mittel den Grenzwerten entspricht. Hierfür wurden aus der erwähnten EU-Verordnung die für den europäischen instationären Zyklus (ETC) geltenden Werte übernommen (siehe Tabelle 5.11).

Die direkten Emissionsfaktoren gemäss Tabelle 5.11 stellen nur eine recht grobe Annäherung dar. Deshalb werden in dieser Arbeit im Folgenden nur die THG-Emissionen in die Betrachtungen einbezogen. Sollten zu einem späteren Zeitpunkt geeignetere Emissionsfaktoren zur Verfügung stehen, können diese ohne weitere Anpassungen im Berechnungsmodell verwendet werden, wodurch auch zuverlässigere Aussagen zu Schadstoffemissionen möglich würden.

5.5 Vergleich auf Basis von Jahreswerten

5.5.1 Vorgehensweise und Datenbasis

Für viele Vergleiche, beispielsweise zur Abschätzung der Betriebskosten, ist es notwendig, Jahreswerte für den Energiebedarf und die Emissionen zu bestimmen. Dadurch stellt sich die Frage, auf welche Weise deren Berechnung erfolgen sollte, da das Berechnungsmodell grundsätzlich nur Werte für einen Umlauf liefert. Es ist naturgemäss nicht praktikabel, jeden Umlauf eines Betriebsjahres zu berechnen – allein schon wegen der in dieser Auflösung in der Regel gar nicht vorliegenden Daten zu den Fahrgastzahlen, sodass ein Kompromiss gefunden werden musste.

Da das Netz aus eigener Anschauung gut bekannt ist und zudem wichtige Daten frei verfügbar sind, lag es nahe, die Linien der Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) als Fallstudie heranzuziehen. Deshalb bot es sich an, die Jahreswertberechnung auf Basis von Struktur und Verfügbarkeit der Daten umzusetzen.

Die auf dem OpenData-Portal der Stadt Zürich in diesem Zusammenhang relevanten Daten verteilen sich auf zwei verschiedene Datensätze:

- Fahrgastzahlen (jährlich aktualisiert),
- Fahrzeiten im SOLL-IST-Vergleich (wöchentlich aktualisiert).

In diesen Daten finden sich Angaben zu 14 Tram- und 32 Stadtbuslinien sowie 31 Linien des Agglomerationsverkehrs, wobei bei einzelnen Linien entweder die Fahrzeuginformationen oder die Besetzungswerte fehlten. Weiterhin verkehrten nicht alle Linien an jedem Wochentag.

Als Zeitraum für die Fahrgastzahlen wurde das Jahr 2015 gewählt,²² da zum Zeitpunkt der Auswertungen die Zahlen des Jahres 2016 noch nicht vorlagen. Die Daten zu den Fahrgastzahlen beinhalten für nahezu jede Linie und für jede Tagesart die haltestellenbezogenen Besetzungen für jeden fahrplanmässigen

²²Stadt Zürich 2016.

Kurs in Form von Jahresmittelwerten. Ein Fahrzeit-Datensatz enthält den Soll-Ist-Vergleich der Fahr- und Haltezeiten aller Fahrten einer Woche. Aus dem Fahrzeiten-Datensatz wurden insbesondere die Sollwerte der Fahr- und Haltezeiten ausgelesen, weshalb eine Woche auszuwählen war, die möglichst wenige Baustellen erwarten liess und natürlich aus demselben Jahr wie die Fahrgastzahlen stammen musste. Gewählt wurde schliesslich die 46. Kalenderwoche des Jahres 2015 (08.-14.11.15).²³ Ausser den Sollzeiten enthält der Datensatz auch die GPS-Koordinaten aller Haltestellen; diese wurden benötigt, um ihre Höhenlagen (m ü. M.) zu berechnen, welche in keinem der beiden Datensätze enthalten waren. Die Herangehensweise ist im Anhang A.7 ab Seite 197 beschrieben.

5.5.2 Eingangsrößen

Grundsätzlich wird von drei Tagesarten ausgegangen: Arbeitstage Montag bis Freitag (Mo-Fr), Samstag (Sa) sowie Sonntage inkl. Wochenfeiertage (SoF). Ferienfahrpläne, Nachtverkehr sowie Aus- und Einrückfahrten werden aus Gründen der Vereinfachung nicht berücksichtigt. Die Anzahl der Tage für jede Tagesart sind vom Anwender vorzugeben, da die Zahl der Wochenfeiertage regionalen Abweichungen unterliegt.

Tabelle 5.12: Zeitfenster des Betriebstages

Tagesart	Zeitfenster	Uhrzeit		Temperatur ^a in °C
		von	bis	
Mo-Fr	NVZ morgens	05.00	07.00	7,4
	HVZ morgens	07.00	09.00	8,7
	NVZ tagsüber	09.00	15.00	12,2
	HVZ abends	15.00	18.30	13,3
	NVZ abends	18.30	20.30	10,7
	SVZ abends	20.30	00.00	8,8
Sa	SVZ morgens	05.00	10.00	8,8
	NVZ tagsüber	10.00	20.00	12,6
	SVZ abends	20.00	00.00	9,0
SoF	SVZ	05.00	12.00	9,4
	NVZ/SVZ	12.00	00.00	11,4

^a Mittlere Temperaturen für das Jahr 2016 an der Messstation Zürich Affoltern (444 m ü. M.)
 Quellen: Eigene Darstellung auf Basis von Stadt Zürich 2015 und MeteoSchweiz 2017

Eine Analyse der Fahrzeitdaten ergibt, dass sich innerhalb eines Betriebstages maximal vier Zeitschemata auf höchstens sechs Zeitabschnitte (im Folgenden

²³Stadt Zürich 2015; die Kalenderwoche entspricht nicht vollumfänglich der Woche der Datenbank, da dort der Sonntag als erster Tag der Woche gilt.

Zeitfenster genannt) verteilen. Bei den meisten täglich verkehrenden Linien gelten annähernd die in der Tabelle 5.12 aufgelisteten Zeitfenster. Falls die Betriebszeiten der zu untersuchenden Linie von diesen Standard-Zeitfenstern abweichen, können die Uhrzeiten entsprechend angepasst werden. In einem ersten Schritt muss demnach jedem Zeitfenster das zugehörige Zeitschema (welches gleichermaßen für die Sollfahr- und Sollhaltezeiten gilt) zugeordnet werden; verkehrt die Linie während eines Zeitfensters nicht, ist dort der Wert Null einzutragen, wodurch dieses Zeitfenster nicht in die Berechnung eingeht. Weiterhin ist zur Bestimmung der Gesamtzahl der Umläufe die Angabe des Taktintervalls für jedes Zeitfenster erforderlich.

Die umgesetzte Lösung kann sinnvoll nur dann funktionieren, wenn mindestens die haltstellenbezogenen mittleren Besetzungen für alle Zeitfenster, an denen die Linie im Einsatz ist, vorliegen. Diese Werte waren daher auf Basis der Fahrgastzahlen-Datenbank zu berechnen. Hierfür wurden zuerst die Umläufe verknüpft, d. h. zu jeder Fahrt der Fahrtrichtung 1 die passende Fahrt der Gegenrichtung gesucht. Anschliessend wurde das arithmetische Mittel der Besetzung aller im Zeitfenster liegenden Kurse gebildet. Basis für die Zuordnung zu den Zeitfenstern waren die Abfahrtszeiten aller Umläufe an der ersten Haltestelle in Richtung 1. Zusätzlich wurde für jede Tagesart der Mittelwert des gesamten Betriebstages berechnet. Dieser dient als Rückfallebene, falls der Mittelwert eines Zeitfensters fehlen sollte.

Soll auch der Einfluss der Heizenergie auf die Hilfsbetriebeenergie berücksichtigt werden, bedarf es mindestens der Vorgabe der mittleren Jahrestemperatur. Will man die Genauigkeit der Berechnung verbessern, können stattdessen die mittleren Jahrestemperaturen für jedes Zeitfenster angegeben werden.²⁴ Für die Fallstudie wurde dies so umgesetzt; die Mittelwerte wurden dabei aus den Stundenwerten der Temperaturen des Jahres 2016 für die Messstation Zürich Af-foltern berechnet.²⁵ Die Temperaturwerte sind in der Tabelle 5.12 aufgeführt, die Jahresmitteltemperatur beträgt 10,1 °C.

5.5.3 Berechnungsalgorithmus

Aus den Fahr- und Haltezeitschemata werden zuerst, unter Heranziehung der Mindestwendezeit, die Anzahl der Umläufe sowie die Anzahl der benötigten Fahrzeuge für jedes Zeitfenster bestimmt. Hierzu wird zuerst die Umlaufzeit als Summe aus den Fahr- und Haltezeiten sowie unter Anrechnung der Mindestwendezeit (je Endhaltestelle) gebildet. Stellt dieser Wert kein ganzzahliges Vielfaches der Taktzeit dar, wird die Wendezeit entsprechend verlängert. Die Division dieser angepassten Umlaufzeit durch die Taktzeit ergibt die benötigte Fahrzeuganzahl. Nun lässt sich die Anzahl der Umläufe berechnen, indem man die Dauer des

²⁴Prinzipiell könnten auch die Tageswerte verwendet werden, dann müsste die Berechnung allerdings für sämtliche Tage des Jahres durchgeführt werden, was wegen der langen Berechnungszeit nicht praktikabel ist.

²⁵MeteoSchweiz 2017.

Zeitfensters durch die Umlaufzeit dividiert und dann mit der Fahrzeuganzahl multipliziert.

Anschliessend werden für jedes Zeitfenster die verkehrsbedingten Halte und dann, unter Einbezug der Besetzung und der mittleren Temperatur, der Energiebedarf für einen Umlauf berechnet. Danach wird dieser Energiebedarf mit der Anzahl der Tage der entsprechenden Tagesart sowie der Anzahl der Umläufe multipliziert. Die Addition der Energiebedarfswerte aller elf Zeitfenster ergibt schliesslich den Jahresenergiebedarf für die untersuchte Linie. Dieser dient wiederum zur Bestimmung der Emissionen.

5.5.4 Ausgabewerte

Es werden, getrennt für alle zu vergleichenden Antriebssysteme, folgende Ergebnisse ausgegeben, welche zum Teil als Zwischenergebnisse für die Bestimmung weiterer Ausgabewerte dienen:

- Separat für alle 11 Zeitfenster
 - Energiebedarf E_{TTW} ab Tank und ab Batterie für einen Umlauf,
 - Anzahl Umläufe sowie Fahrzeug- und Personenkilometer für einen Betriebstag;
- Für einen Betriebstag, je für die drei Tagesarten Mo-Fr, Sa und SoF
 - Energiebedarf E_{TTW} und E_{Prim} in kWh ab Tank, ab Batterie und gesamt,
 - Spezifischer Energiebedarf E_{TTW} und E_{Prim} in kWh/Fzkm, l/100 Fzkm und l/100 Pkm,
 - Anzahl Umläufe sowie Fahrzeug- und Personenkilometer für ein Betriebsjahr;
- Summenwerte für ein Betriebsjahr
 - Energiebedarf E_{TTW} und E_{Prim} in kWh ab Tank, ab Batterie und gesamt
 - Spezifischer Energiebedarf E_{TTW} und E_{Prim} in kWh/Fzkm, l/100 Fzkm und l/100 Pkm,
 - Treibhausgas- und Schadstoffemissionen (Bereitstellung, Betrieb und gesamt);

5.6 Validierung

Um zu überprüfen, ob das Modell korrekte Ergebnisse liefert, ist ein Abgleich mit realen Energiebedarfswerten unerlässlich. Für diese Validierung wurden von den VBZ Flottenverbrauchswerte des Betriebsjahres 2016 für alle bei den VBZ eingesetzten Bustypen zur Verfügung gestellt.²⁶

²⁶Vogel 2017.

Für den Vergleich konnten die für die VBZ-Fallstudie berechneten Energiebedarfswerte herangezogen werden, die wichtigsten betrieblichen Parameter der betrachteten Linien können der Tabelle 6.1 entnommen werden. Erschwerend war in diesem Zusammenhang, dass zum Fahrplanwechsel 2015/2016 die Linieneinführung einiger wichtiger Buslinien im Norden Zürichs verändert wurde, im Programm aber noch mit den alten Linienverläufen gerechnet werden musste. Da jedoch keine neue Streckenführung hinzukam und auch keine bestehende aufgegeben wurde, also lediglich verschiedene Linienäste neu miteinander verknüpft wurden, kann dies als unproblematisch angesehen werden.

Tabelle 5.13: Vergleich des berechneten Verbrauchs von Dieselbussen mit dem VBZ-Flottenwert

Linie	Fzkm	Kraftstoffverbrauch		Differenz
		berechnet Liter Diesel	gemessen l/100 Fzkm	
<i>Solobusse</i>				
67	458'022	194'775	42,5	
69	120'285	52'635	43,8	
70	292'277	148'356	50,8	
76	77'147	37'413	48,5	
77	120'442	57'424	47,7	
89	574'934	270'041	47,0	
94	33'408	13'303	39,8	
Flotte	1'676'515	773'948	46,2	48 -3,8 %
<i>Gelenkbusse</i>				
61/62	745'033	380'636	51,1	
63	260'806	154'756	59,3	
69	247'772	155'556	62,8	
75	445'306	248'050	55,7	
80	1'136'388	701'059	61,7	
94	165'755	92'531	55,8	
Flotte	3'001'060	1'732'587	57,7	59 -2,1 %

Quellen: Die Fahrzeugkilometer (Fzkm) sowie die als «berechnet» gekennzeichneten Verbrauchswerte wurden mit dem eigenen Modell ermittelt, mit «gemessen» sind die VBZ-Flottenwerte nach Vogel 2017 bezeichnet.

Die berechneten Werte für Dieselbusse werden in der Tabelle 5.13 den VBZ-Werten gegenübergestellt. Man erkennt, dass die berechneten Verbrauchswerte etwas geringer als die Istwerte sind. Dies dürfte daran liegen, dass in der Modellrechnung nicht sämtliche Fahrten berücksichtigt werden konnten. So fehlen bei den Solobussen die Quartierlinien 37 und 78, welche im Fahrplanjahr 2015 entweder einen anderen Linienverlauf hatten (Linie 37) oder mit anderen Fahrzeugen (Midibusse, Linie 78) befahren wurden. Bei den Gelenkbussen konnten

die Verstärkerfahrten auf der (sonst mit Solobussen bedienten) Linie 89 nicht einbezogen werden.

Tabelle 5.14: Vergleich des berechneten Verbrauchs des Parallelhybridbusses mit dem VBZ-Flottenwert

Linie	Anteil	Fzkm	Kraftstoffverbrauch		Differenz	
			berechnet Liter Diesel	gemessen l/100 Fzkm		
61/62	26,0%	745'033	296'209	39,8		
63	4,5%	260'806	120'155	46,1		
69	1,5%	247'772	118'419	47,8		
75	66,0%	445'306	183'411	41,2		
80	2,0%	1'136'388	503'874	44,3		
Gesamt				41,0	44	-6,9%

Die Spalte «Anteil» bezeichnet den Anteil des Einsatzes auf der jeweiligen Linie an der gesamten Einsatzzeit.

Quellen: Die Fahrzeugkilometer (Fzkm) sowie die als «berechnet» gekennzeichneten Verbrauchswerte wurden mit dem eigenen Modell ermittelt, mit «gemessen» sind die VBZ-Flottenwerte nach Vogel 2017 bezeichnet.

Der Vergleich für den Parallelhybrid-Gelenkbus ist in der Tabelle 5.14 dargestellt. Die Berechnung unterschätzt den realen Wert um knapp 7 %, was vermutlich an der noch nicht optimalen Abstimmung des Energiemanagements im (realen) Vergleichsfahrzeug auf die Linienparameter seines Einsatzgebietes liegt (das Fahrzeug kam erst im Laufe des Jahres 2015 zur VBZ). Gleichwohl könnte auch das Berechnungsmodell zu der Abweichung beitragen, denn das Energiemanagement im Antriebsstrang ist nur in vereinfachter Form modelliert. Hier wäre ein Vergleich mit aktuelleren Verbrauchswerten interessant, der dazu beitragen würde, die erste Vermutung zu entkräften. Schliesslich könnte der höhere reale Verbrauch zum Teil auch darin begründet liegen, dass das Fahrpersonal sich erst an das neue Fahrzeug gewöhnen musste.

Bei den Trolleybussen (siehe Tabelle 5.15) unterschätzt die Berechnung für den Gelenkbus den Energiebedarf um etwa 6 %, während der der Doppelgelenkbusse fast exakt erreicht wird – obwohl beiden Fahrzeugtypen der gleiche Berechnungsalgorithmus zu Grunde liegt. Dies könnte an der notwendigen Skalierung des Wertes der Heizleistung liegen, die vereinfachend in linearer Form erfolgte (siehe Abschnitt 4.6.4). In beiden Fällen wurde ein Rekuperationsgrad von 1 angenommen, die – nach Abzug des Leistungsbedarfs der Hilfsbetriebe – zur Verfügung stehende Bremsleistung ist also stets vollständig in die Fahrleitung eingespeist worden. Dies ist zwar eher unüblich, aber keineswegs ausgeschlossen, denn die gesamte VBZ-Trolleybusflotte ist rückspeisefähig.

Im Netz der VBZ werden keine Brennstoffzellen-Hybridbusse eingesetzt, so dass die Berechnungsgenauigkeit für dieses Antriebssystem auf andere Weise geprüft werden muss. Hierfür soll angenommen werden, dass auf den VBZ-Solo-

Tabelle 5.15: Vergleich des berechneten Verbrauchs der Trolleybusse mit den VBZ-Flottenwerten

Linie	Fzkm	Energieverbrauch		Differenz
		berechnet kWh	gemessen kWh/Fzkm	
<i>Gelenkbusse</i>				
33	1'153'992	2'946'082	2,55	
34	343'262	921'887	2,69	
46	755'403	1'910'426	2,53	
72	860'394	2'154'859	2,50	
Flotte	3'113'052	7'933'254	2,55	2,7 -5,6%
<i>Doppelgelenkbusse</i>				
31	1'033'789	3'052'199	2,95	
32	1'093'331	3'101'353	2,84	
Flotte	2'127'120	6'153'551	2,89	2,9 -0,2%

Quellen: Die Fahrzeugkilometer (Fzkm) sowie die als «berechnet» gekennzeichneten Verbrauchswerte wurden mit dem eigenen Modell ermittelt, mit «gemessen» sind die VBZ-Flottenwerte nach Vogel 2017 bezeichnet.

Tabelle 5.16: Berechneter Kraftstoffverbrauch der Brennstoffzellen-Hybridbusse

Linie	Fzkm	Kraftstoffverbrauch		Linie	Fzkm	Kraftstoffverbrauch	
		kg H ₂	kg H ₂ je 100 Fzkm			kg H ₂	kg H ₂ je 100 Fzkm
<i>Solobusse</i>				<i>Gelenkbusse</i>			
67	458'022	44'246	9,7	33	1'153'992	166'494	14,4
69	120'285	12'132	10,1	34	343'262	57'593	16,8
70	292'277	33'366	11,4	46	755'403	105'763	14,0
76	77'147	9'389	12,2	72	860'394	118'012	13,7
77	120'442	13'816	11,5	61/62	745'033	94'092	12,6
89	574'934	57'749	10,0	63	260'806	38'484	14,8
94	33'408	3'281	9,8	69	247'772	35'238	14,2
				75	445'306	62'641	14,1
				80	1'136'388	161'216	14,2
				94	165'755	22'180	13,4
Ges.	1'676'515	173'978	10,4	Ges.	6'114'112	861'714	14,1

Quelle: Eigene Berechnungen

und Gelenkbuslinien Brennstoffzellen-Hybridbusse verkehren würden, der berechnete Energiebedarf wird dann mit Energiebedarfswerten aus tatsächlichen Einsätzen verglichen. Es erweist sich als hilfreich, dass das Berechnungsmodell stets alle Antriebssysteme berechnet, die zuvor beschriebene Validierung also quasi nebenbei auch den Energiebedarf der Brennstoffzellen-Hybridbusse liefert. Vergleicht man nun die mittleren Verbrauchswerte aus Tabelle 5.16 mit den Werten aus Tabelle 3.4 (S. 38), ergibt sich eine gute Übereinstimmung: Der hier berechnete Mittelwert von $10,4 \text{ kg H}_2/100 \text{ Fzkm}$ für Solobusse liegt etwa mittig im Bereich von $7,9 \dots 13,2 \text{ kg H}_2/100 \text{ Fzkm}$ der Versuchsbetriebe. Für die Gelenkbusse ist ein Vergleich angesichts der kleinen Stichprobe von gerade zwei an einem Ort eingesetzten Fahrzeugen leider nur eingeschränkt möglich. Immerhin entspricht der hier berechnete Wert ($14,1 \text{ kg H}_2/100 \text{ Fzkm}$) zumindest in seiner Grössenordnung dem gemessenen Wert ($16,5 \text{ kg H}_2/100 \text{ Fzkm}$).

Von Batteriebusen sowie von seriellen Hybridbussen standen leider keine Verbrauchswerte zur Verfügung, weshalb diese Antriebssysteme nicht validiert werden konnten. Zumindest die Grössenordnung der Kraftstoffeinsparung, die für den Einsatz serieller Hybridbusse gemäss den Berechnungsergebnissen zwischen 18 und 29 % lag, entspricht den im realen Betrieb erzielten Werten.

Insgesamt zeigen die Vergleiche eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse des Berechnungsmodells mit realen Verbrauchswerten, somit kann der Berechnungsalgorithmus als hinreichend genau angesehen werden. Die Abweichungen betragen maximal 6 % und sind damit so klein, dass Verzerrungen des Vergleichsergebnisses nahezu ausgeschlossen werden können. Ein Ziel des Berechnungsmodells ist, möglichst optimale Energiebedarfswerte zu berechnen, um das Potenzial der Energieeinsparung ausweisen zu können. Die leichte Unterschätzung des tatsächlichen Energiebedarfs dürfte somit zum Teil auch daher rühren, dass die realen Werte sehr wahrscheinlich nicht ganz an das Optimum heranreichen, weil nicht jeder Fahrer zu jedem Zeitpunkt einer energieoptimalen Fahrweise folgen kann, beispielsweise beim Aufholen von Verspätungen.

6

Fallstudien

6.1 Fallstudie VBZ-Buslinien

6.1.1 Untersuchte Linien

Nachdem in den beiden vorausgehenden Kapiteln der Modellaufbau beschrieben wurde, widmet sich dieses Kapitel nun in Form zweier Fallstudien der Anwendung des Modells. Zuerst sollen ausgewählte VBZ-Buslinien einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

Es galt, aus den vorliegenden Daten (siehe Abschnitt 5.5.1) eine möglichst repräsentative Auswahl an Linien zu treffen, wobei ausserdem den Bedürfnissen der Validierung Rechnung zu tragen war. Um für Letztere brauchbare Ergebnisse zu erhalten, mussten möglichst alle diejenigen Linien des VBZ-Stadtverkehrs berücksichtigt werden, auf denen Solo-, Gelenk- und Doppelgelenkbusse zum Einsatz kommen. Wegen ihres geringen Anteils an den Fahrzeugkilometern wurden die mit Midi- und Kleinbussen betriebenen Quartierlinien sowie reine HVZ-Linien nicht in die Betrachtung einbezogen.

Diesen 17 Stadtverkehrslinien sollen im Rahmen dieser Fallstudie zum Vergleich auch zwei Agglomerationslinien gegenübergestellt werden. Von den im Datensatz enthaltenen Linien kommen hierfür insbesondere die Linien 701 und 743 in Betracht, weil sich deren Charakteristika (vor allem der mittlere Haltestellenabstand) deutlich genug von denen der Stadtverkehrslinien unterscheiden. Die Tabelle 6.1 stellt die wichtigsten betrieblichen Kenngrössen aller ausgewählten Linien zusammen, ihre Höhenprofile finden sich im Anhang (Abbildung A.6 ab S. 199). Zu beachten ist, dass jüngst erfolgte Änderungen, wie beispielsweise der im Laufe des Jahres 2017 eingeführte Gelenkbuseinsatz auf den Linien 70 und 89, hier nicht berücksichtigt werden konnten, da die den Berechnungen zugrundeliegenden Daten aus dem Betriebsjahr 2015 stammen, sodass auch die damaligen Linienverläufe sowie der damalige Fahrzeugeinsatz massgeblich sind.

Für jede der genannten Linien wurden mit Hilfe der Vergleichsmethodik für alle 12 Antriebssysteme Energiebedarf und Treibhausgasemissionen eines Betriebsjahres berechnet (für Details hierzu siehe Abschnitt 5.6), die Ergebnisse bilden die Basis der folgenden Betrachtungen.

Tabelle 6.1: Hauptkennwerte aller im Rahmen der VBZ-Fallstudie untersuchten Linien (siehe hierzu auch die Höhenprofile in der Abbildung A.6 im Anhang)

Linie	Linienlänge in km	mittl. HA in m	Taktfolge [min]			max. FB ^a	mittl. RG ^b in km/h	Höhen- differenz in m	mittl. Besetz. ^c in %	
			Mo-Fr HVZ	Sa NVZ	SoF					
<i>Trolleybuslinien (Doppelgelenkbus, Stadtverkehr)</i>										
31	10,8	409	7,5	7,5	7,5	10	12	18,0	44,5	18,3
32	10,8	433	6	7,5	7,5	10	14	19,4	82,3	18,8
<i>Trolleybuslinien (Gelenkbus, Stadtverkehr)</i>										
33	12,1	373	7,5	7,5	7,5	10	13	18,8	129,1	20,8
34	3,6	400	7	7,5	7,5	10	4	23,6	158,7	17,8
46	7,3	419	5	7,5	7,5	10	11	20,8	101,0	20,7
72	9,0	440	7,5	7,5	7,5	10	10	18,8	84,7	28,3
<i>Dieselbuslinien (Gelenkbus, Stadtverkehr)</i>										
61 ^d	7,4	434	6	7,5	7,5	10	9	20,6	30,0	18,5
63	2,7	322	7,5	7,5	7,5	10	4	20,4	14,6	15,7
69 ^e	4,1	508	7,5	7,5	7,5	10	5	22,2	76,2	17,7
75	4,7	359	7,5	7,5	7,5	10	6	17,5	24,7	13,4
80	11,7	417	6,7	7,5	7,5	10	13	19,6	124,5	22,1
94 ^e	4,4	403	15	15	15	30	3	23,1	14,6	25,3
<i>Dieselbuslinien (Solobus, Stadtverkehr)</i>										
67	5,1	389	7,5	7,5	7,5	10	6	21,8	25,4	19,1
70	3,5	389	10	10	10	10	3	22,3	71,1	17,1
76	2,1	384	10	15	30	-	3	16,7	25,6	14,1
77	2,5	378	10	20	20	20	2	24,1	44,2	15,3
89	11,9	457	15	15	15	15	6	20,0	110,2	27,0
<i>Dieselbuslinien (Solobus, Agglomerationsverkehr)</i>										
701	12,0	858	15	30	30	30	8	29,3	193,2	24,0
743	10,2	617	30	30	30	30	3	31,4	27,4	14,0

HA ... Haltestellenabstand, SoF ... Sonn- und Feiertage

^a Maximaler Fahrzeugbedarf (Abweichungen zum tatsächlichen Wert sind möglich, da die Wendezeiten nicht bekannt waren.)

^b Mittlere Reisegeschwindigkeit (Basis: Sollfahr- und Sollhaltezeiten)

^c Mittlere Besetzung, bezogen auf Sitz- und Stehplätze bei 4 Pers./m² (gesamter Betriebstag, Tagesart Montag-Freitag)

^d Die Linien 61 und 62 verlaufen zu einem grossen Teil auf demselben Linienweg, sodass beide hier zur Linie 61 zusammengefasst werden.

^e Zu bestimmten Zeiten erfolgt der Einsatz von Solobussen.

Quellen: Eigene Berechnungen (Linienlängen, mittlere Haltestellenabstände und mittlere Besetzung auf Basis von Stadt Zürich 2016, mittlere Reisegeschwindigkeiten und maximaler Fahrzeugbedarf auf Basis von Stadt Zürich 2015, Höhendifferenzen auf Basis der Höhenprofile in Abbildung A.6); Fahrplanbücher 2015 für die Stadt Zürich und das obere Glattal (Taktfolge)

6.1.2 Ergebnisse

Energiebedarf und Emissionen

Als erster Schritt bietet sich ein Vergleich der Linien unter Berücksichtigung des tatsächlichen Fahrzeugeinsatzes an. Die Abbildungen 6.1 und 6.2 zeigen sowohl die absoluten als auch die auf Fahrzeug- und Personenkilometer bezogenen spezifischen Werte des Energiebedarfs und der Emissionen. Bei den Linien 69 und 94 ist hier nur der Gelenkbuseinsatz berücksichtigt, der bei beiden Linien überwiegt. Damit werden zwar der absolute Energiebedarf sowie die absoluten Emissionen unterschätzt, die Vergleichbarkeit der spezifischen Werte wird aber gewahrt, denn sie beziehen sich damit auf nur eine Gefässgrösse.

Der absolute Energiebedarf (oberes Diagramm der Abbildung 6.1) spiegelt vor allem die Linienlänge und die Taktfolge wider: Je länger die Linie und je dichter die Taktfolge sind, desto höher ist der Energiebedarf, weil mehr Fahrzeugkilometer geleistet werden. Da ihre Taktfolgen ähnlich sind, wird der Energiebedarf der Gelenk- und Doppelgelenkbuslinien hauptsächlich durch deren unterschiedliche Linienlängen bestimmt, innerhalb der Solobuslinien ist die Variation der Taktfolgen hingegen grösser. Indirekt bildet sich auch die Traktionsart ab, denn während Linienlängen und Taktfolgen der Trolleybuslinien 31, 32 und 33 zwar denen der Dieselbuslinie 80 gleichen, verzeichnen sie jeweils einen nur etwas mehr als halb so grossen Primärenergiebedarf.

Mittels Division des absoluten Energiebedarfs durch die Fahrzeugkilometer erhält man den spezifischen Energiebedarf, welcher um die Einflüsse der betrieblichen Parameter bereinigt ist, dargestellt im mittleren Diagramm der Abbildung 6.1. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Linien – Fahrzeuge derselben Gefässgrösse vorausgesetzt – sind denn auch wesentlich geringer.

Das untere Diagramm zeigt schliesslich den auf Personenkilometer bezogenen spezifischen Energiebedarf, welcher vorrangig die Auslastung widerspiegelt. Je höher die mittlere Auslastung ist, desto geringer ist der spezifische Energiebedarf. Die Linien 72, 89 und 94 sind offensichtlich überdurchschnittlich ausgelastet, was sich mit einem Blick auf die Tabelle 6.1 bestätigen lässt.

Sämtliche zuvor getroffenen Aussagen gelten gleichermassen für die Emissionen (siehe Abbildung 6.2), weil diese – innerhalb der gleichen Traktionsart – proportional zum Energiebedarf sind. Es zeigt sich eindrucksvoll, wie niedrig die THG-Emissionen im Falle eines hohen Wasserkraftanteils bei der Stromerzeugung ausfallen. Im ungünstigsten Falle betragen die spezifischen THG-Emissionen des Trolleybusses 12 % derjenigen des Dieselbusses, im Mittel sind es sogar nur 6 %.

Betrachtet man die Stammlinien des Zürcher Stadtverkehrs (also alle in der Tabelle 6.1 aufgelisteten Linien mit Ausnahme der Linien 701 und 743), ergibt sich ein interessanter Vergleich, indem man die relativen Anteile der beiden Traktionsarten einander gegenüberstellt, wie dies in der Abbildung 6.3 gezeigt ist: Obwohl auf den sechs VBZ-Trolleybuslinien über drei Fünftel der Personen- und

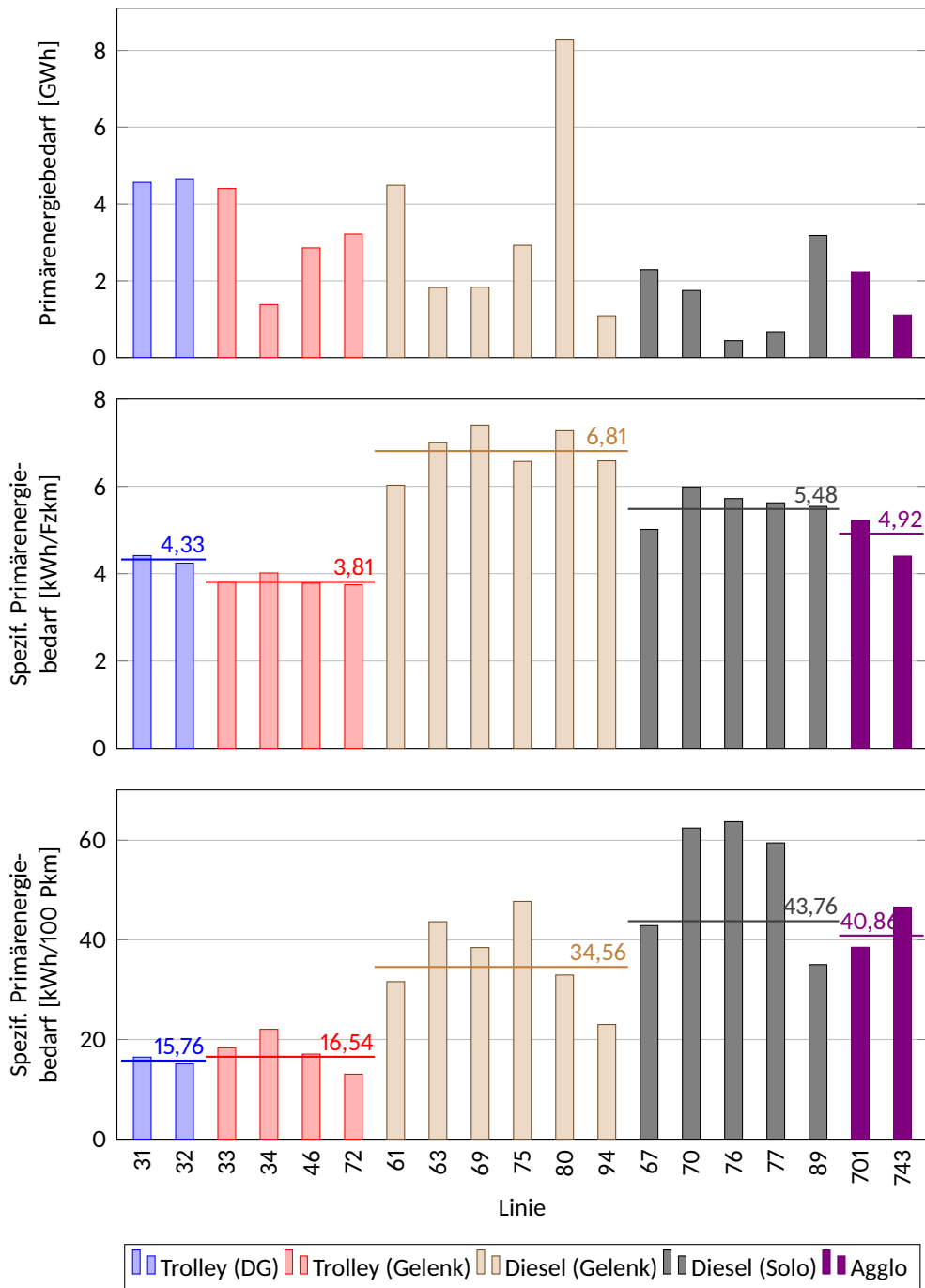


Abbildung 6.1: Energiebedarf ausgewählter VBZ-Buslinien für ein Betriebsjahr. Bei den spezifischen Werten sind ergänzend die gewichteten Mittelwerte angegeben. Mit «Agglo» sind Diesel-Solobuslinien im Agglomerationsverkehr bezeichnet. (Basis für Trolleybus: Strommix Schweiz, Quelle: Eigene Berechnungen)

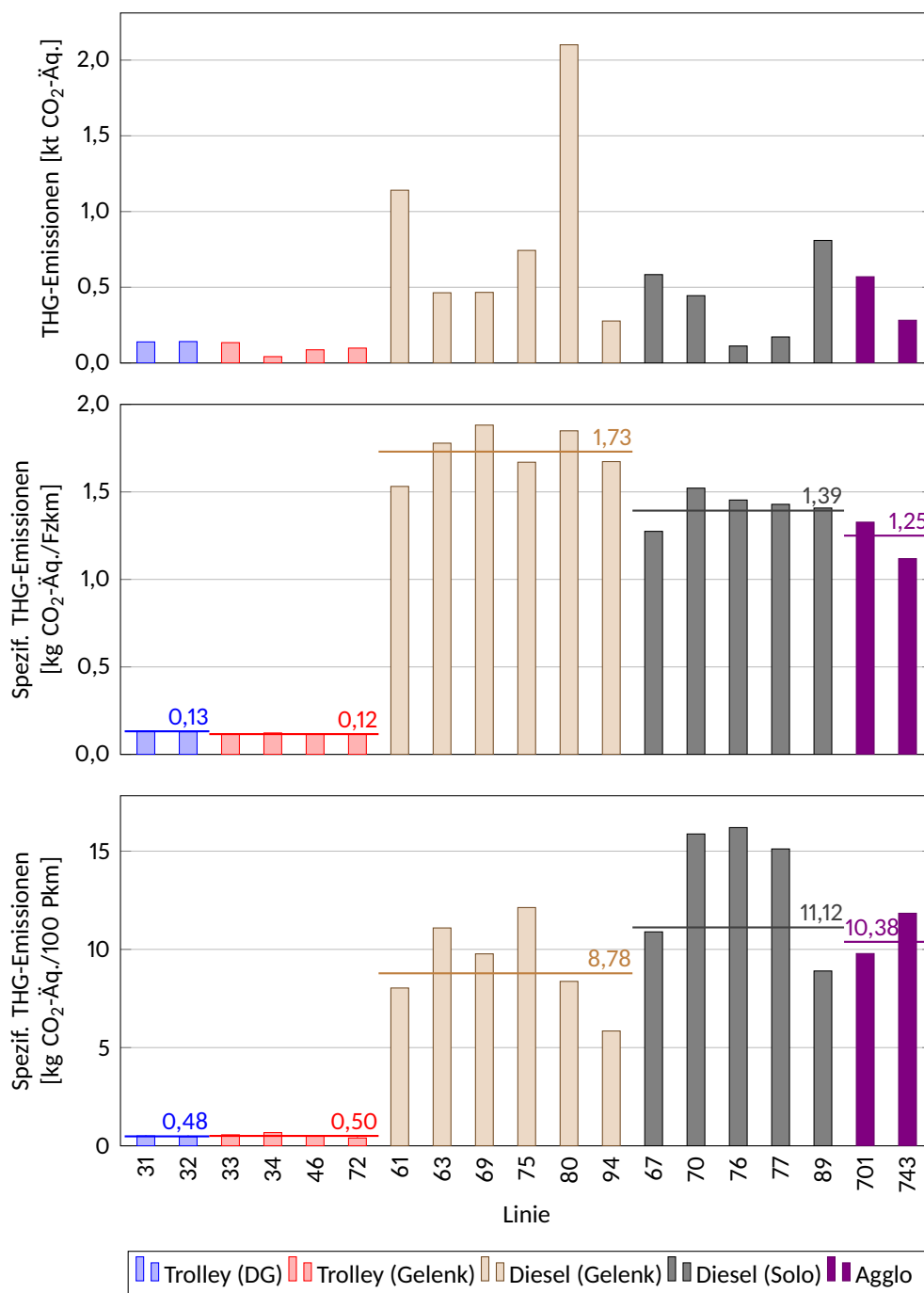


Abbildung 6.2: THG-Emissionen ausgewählter VBZ-Buslinien für ein Betriebsjahr. Bei den spezifischen Werten sind ergänzend die gewichteten Mittelwerte angegeben. Mit «Agglo» sind Diesel-Solobuslinien im Agglomerationsverkehr bezeichnet. (Basis für Trolleybus: Strommix Schweiz, Quelle: Eigene Berechnungen)

mehr als die Hälfte der Fahrzeugkilometer geleistet werden, verbrauchen Trolleybusse nur etwa 42 % der Primärenergie und verursachen nur 8 % der Treibhausgasemissionen des gesamten Stammnetzes des Stadtbusverkehrs. Der hohe Anteil an der Verkehrsleistung ist nicht durch das Antriebssystem bedingt, sondern beruht darauf, dass vorrangig die hochbelasteten Linien elektrifiziert wurden. Dass dies sinnvoll war (und nach wie vor ist), wird sowohl durch den niedrigen Energiebedarf als auch durch die geringen Emissionen bestätigt.

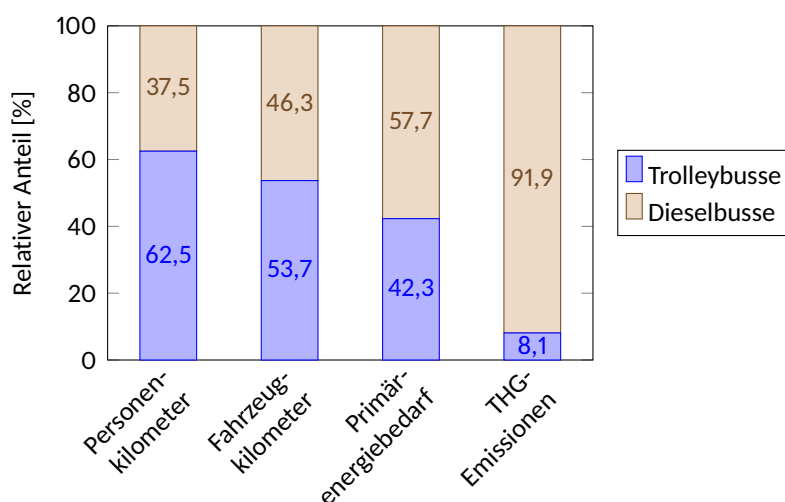


Abbildung 6.3: Relative Anteile von Diesel- und Trolleybussen an Verkehrsleistung, Energiebedarf und THG-Emissionen (Quelle: Eigene Berechnungen)

Vergleicht man den Energiebedarf der bestehenden Trolleybuslinien mit demjenigen eines hypothetischen Dieselbuseinsatzes (siehe Tabelle 6.2), so wird ersichtlich, dass durch den Trolleybuseinsatz jährlich etwa 22,3 GWh fossile Primärenergie eingespart sowie 10,4 kt Treibhausgasemissionen vermieden werden. Ist die – derzeit in Vorbereitung befindliche – Umstellung der Linien 69 und 80 auf elektrischen Betrieb abgeschlossen, so steigen die Werte auf 27,5 GWh sowie 12,8 kt jährlich. Würden ausserdem die übrigen neun Dieselbuslinien des Stammnetzes komplett auf Betrieb mit Parallelhybridbussen umgestellt, könnten pro Jahr zusätzlich 5,1 GWh fossile Primärenergie eingespart und weitere 1,2 kt THG-Emissionen vermieden werden. Rechnet man letztere Energieeinsparung auf Dieselkraftstoff ab Tankstelle um, so entspricht dies ungefähr 432'000 Litern Diesel. Das ist beachtlich, erreicht aber nicht die Grössenordnung, die bei einer Umstellung auf ein vollelektrisches System erreichbar ist. Die Überlegenheit der elektrischen Busse zeigt sich etwa dadurch, dass mit der Umstellung zweier Linien (entsprechend etwa 31 % der Dieselbus-Fahrzeugkilometer) auf elektrischen Betrieb nahezu die gleiche Energieeinsparung sowie mehr als die doppelte Emissionsreduktion im Vergleich zur Umstellung von neun Linien (mit rund 69 % der Dieselbus-Fahrzeugkilometer) auf Dieselhybridbusse erzielt wird.

Tabelle 6.2: Energieeinsparung und Emissionsreduktion durch den Einsatz (teil)elektrischer Antriebssysteme**1. Energieersparnis und Emissionsvermeidung durch Trolleybuseinsatz**

Linien	Primärenergiebedarf in MWh			THG-Emissionen in t CO ₂ -Äq.		
	Diesel	Trolley	Differenz	Diesel	Trolley	Differenz
31-34, 46 und 72	43'362	21'061	-22'301	11'019	643	-10'376
<i>Ersparnis</i>			51,4 %			94,2 %
69 und 80	10'103	5'161	-4'942	2'567	157	-2'410
<i>Ersparnis</i>			48,9 %			93,9 %

2. Einsatz von Parallelhybridbussen auf den übrigen Dieselbuslinien

Gefässgrösse	Primärenergiebedarf in MWh			THG-Emissionen in t CO ₂ -Äq.		
	Diesel	P-Hybrid	Differenz	Diesel	P-Hybrid	Differenz
Gelenkbusse	10'331	7'615	-2'702	2'625	2'013	-612
Solobusse	8'350	5'912	-2'438	2'122	1'531	-590
Summe	18'682	13'527	-5'154	4'747	3'545	-1'202
<i>Mögliche Ersparnis</i>			27,6 %			25,3 %

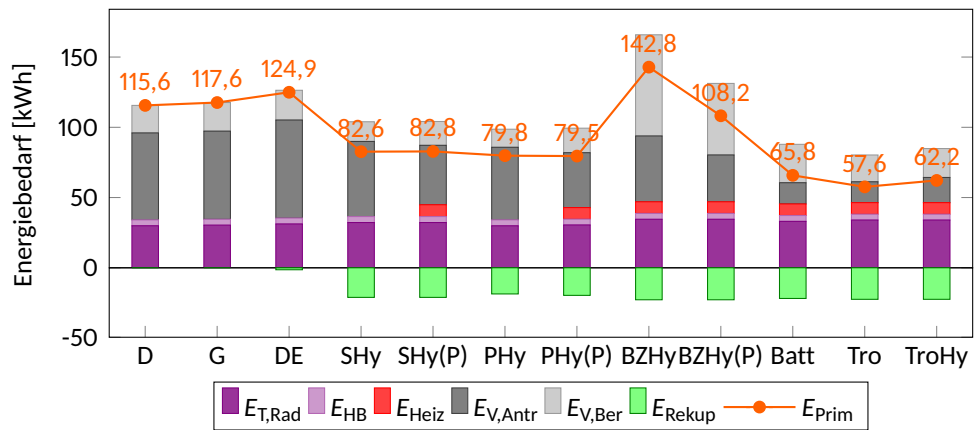
Quelle: Eigene Berechnungen

Vergleich der Antriebssysteme

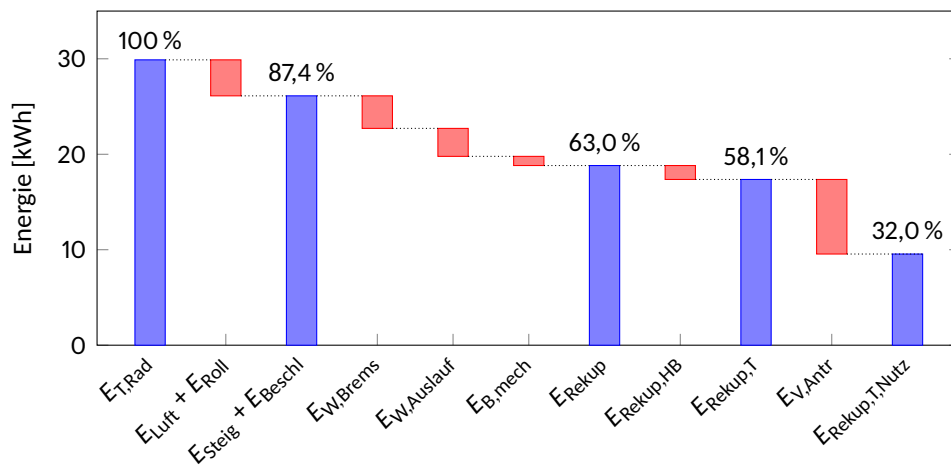
Aufschlussreich ist die Gegenüberstellung des Energiebedarfs der verschiedenen Antriebssysteme auf Basis der Linienparameter. Beispielhaft sollen hierfür die Linien 46 und 61 herangezogen werden, da sie einerseits die gleiche Linienlänge und ähnliche betriebliche Parameter aufweisen, sich andererseits aber im Höhenprofil unterscheiden.

In den Abbildungen 6.4 a sowie 6.5 a ist der Energiebedarf eines Umlaufs mit- samt dessen Aufteilung auf die wichtigsten «Verbraucher» dargestellt. Die Traktionsenergie am Rad $E_{T, \text{Rad}}$ als abgegebene Energie bildet die Basis und ist für alle Antriebssysteme nahezu identisch, die geringfügigen Abweichungen beruhen allein auf den unterschiedlichen Fahrzeugleermassen. Der Hilfsbetriebeenergiebedarf E_{HB} spiegelt nur den als konstant angenommenen Anteil (5 kW) wider, die Heizenergie E_{Heiz} ist gesondert ausgewiesen, sofern nicht die Motorabwärme dafür ausreicht. Vom Dieselbus bis zum Parallelhybridbus geht der grösste Energieanteil bei den Energiewandlungen im Antriebsstrang verloren ($E_{V, \text{Antr}}$). Bei den übrigen Antriebssystemen sind die Bereitstellungsverluste $E_{V, \text{Ber}}$ grösser oder zumindest etwa gleich gross. Wäre die Wasserstoffbereitstellung nicht so ineffizient, so würde der Primärenergiebedarf des Brennstoffzellen-Hybridbusses etwa dem der Dieselhybridbusse entsprechen. Sämtlichen bisher aufgezählten Anteilen, die bilanzseitig das Soll darstellen, steht auf der Habenseite die rekuperierte Energie E_{Rekup} gegenüber. Die Addition sämtlicher Anteile ergibt den Energiebedarf ab Primärenergie E_{Prim} .

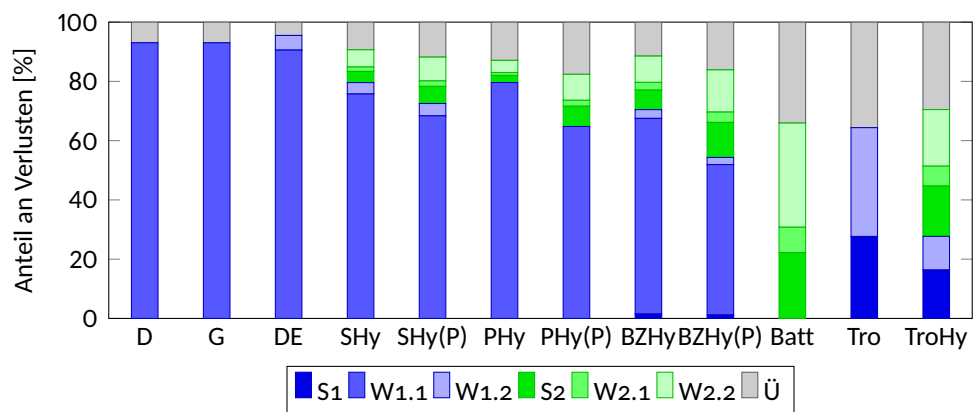
Hinsichtlich der Rekuperation ist bemerkenswert, wie gering der relative Anteil der schlussendlich wieder am Rad nutzbaren Energie ausfällt. Bezogen auf



a. Gesamtenergiebedarf

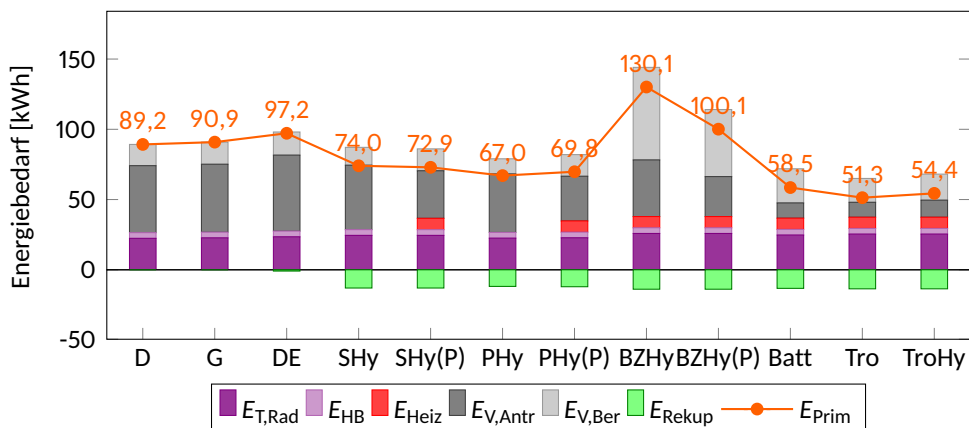


b. Rekuperation: Wieder am Rad nutzbarer Anteil der Traktionsenergie (Beispiel: Parallelhybridbus)

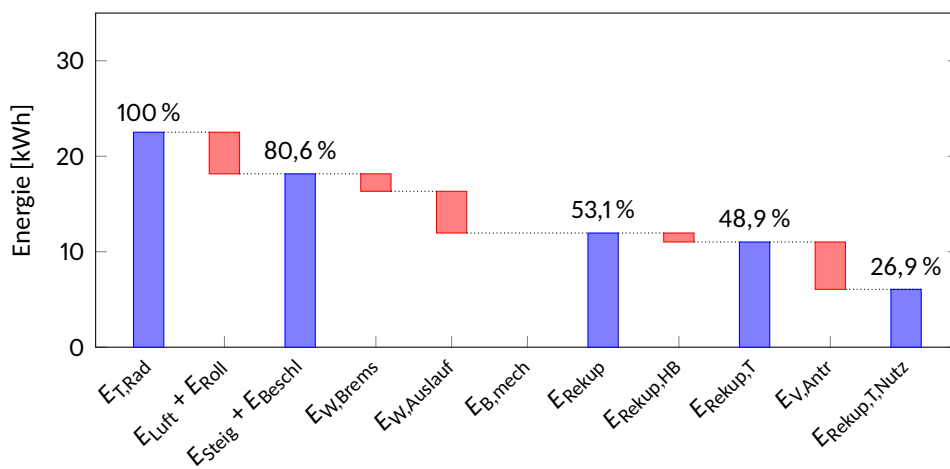


c. Aufteilung der Verluste im Antriebsstrang auf die Subsysteme

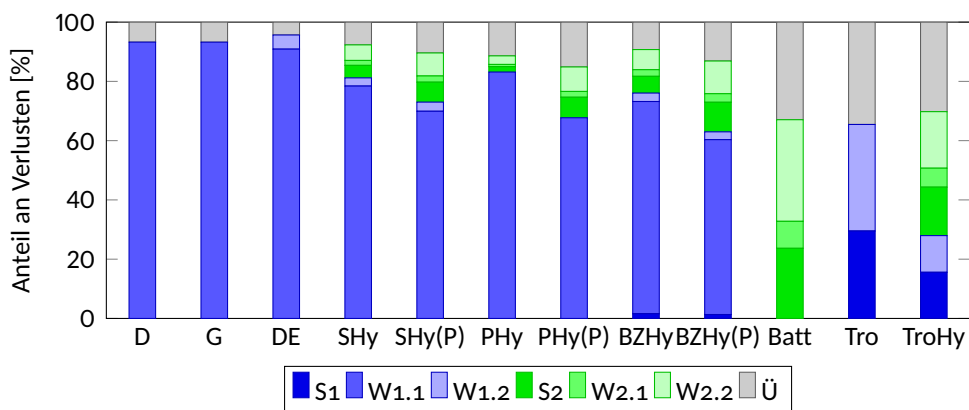
Abbildung 6.4: Gesamtenergiebedarf, Anteil der Rekuperation und Aufteilung der Verluste am Beispiel der Linie 46. Randbedingungen: 1 Umlauf (Länge 14,7 km), Gelenkbus, mittlere Besetzung 22,4 %, Aussentemperatur 10,1 °C, Strommix Schweiz



a. Gesamtenergiebedarf



b. Rekuperation: Wieder am Rad nutzbarer Anteil der Traktionsenergie (Beispiel: Parallelhybridbus)



c. Aufteilung der Verluste im Antriebsstrang auf die Subsysteme

Abbildung 6.5: Gesamtenergiebedarf, Anteil der Rekuperation und Aufteilung der Verluste am Beispiel der Linie 61. Randbedingungen: 1 Umlauf (Länge 14,8 km), Gelenkbus, mittlere Besetzung 20,6%, Aussentemperatur 10,1 °C, Strommix Schweiz

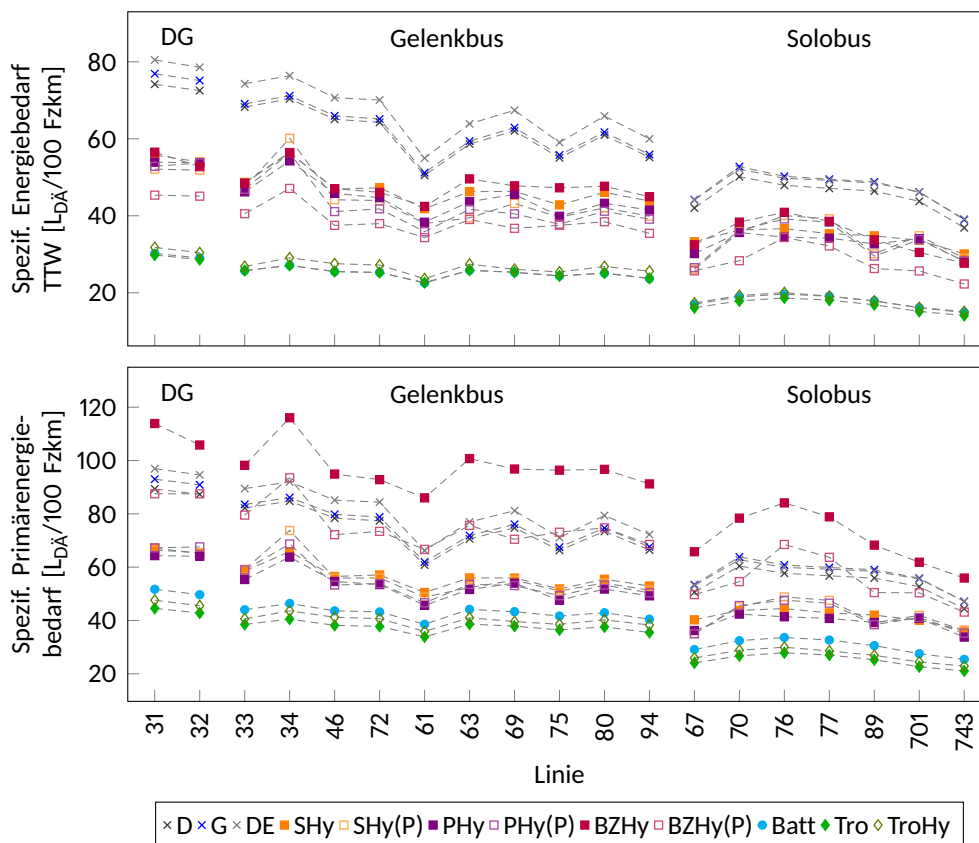


Abbildung 6.6: Spezifischer Energiebedarf aller Antriebssysteme auf den untersuchten VBZ-Linien (Primärenergiebedarf: Strommix Schweiz; DG ... Doppelgelenkbus)

die Traktionsenergie am Rad können nur ein Drittel (Linie 46) oder nur etwa ein Viertel (Linie 61) davon wieder für den Antrieb genutzt werden, wie die Abbildungen 6.4 b und 6.5 b zeigen. Nicht wiedergewinnen lassen sich die Energieanteile, die während Beschleunigung und Beharrungsfahrt zur Überwindung des Luft- und Rollwiderstands aufgewendet werden mussten ($E_{\text{Luft}} + E_{\text{Roll}}$). Beide Fahrwiderstände – sowie der Steigungswiderstand, sofern er bremsend wirkt – können auch während des Bremsvorgangs nicht zurückgewonnen werden ($E_{W,\text{Brems}}$). Ebenfalls «verloren» sind die kinetische Energie, die in den Auslaufphasen von den Fahrwiderständen aufgezehrt wurde ($E_{W,\text{Auslauf}}$) und die durch mechanisches Bremsen in Wärme umgewandelte Energie $E_{B,\text{mech}}$. Der verbleibende Anteil E_{Rekup} dient zu einem kleinen Teil der Versorgung der Hilfsbetriebe (inklusive der zugehörigen Verluste). Erst der nun noch übrige Anteil $E_{\text{Rekup,T}}$ steht für die Traktion zur Verfügung. Er muss allerdings zwei Mal den gesamten Antriebsstrang passieren, bis er wieder am Rad genutzt werden kann ($E_{\text{Rekup,T,Nutz}}$), was nochmals etwa die Hälfte der Energie aufzehrt. Dennoch trägt die Rekuperation wesentlich zur Einsparung von Energie bei, denn dieser eingesparte Anteil muss nicht die gesamte Kette ab Primärenergie durchlaufen.

Trotz der Unterschiede beider Linien hinsichtlich Energiebedarf und Rekuperation sind die relativen Anteile der Subsysteme des Antriebsstrangs an den Verlusten nahezu identisch (siehe Abbildungen 6.4 c und 6.5 c). Bei den nicht- und teilelektrischen Antriebssystemen ist es wenig überraschend das Subsystem $W_{1.1}$, also der Verbrennungsmotor oder das Brennstoffzellensystem, das den höchsten Anteil an den Verlusten verursacht. Beim Batteriebus fallen hingegen in der Kette Elektromotor \rightarrow Übertragung ($W_{2.2} \rightarrow \ddot{U}$) mit über zwei Dritteln die meisten Verluste an – wenn auch in absoluten Zahlen gesehen auf wesentlich niedrigerem Niveau als bei den thermischen Energiewandlern. Beim Trolleybus wiederum entfallen immerhin knapp 30 % der (verhältnismässig geringen) Verluste auf die Fahrleitung.

Vergleicht man den Energiebedarf sämtlicher Antriebssysteme auf allen untersuchten Linien, wie es die Abbildung 6.6 zeigt, so ergibt sich eine gewisse Gruppierung. Den höchsten TTW-Energiebedarf haben, wenig überraschend, der DE-, Gas- und Dieselbus. Im Mittelfeld finden sich die Hybridbusse, während Trolley-Hybrid-, Batterie- und Trolleybus die Gruppe mit dem geringsten Energiebedarf bilden. Die auf dem Primärenergiebedarf basierende Betrachtung ändert daran nichts Wesentliches, da der zu Grunde liegende Schweizer Strommix insgesamt eine recht hohe Effizienz bei den Energiewandlungsprozessen aufweist. Die Ausnahme bildet der Brennstoffzellen-Hybridbus, da die hier angenommene Erzeugung des Wasserstoffs mittels Elektrolyse energetisch recht ineffizient ist. Allerdings ist zu beachten, dass gemäss der Vorgabe die sogenannten «erneuerbaren» Energien (mit der jeweiligen Aufteilung gemäss dem ausgewählten Strommix) als Primärenergie fungieren, wodurch sich, zumindest im Vergleich zur fossilen Primärenergie, der höhere Energiebedarf etwas relativiert. Im Sinne einer effizienten Energieanwendung wäre es dennoch erstrebenswert, diesen Verlustanteil zu vermeiden, indem die elektrische Energie möglichst direkt genutzt wird. Genau dies geschieht, wenn man den Brennstoffzellen-Hybridbus als Plug-In-Hybrid betreibt: Die Energieeffizienz verbessert sich durch die direkte Nutzung der elektrischen Energie merklich.

Infrastruktur für Batteriebusse

Als Argument für den Batteriebus wird gern herangezogen, dass auf eine Fahrleitungsanlage verzichtet werden könne. Hierbei wird jedoch ebenso gern ausgeblendet, dass auch Batteriebusse eine Energieversorgungsinfrastruktur in Form von Ladestationen benötigen, die ebenfalls erst errichtet werden müssen, was naturgemäss mit Kosten verbunden ist. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang, wie viele Ladestationen überhaupt benötigt werden. Ein Ansatz für eine erste Grobabschätzung soll hier vorgestellt werden.

Ausgangspunkt ist die Annahme, dass die während eines Umlaufs benötigte Energie innerhalb dieses Umlaufs auch vollständig wieder zugeführt werden soll. Auf dem Fahrzeug ist also eine eher «kleine», dafür aber leichte Batterie installiert. Zuerst ist näherungsweise die für einen Umlauf benötigte Ladezeit t_{Lad}

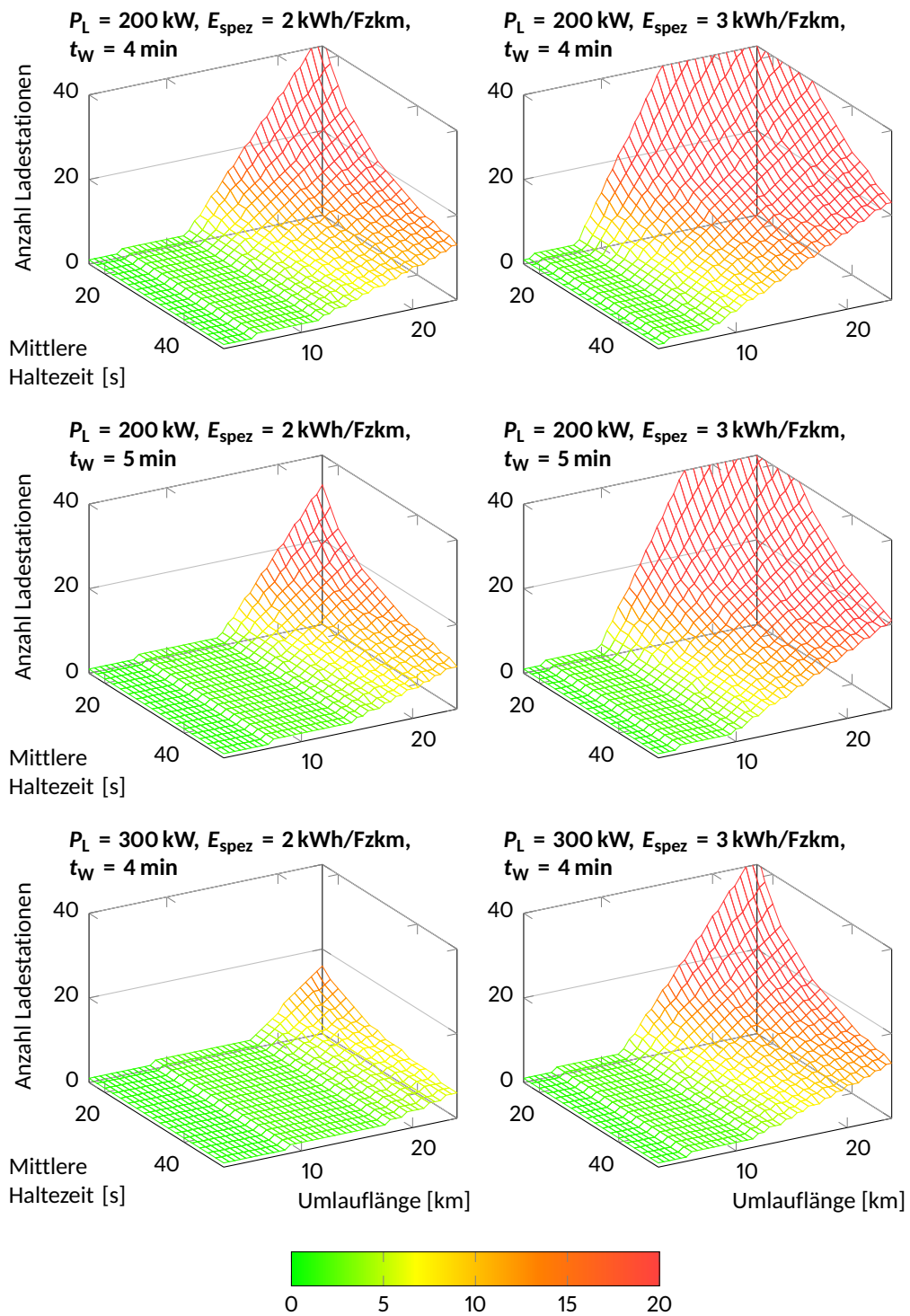


Abbildung 6.7: Abschätzung der Anzahl benötigter Batteriebus-Ladestationen. Annahmen: Kontaktzeit 2 s, Wirkungsgrad der Batterie 0,95 (Quelle: Eigene Berechnungen)

(in Sekunden) mittels

$$t_{\text{Lad}} = \frac{E_{\text{spez}} \cdot l_{\text{U}}}{\eta_{\text{Batt}}^2 \cdot P_{\text{Lad}}} \cdot 3600 \quad (6.1)$$

zu berechnen, wobei die folgenden Grössen einfließen:

- E_{spez} spezifischer Energiebedarf in Kilowattstunden je Fahrzeugkilometer,
- l_{U} Länge eines Umlaufs in Kilometern,
- η_{Batt} Wirkungsgrad der Batterie sowie
- P_{Lad} Ladeleistung einer Ladestation in Kilowatt.

Sämtliche Ladestationen werden als identisch angesehen, haben also dieselbe Ladeleistung. Der Wirkungsgrad der Batterie geht quadratisch ein, da sowohl beim Laden als auch beim Entladen Verluste auftreten; betrieblich nutzbar ist nur die Energie, die der Batterie auch entnommen werden kann. Die Anzahl der Ladestationen n_{Lad} ergibt sich dann zu

$$n_{\text{Lad}} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } t_{\text{Lad}} \leq t_{\text{W}} - 2t_{\text{K}} \\ 2 & \text{wenn } t_{\text{W}} - 2t_{\text{K}} < t_{\text{Lad}} \leq 2(t_{\text{W}} - 2t_{\text{K}}) \\ 2 + \frac{t_{\text{Lad}} - 2(t_{\text{W}} - 2t_{\text{K}})}{t_{\text{H,m}} - 2t_{\text{K}}} & \text{wenn } t_{\text{Lad}} > 2(t_{\text{W}} - 2t_{\text{K}}) \end{cases} \quad (6.2)$$

mit

- t_{W} Wendezeit je Endhaltestelle in Sekunden,
- $t_{\text{H,m}}$ mittlere Haltezeit an den Zwischenhaltestellen in Sekunden und
- t_{K} Kontaktzeit in Sekunden.

Unter der Kontaktzeit wird die Zeit verstanden, die zwischen dem Anhalten des Fahrzeugs und dem Beginn des Ladevorgangs (Herstellung des Kontakts) und zwischen Ende des Ladevorgangs und der Abfahrt (Trennen des Kontakts) vergeht. Der Wert von n_{Lad} ist schliesslich noch auf die nächstgrössere ganze Zahl aufzurunden. Die auf diese Weise abgeschätzte Anzahl der Ladestationen ist eher als eine Obergrenze anzusehen. Dimensioniert man die Batterie grosszügiger, so muss die verbrauchte Energie nicht in jedem Umlauf vollständig ergänzt werden, wodurch weniger Ladestationen benötigt werden. Reserven sind auch nötig, um die im Falle von Verspätungen reduzierten Ladezeiten (wenn die Wendezeit zum Verspätungsabbau verkürzt wird) zu kompensieren.

Stellt man die Ergebnisse der Formel (6.2) in Abhängigkeit von der mittleren Haltezeit und der Umlauflänge grafisch dar (Abbildung 6.7), sieht man, dass ab einer bestimmten Umlauflänge die Anzahl benötigter Ladestationen rasch anwächst, wobei sich der – entweder bereits bekannte oder mit dem Berechnungsmodell zu ermittelnde – spezifische Energiebedarf der zu untersuchenden Linie massgeblich auswirkt. Dieser Energiebedarf kann jedoch kaum beeinflusst werden, sodass vor allem die Ladeleistung und die Wendezeit als die bestimmenden Parameter fungieren. Da eine Erhöhung der Wendezeit unmittelbar zu einem Fahrzeugmehrbedarf führt, möchte man dies aus Betreibersicht möglichst vermeiden. Somit bleibt nur die Wahl einer höheren Ladeleistung, die jedoch an

technische Grenzen stossen kann. Entscheidend ist, dass die Endhaltestellen mit Ladestationen ausgerüstet werden, um die Wendezeiten als Ladezeit nutzen zu können, denn während eines vergleichsweise kurzen Halts an einer Zwischenhaltestelle kann nur wenig Energie zugeführt werden.

Tabelle 6.3: Rechnerische Anzahl benötigter Ladestationen bei Umstellung der VBZ-Dieselsbuslinien auf Batteriebusbetrieb

Linie	Umlauf- länge in km	Spez. Ener- giebedarf in kWh/Fzkm	Anzahl Lade- stationen bei P_{Lad}		Werte je Betriebstag	
			200 kW	300 kW	mLL ^a in km	Energiebedarf in kWh
<i>Gelenkbusse:</i>						
61	14,8	2,23	10	2	256	573
63	5,5	2,56	2	1	186	475
69	8,1	2,51	2	2	195	489
75	9,3	2,41	2	2	216	520
80	23,3	2,49	29	14	263	654
94	8,9	2,35	2	2	196	460
<i>Solobusse:</i>						
67	10,1	1,69	2	1	233	392
70	7,0	1,88	2	1	266	500
76	4,2	1,95	1	1	95	186
77	4,9	1,89	1	1	200	379
89	23,8	1,77	17	6	248	439
701	24,0	1,59	14	4	361	576
743	20,3	1,47	7	2	345	508
Summe:			91	39		

^a Mittlere Laufleistung je Fahrzeug

Quelle: Eigene Berechnungen (Wendezeit je Endhaltestelle 4 min, mittlere Haltezeit 30 s, Kontaktzeit 2 s, Wirkungsgrad der Batterie 0,95)

Wendet man die Formel (6.2) auf die VBZ-Dieselsbuslinien an, so ergibt sich das in der Tabelle 6.3 gezeigte Bild. Man erkennt, dass vor allem bei kürzeren Linien mit einer Umlauflänge bis etwa 10 km zwei Ladestationen genügen. Dies liegt daran, dass hier die (angenommenen) Wendezeiten im Verhältnis zur Fahrzeit viel stärker ins Gewicht fallen. Bei längeren Linien nimmt mit zunehmender Umlauflänge die benötigte Anzahl Ladestationen schnell zu, wie schon die Abbildung 6.7 gezeigt hat. Hier kann durch die Wahl einer höheren Ladeleistung der Bedarf stark reduziert werden: Während bei 200 kW Ladeleistung rein rechnerisch 91 Ladestationen benötigt würden, käme man bei 300 kW mit nur 39 Stück aus. Die tatsächlich erforderliche Anzahl ist geringer, da sich Linienwege abschnittsweise überlagern und bestimmte Haltestellen von mehreren Linien bedient werden. An gemeinsamen Endhaltestellen dürfte hingegen für jede Linie eine eigene Ladestation erforderlich sein, da sich ihre Wendezeiten sehr wahrscheinlich überschneiden.

Am einfachsten wäre es, wenn auf Ladestationen entlang der Strecke verzichtet und stattdessen über Nacht während der Abstellzeit im Betriebshof aufgeladen werden könnte. Wie die Werte für den täglichen Energiebedarf in der letzten Spalte in der Tabelle 6.3 zeigen, liegt der Energiebedarf je Linie und Betriebstag zwischen etwa 400 und 600 kWh. Bei den heute üblichen Energiedichten um 100 Wh/kg wöge schon eine Batterie für 400 kWh nutzbare Energie mindestens 5 t, wenn man annimmt, dass der Ladehub zum Erzielen einer längeren Batterielebensdauer auf 80 % beschränkt ist. Angesichts dieser Umstände ist der Ansatz der Nachtladung zumindest für die VBZ-Linien bis auf Weiteres nicht praktikabel. Falls dies irgendwann doch möglich sein sollte, bestünde eine weitere Herausforderung darin, die entsprechende Ladeleistung im Betriebshof zur Verfügung zu stellen. Die betrachteten Linien erfordern 40 Gelenk- und 20 Solobusse (ohne Linien 701 und 743, siehe Tabelle 5.7), es müssen in der Betriebspause etwa 30 MWh Energie aufgeladen werden. Dafür stehen bei einer Betriebsdauer von 19 h bestenfalls 4 h zur Verfügung, sodass es einer Ladeleistung von immerhin 7,5 MW bedarf, im Mittel also 125 kW je Fahrzeug.

6.2 Generische Fallstudien

6.2.1 Vorgehensweise und Eingangsgrößen

Die Untersuchung realer Linien ergibt zwar anschauliche Ergebnisse, es ist aber schwierig, daraus die auf den Energiebedarf wirkenden Einflussfaktoren abzuleiten. Aus diesem Grunde bietet es sich an, den Einfluss verschiedener Parameter anhand der Berechnung fiktiver Linien zu ermitteln. Dieser Ansatz figuriert hier deshalb unter dem Titel «Generische Fallstudien», mit denen insgesamt fünf Parameter untersucht werden sollen.

Um eine einheitliche Vergleichsbasis zu gewährleisten, wird die Linienlänge auf 5 km (Länge des Umlaufs also 10 km) festgelegt, wobei die Eingangsgrößen für beide Fahrtrichtungen stets identisch sind. Um die Überlagerung der Auswirkungen mehrerer gleichzeitiger Änderungen auszuschliessen, wird jeweils nur ein Parameter variiert und danach für alle Antriebsstrangkonfigurationen der Energiebedarf für einen Umlauf ermittelt:

1. Halteabstand mit zusätzlichem Parameter
 - (a) Auslauf aktiv oder
 - (b) Auslauf inaktiv;
2. Neigung mit zusätzlichem Parameter *Höhenprofil*, das
 - (a) einen Neigungsabschnitt oder
 - (b) zwei Neigungsabschnitte je Richtung aufweist;
3. Besetzung des Fahrzeugs;
4. Aussentemperatur.

Die übrigen Eingangsgrößen, deren Werte in der Tabelle 6.4 zusammengestellt sind, werden jeweils unverändert belassen. Die geringfügige Variation der Umlauflänge bei der 1. Fallstudie ergibt sich durch die verschiedenen Halteabstände, welche nicht immer einem ganzzahligen Teiler der Umlauflänge von 10 km entsprechen. Auch hier kommen die generischen Fahrzeuge, deren Parameter in den Tabellen 4.1 und 4.2 zusammengefasst sind, zum Einsatz. Bei den Plug-In-Hybriden wird angenommen, dass sie an beiden Endhaltestellen sowie an zwei Zwischenhaltestellen je Richtung, angeordnet nach je etwa einem Drittel der Fahrstrecke, mit 200 kW aufgeladen werden, sofern ein Bedarf dafür besteht. Für den Trolley-Hybrid wird vorgegeben, dass die Hälfte der Strecke als mit Fahrleitung ausgerüstet ist. Es wird bei Trolley- und Trolley-Hybridbus von einer vollständigen Rekuperation ausgegangen; der Einfluss des Rekuperationsgrades wird im Abschnitt 6.2.6 betrachtet.

Tabelle 6.4: Eingangsgrößen für die Berechnung der generischen Fallstudien (FS)

Eingangsgrösse	Einheit	1. FS	2. FS	3. FS	4. FS
Länge eines Umlaufs	km	9,8 ... 10,4	10,2	10,2	10,2
Halteabstand	m	100 ... 1000	300	300	300
Max. Neigung	%	0	0 ... 12	0	0
Nutzung des Auslaufs		ja, nein	nein	nein	nein
Relative Besetzung	%	20	20	0 ... 100	20
Aussentemperatur	°C	20	20	20	-10 ... 20
Hilfsbetriebeleistung	kW	5	5	5	$5 + P_{\text{Heiz}}$
Höchstgeschwindigkeit	km/h		50		
Masse je Fahrgast	kg		70		
Haltezeit je Haltestelle	s		20		
Wendezeit je Endpunkt	min		3		
Max. Beschleunigung	m/s ²		1,4		
Bremsverzögerung	m/s ²		0,8		

Mit P_{Heiz} ist die elektrische Heizleistung in Abhängigkeit von der Aussentemperatur bezeichnet (siehe Abschnitt 4.6.4). Eine allfällig erforderliche Leistung der Öl-Zusatzheizung wird gesondert berücksichtigt.

Die relative Besetzung bezieht sich auf die Summe der Sitz- und Stehplätze, wobei für die Bestimmung der Stehplatzzahl eine Stehflächenbelegung von 4 Personen je Quadratmeter angenommen wird. Abhängig von der Gefässgrösse ergeben sich dabei Unterschiede in der Zuladung und bei den Anteilen der belegten Sitz- und Stehplätze, wie die Tabelle 6.5 zeigt. Bezieht man die hier meist zu Grunde gelegte Besetzung von 20 % nur auf die Sitzplätze, ergäbe sich ein Belegungsgrad von etwa 40 bis 50 %. Solche vergleichsweise niedrigen Werte sind im öffentlichen Verkehr leider häufiger anzutreffen.

Die Variation der Heizleistung bei der 4. Fallstudie wird durch den Parameter Aussentemperatur bestimmt. Da der Leistungsbedarf für die Klimatisierung niedriger als für das Heizen ist (siehe auch Abbildung 4.21), konzentriert sich die

Tabelle 6.5: Aufteilung der relativen Besetzung auf die Sitz- und Stehplätze

Rel. Besetzung	Midibus				Solobus			
	Pers.	t	Sitzpl.	Stehpl.	Pers.	t	Sitzpl.	Stehpl.
10 %	4,7	0,33	19 %	0 %	6,4	0,45	21 %	0 %
20 %	9,4	0,66	38 %	0 %	12,8	0,90	43 %	0 %
40 %	18,8	1,32	75 %	0 %	25,6	1,79	85 %	0 %
60 %	28,2	1,97	100 %	15 %	38,4	2,69	100 %	25 %
80 %	37,6	2,63	100 %	57 %	51,2	3,58	100 %	62 %
100 %	47,0	3,29	100 %	100 %	64,0	4,48	100 %	100 %

Rel. Besetzung	Gelenkbus				Doppelgelenkbus			
	Pers.	t	Sitzpl.	Stehpl.	Pers.	t	Sitzpl.	Stehpl.
10 %	10,7	0,75	24 %	0 %	15,4	1,08	26 %	0 %
20 %	21,4	1,50	48 %	0 %	30,8	2,16	51 %	0 %
40 %	42,8	3,00	95 %	0 %	61,6	4,31	100 %	2 %
60 %	64,2	4,49	100 %	31 %	92,4	6,47	100 %	35 %
80 %	85,6	5,99	100 %	66 %	123,2	8,62	100 %	67 %
100 %	107,0	7,49	100 %	100 %	154,0	10,78	100 %	100 %

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Sitz- und Stehplätze gemäss Tabelle 4.1, Masse je Fahrgast 70 kg

Untersuchung auf die Heizenergie, also auf Aussentemperaturen von nicht mehr als 20 °C.

In den nächsten Abschnitten werden die wichtigsten Ergebnisse der vier generischen Fallstudien vorgestellt. Zur besseren Veranschaulichung der Unterschiede werden die wichtigsten Ergebnisse für jede Fallstudie in einheitlicher Form dargestellt, wofür die folgenden Grössen ausgewählt wurden:

- Energiebedarf TTW und
- Primärenergiebedarf, beide als spezifische Grösse in Litern Dieseläquivalent je 100 Fahrzeugkilometer (der Umrechnungsfaktor beträgt einheitlich 9,91 kWh/l);
- relativer Primärenergiebedarf und
- relative THG-Emissionen, beides bezogen auf das Referenzsystem Dieselbus.

Diese vier Grössen sind in einer Abbildung je Fallstudie zusammengefasst. Ergänzt werden diese durch Darstellungen des Energiebedarfs relativ

- zum Halteabstand von 300 m (1. FS),
- zur ebenen Strecke (2. FS),
- zum leeren Fahrzeug (3. FS) sowie
- zur Aussentemperatur von 20 °C (4. FS).

Aus diesen Darstellungen lässt sich die relative Veränderung des Energiebedarfs direkt ablesen. Bei Bedarf werden die obigen Darstellungen durch weitere Be-

trachtungen ergänzt. Sämtliche Diagramme zeigen jeweils die berechneten Datenpunkte, welche zur Verbesserung der Lesbarkeit mittels Linien derselben Farbe verbunden sind. Diese Linien stellen keine Interpolation von Zwischenwerten dar und dürfen somit nicht zur Ableseung von Werten herangezogen werden.

6.2.2 Erste Fallstudie: Halteabstand und Auslauf

Einfluss des Halteabstands auf den Energiebedarf

Die Häufigkeit der Haltevorgänge, also der (mittlere) Halteabstand, hat einen erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf. Je häufiger gehalten wird, desto häufiger muss wieder angefahren werden, desto höher ist der Energiebedarf und desto niedriger ist auch die Reisegeschwindigkeit. Dies erklärt auch das scheinbar paradoxe Ergebnis, dass der Energiebedarf mit steigender Reisegeschwindigkeit abnimmt, denn die höhere Geschwindigkeit liegt allein in der geringeren Zahl der Halte begründet. Den Zusammenhang zwischen Halteabstand und Reisegeschwindigkeit veranschaulicht die Abbildung 6.8.

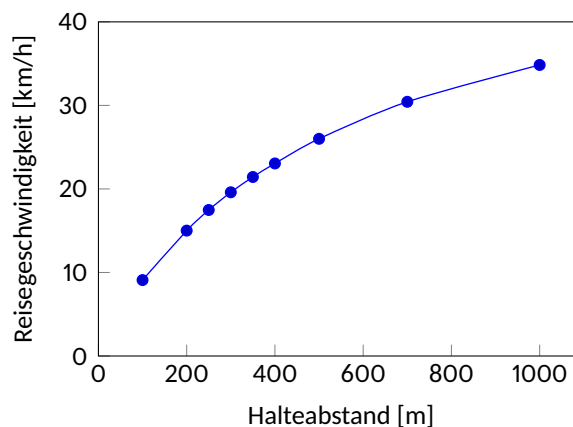


Abbildung 6.8: Abhängigkeit der Reisegeschwindigkeit vom Halteabstand. Annahmen: Gelenkbus, Besetzung 20 %, ebene Strecke, Höchstgeschwindigkeit 50 km/h, Haltezeit je Haltestelle 20 s

Um den Berechnungsaufwand in Grenzen zu halten, wurden anfangs nur die Halteabstände von 100, 200, 300, 400, 500, 700 und 1000 m berechnet. Da im Bereich zwischen 200 und 400 m der Einfluss der Auslaufnutzung besonders deutlich hervortritt, wurden zusätzlich noch die Halteabstände 250 und 350 m einbezogen. Bei Halteabständen von 200 m oder weniger wird die Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h nicht erreicht und somit auch kein Auslaufabschnitt eingelegt, auf eine feinere Unterteilung konnte in diesem Bereich also verzichtet werden.

Die Abbildung 6.9 fasst die wichtigsten Ergebnisse am Beispiel des Gelenkbusses zusammen. Der abnehmende Energiebedarf bei zunehmendem Halteabstand kann in den oberen vier Diagrammen gut nachvollzogen werden. Hierbei

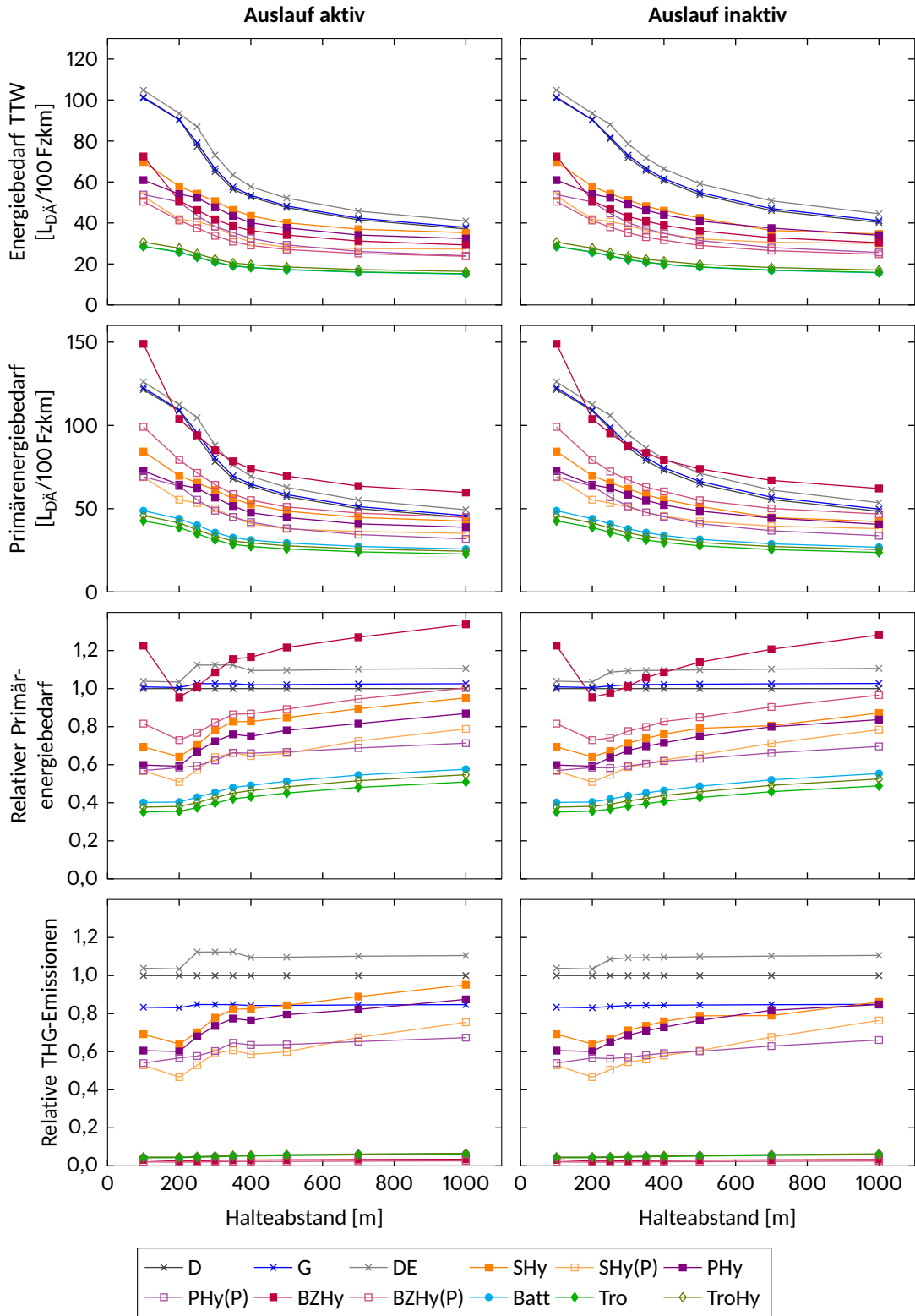


Abbildung 6.9: Einfluss des Halteabstands auf Energiebedarf und Emissionen (Fahrzeug: Gelenkbus, Strommix: Erzeugung Schweiz)

wirken zwei Faktoren: Je grösser der Halteabstand wird, desto geringer ist die Anzahl der Beschleunigungsvorgänge. Zugleich verlängert sich die – im Vergleich zur Beschleunigung eine viel geringere Antriebsleistung benötigende – Beharrungsphase, wodurch sie zunehmend den Energiebedarf bestimmt. Auf ebener Strecke konvergiert dieser gegen den zur Überwindung des Roll- und Luftwiderstandes erforderlichen Energiebedarf bei der zulässigen Höchstgeschwindigkeit.

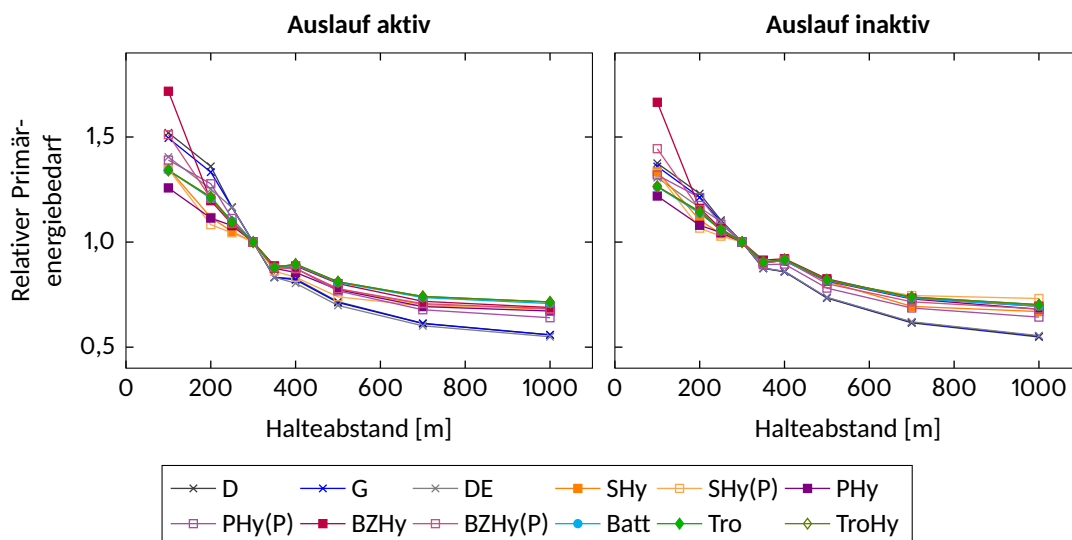


Abbildung 6.10: Energiebedarf relativ zum Halteabstand 300 m (Fahrzeug: Gelenkbus, Strommix: Erzeugung Schweiz)

Vergleicht man den Primärenergiebedarf mit dem TTW-Energiebedarf, fällt auf, dass der Brennstoffzellen-Hybridbus auf der Systemebene *Fahrzeug* zwar gut abschneidet, indem er sogar die Dieselhybridbusse unterbietet. Auf Primärenergie bezogen verzeichnet er hingegen meist den höchsten Energiebedarf, was allein an der energetisch ineffizienten Bereitstellungskette des Wasserstoffs liegt. Setzt man den Primärenergiebedarf aller Antriebsstrangkonfigurationen ins Verhältnis zum Energiebedarf des Dieselbusses, ist die Energieeffizienz der vollelektrischen Antriebssysteme augenfällig: Beim Schweizer Strommix benötigen Trolley- und Batteriebus, vollständige Rekuperation vorausgesetzt, höchstens halb so viel Energie wie der Dieselbus. Weiterhin wird deutlich, dass der Vorsprung insbesondere der teilelektrischen Antriebssysteme mit zunehmendem Halteabstand schrumpft, was durch den abnehmenden Einfluss der Rekuperation bedingt ist (siehe Abschnitt 6.2.7). Dies zeigt, dass Dieselhybridbusse bevorzugt im Stadtverkehr eingesetzt werden sollten, um deren Einsparpotenzial möglichst gut auszunutzen. Dennoch sind sie selbst bei einem Halteabstand von 1000 m gegenüber dem Dieselbus noch immer leicht im Vorteil.

Vergleicht man die Treibhausgasemissionen, ist augenfällig, welchen Bedeutung dem Strommix zukommt. Die unteren beiden Diagramme in der Abbildung 6.9 zeigen, dass die vollelektrischen Antriebssysteme sowie der Brennstoff-

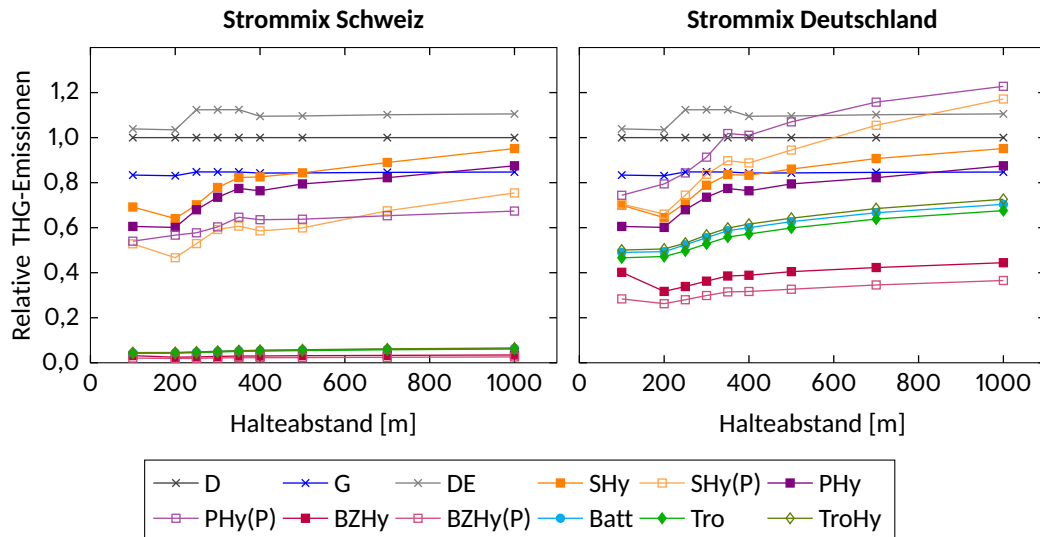


Abbildung 6.11: Einfluss des Strommixes auf die THG-Emissionen relativ zum Dieselbus (Fahrzeug: Gelenkbus, Auslauf aktiv)

zellen-Hybridbus beim Schweizer Strommix wegen des hohen Wasserkraftanteils über 95 % weniger CO₂-Äquivalente als der Dieselbus emittieren. Aber selbst wenn man den deutschen Strommix ansetzt (siehe Abbildung 6.11), sind beim Trolleybus bis zu 50 % niedrigere THG-Emissionen möglich, was angesichts des weiterhin recht hohen Anteils der aus Kohlekraftwerken stammenden Energie erstaunen mag. Allerdings betrug im Jahre 2015 der Anteil erneuerbarer Energien in Deutschland bereits fast 30 %, hinzu kam ausserdem der Anteil der Kernenergie von 14 % (siehe Tabelle 5.1). Es sei zudem daran erinnert, dass hier von einer vollständigen Rekuperation der beim Bremsen erzeugten Energie ausgegangen wurde. Dieselhybridbusse erlauben, proportional zur Energieeinsparung, eine Reduktion der Emissionen von Treibhausgasen um etwa 20 %, bei sehr kurzen Halteabständen (300 m und weniger) sogar um über 30 %. Die Plug-In-Hybride schneiden mit gegenüber dem Dieselbus um etwa 40 % niedrigeren THG-Emissionen aufgrund ihres höheren elektrischen Fahranteils weitaus besser ab. Aufgrund der definitionsgemäss ausschliesslich erneuerbaren Primärenergie verursacht der Brennstoffzellen-Hybridbus auch beim deutschen Strommix die niedrigsten Emissionen.

Einfluss des Auslaufs auf den Energiebedarf

Da die Energieeinsparung im Auslaufabschnitt darauf beruht, dass keine Antriebsleistung abgegeben wird, stellt sich zuerst die Frage nach den Auswirkungen auf die Reisezeit. Es zeigt sich, dass diese vernachlässigbar sind: Wie es in den oberen beiden Diagrammen der Abbildung 6.12 beispielhaft für den Gelenk- und Doppelgelenkbus dargestellt ist, verlängert sich die Reisezeit, über den gesamten Umlauf betrachtet, um weniger als 1,5 %, was ungefähr 23 s entspricht. Die Wer-

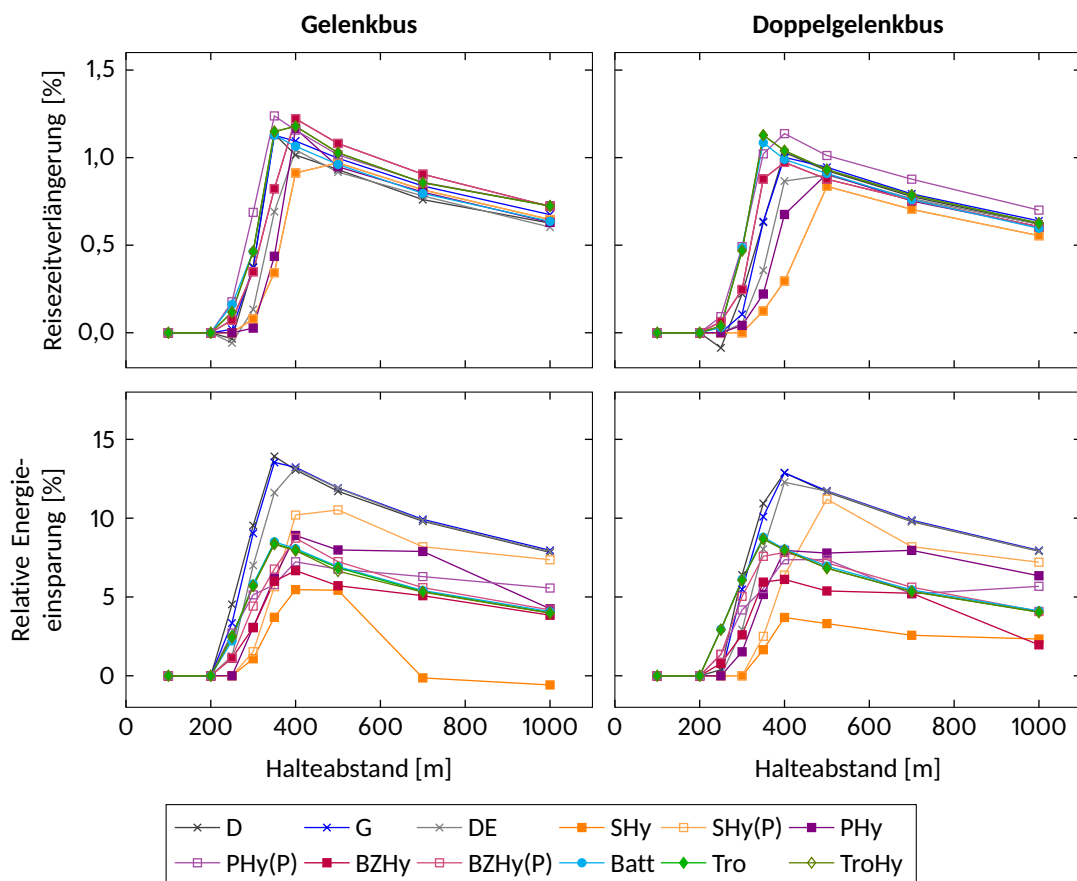


Abbildung 6.12: Relative Reisezeitverlängerung sowie relative Primärenergieeinsparung durch Nutzung des Auslaufs

te für die beiden anderen Gefässgrößen weichen nicht nennenswert von den hier gezeigten ab.

Hingegen ist der Einfluss auf den Energiebedarf durchaus beachtlich, die Energieersparnis hängt allerdings stark vom Halteabstand und auch vom Antriebssystem ab, wie die unteren beiden Diagramme der Abbildung 6.12 zeigen. Die durch die Gefässgrößen bedingten Variationen sind ebenfalls etwas deutlicher ausgeprägt. Anzumerken ist, dass die relativen Werte sich jeweils auf den Energiebedarf desselben Antriebssystems ohne Nutzung des Auslaufs beziehen. Auch wenn wegen des niedrigeren Energiebedarfs der (teil)elektrischen Systeme die Einsparung in absoluten Zahlen geringer ausfällt als beim Dieselbus, ist es dennoch bemerkenswert, dass – trotz der Rekuperation – relative Energieeinsparungen von bis zu 10% erreicht werden können. Am wirksamsten ist der Auslauf bei Halteabständen zwischen etwa 300 und 500 m, also genau in dem Bereich, der im Stadtverkehr besonders relevant ist. Der Rückgang der Energieersparnis bei grösseren Halteabständen ist vor allem dadurch begründet, dass bei konstanter Linienlänge zunehmend weniger Halte erfolgen und Auslaufphasen

dementsprechend seltener möglich sind. Dies könnte kompensiert werden, indem der Auslaufabschnitt verlängert wird oder sogar mehrere Auslaufabschnitte mit anschließender Wiederbeschleunigung bis zur zulässigen Geschwindigkeit aufeinanderfolgen. Dies wurde hier jedoch nicht umgesetzt.

6.2.3 Zweite Fallstudie: Höhenprofil

Bei vielen Energiebedarfsberechnungen wird der Einfluss der Steigung aus Gründen der Vereinfachung vernachlässigt. Ob dies in jedem Falle zulässig ist, soll hier untersucht werden.

Um Vergleiche zu ermöglichen, wurden zwei Höhenprofile berechnet, welche in der Abbildung 6.13 einander gegenübergestellt sind. Die Länge jedes geneigten Abschnitts beträgt stets 1,5 km, variiert wird einzig die Höhendifferenz. Beim Höhenprofil 1 beträgt der Anteil geneigter Strecken an der Streckenlänge 29,4 %, während er beim Höhenprofil 2 doppelt so gross ist. Eine Höhendifferenz von 30 m entspricht einer Neigung von 2 % (da die 1,5 km die Fahrstrecke und nicht deren Projektion in die Ebene abbilden, ist die der Berechnung zu Grunde liegende Neigung jeweils geringfügig höher). Die Berechnung erfolgte in Schritten zu 2 %, die Höhendifferenz wurde daher in 30-m-Schritten bis auf 180 m, entsprechend einer Neigung von 12 %, gesteigert.

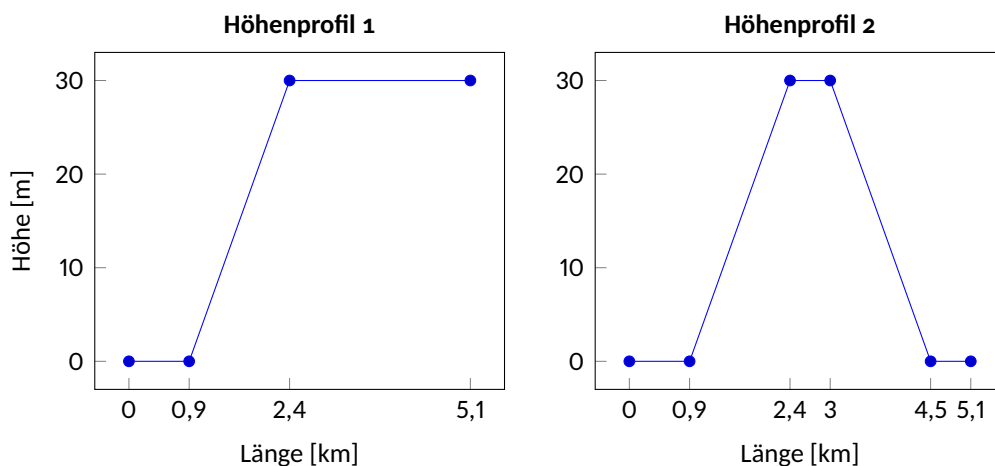


Abbildung 6.13: Schemata der beiden Höhenprofile der zweiten generischen Fallstudie. Die angegebenen Höhenwerte entsprechen einer Neigung von 2 %.

Mit zunehmender Steigung sollte auch der (absolute) Energiebedarf zunehmen. Betrachtet man die Abbildung 6.14, bestätigt sich dies. Allerdings steigt der Energiebedarf je nach Antriebssystem in etwas unterschiedlichem Masse. Während die hybriden Antriebsstränge im Vergleich zum Dieselsbus eine leicht überproportionale Zunahme verzeichnen, wächst beim Batterie-, Trolley- und Trolley-Hybridbus der Energiebedarf langsamer, was sich in der Betrachtung relativ zum Dieselsbus in einer geringfügigen Abnahme äussert.

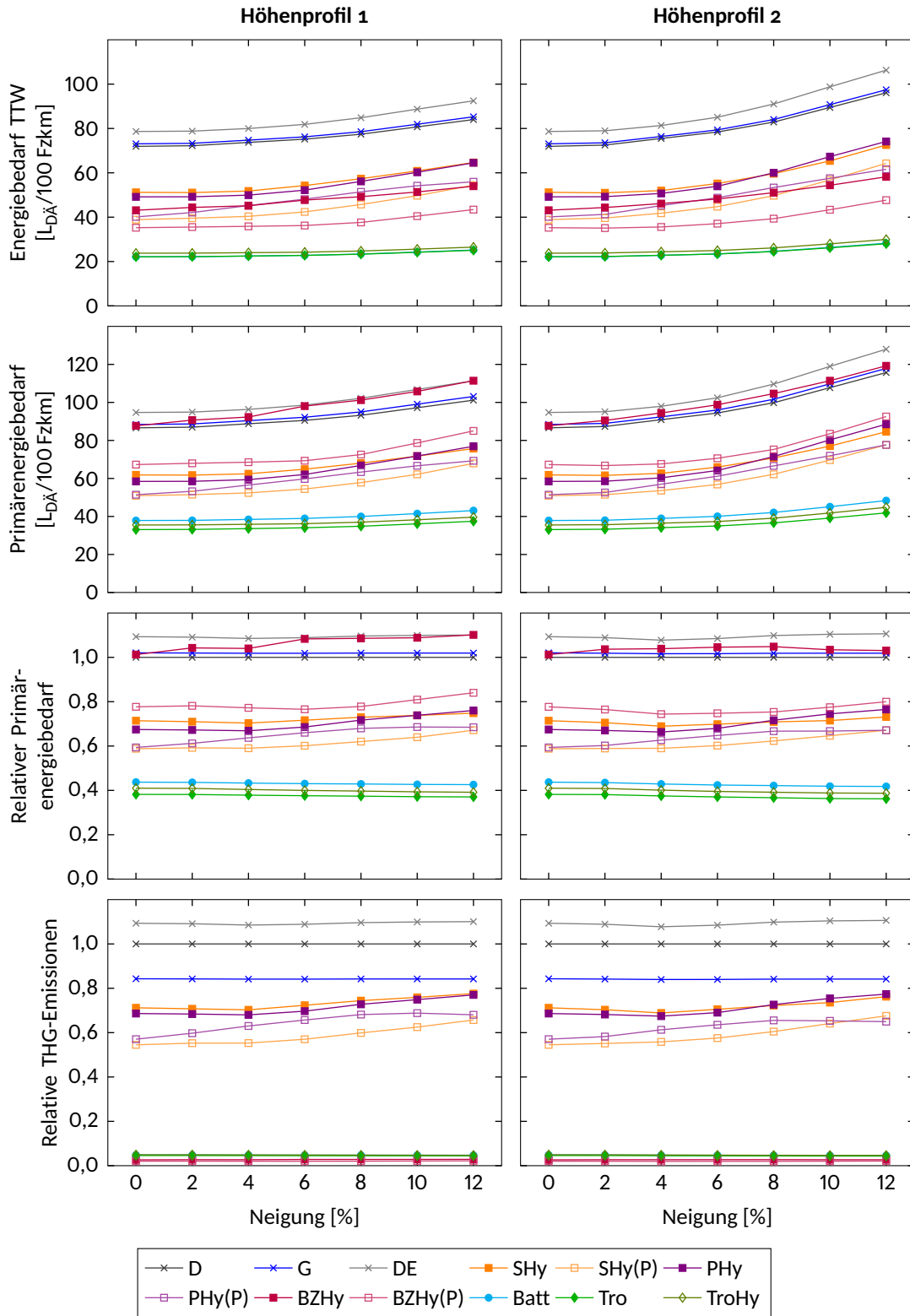


Abbildung 6.14: Einfluss der Neigung auf Energiebedarf und Emissionen (Fahrzeug: Gelenkbus, Strommix: Erzeugung Schweiz)

Auch hier ist wieder, wie schon im Abschnitt 6.1.2 festgestellt wurde, gut erkennbar, dass der unterschiedliche Energiebedarf die Antriebssysteme in drei Gruppen einteilt; am besten ersichtlich ist dies beim Energiebedarf TTW (Abbildung 6.14 oben). Den höchsten Energiebedarf haben Diesel-, Gas- und DE-Bus, dann folgt mit gewissem Abstand die Gruppe der Hybridbusse und schliesslich, wiederum mit etwas Abstand, die vollelektrischen Antriebssysteme Batterie-, Trolley-Hybrid und Trolleybus. Betrachtet man den Primärenergiebedarf, verschieben sich die Gruppen zwar in Richtung eines höheren Energiebedarfs, an der grundsätzlichen Aufteilung ändert sich aber, mit Ausnahme des Brennstoffzellen-Hybridbusses, nichts.

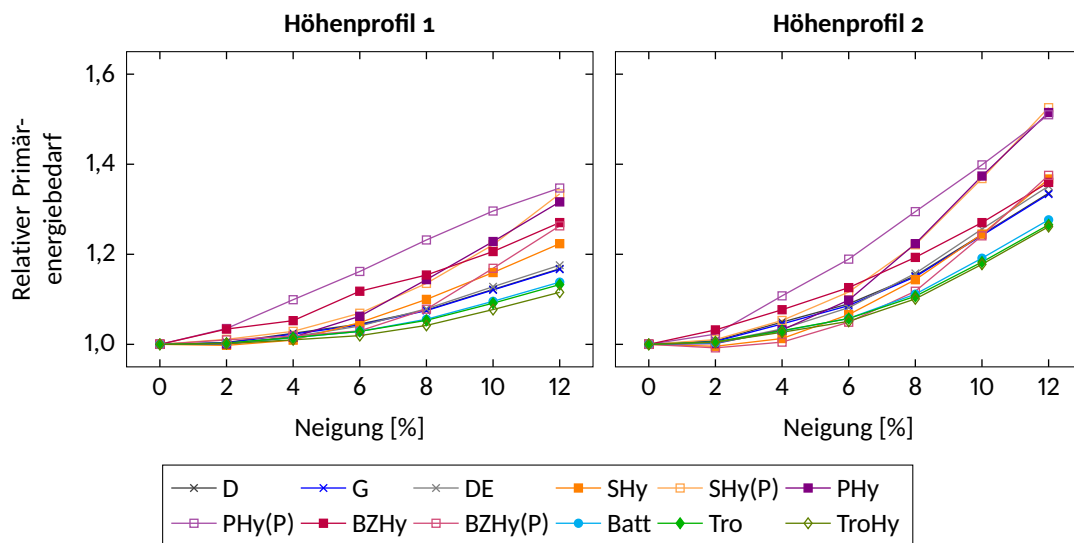


Abbildung 6.15: Relativer Energiebedarf bezogen auf die ebene Strecke (Fahrzeug: Gelenkbus, Strommix: Erzeugung Schweiz)

Die Darstellung in der Abbildung 6.14 verleitet dazu, den Zuwachs des Energiebedarfs als vergleichsweise gering anzusehen. Dies ist jedoch nicht der Fall, wie die Werte relativ zum Energiebedarf für die ebene Strecke zeigen. Bei den vollelektrischen Antriebssystemen fällt gemäss der Abbildung 6.15 der Zuwachs mit maximal 15 (Höhenprofil 1) sowie etwa 25 % (Höhenprofil 2) vergleichsweise moderat aus. Die Plug-In-Hybride zeigen hingegen eine starke Zunahme des Energiebedarfs um bis zu 50 %, was zwei Ursachen hat. Erstens ist der Ausgangswert, also der Energiebedarf für die ebene Strecke, relativ niedrig, zweitens bleibt die über die Ladestationen zugeführte Energie konstant. Da aber der Energiebedarf mit wachsender Steigung zunimmt, muss der Dieselmotor einen immer grösseren Anteil übernehmen, was sich in den relativen Werten entsprechend abzeichnet. Letzteres gilt auch für den Parallelhybrid, hinzu kommt hier, dass wegen des nicht vorausschauend wirkenden Energiemanagements die Batterie bei grösserem Gefälle nicht mehr die gesamte Energie aufnehmen kann und somit die Verluste durch mechanisches Bremsen zunehmen.

Der Vergleich der Treibhausgasemissionen (Abbildung 6.14 unten) zeigt abermals den Einfluss des hohen Wasserkraftanteils der Schweizer Elektrizitätserzeugung, indem die vollelektrischen Systeme sowie der Brennstoffzellen-Hybridbus weniger als 5 % der THG-Emissionen des Dieselmotors aufweisen.

Eine Vernachlässigung des Höhenprofils sollte unproblematisch sein, sofern die Neigung einen Wert von 2 % nicht überschreitet. Liegt der Wert jedoch darüber, gilt dies nicht mehr uneingeschränkt. So beträgt der Zuwachs des Energiebedarfs der vollelektrischen Systeme beim Höhenprofil 1 auch bei 6 % Neigung allenfalls nur etwa 5 %, während der Parallelhybridbus bereits gut 10 % mehr Energie benötigt. Somit wäre der Entscheid über eine Vernachlässigung des Höhenprofils separat für jedes Antriebssystem zu treffen. Detailliertere Aussagen hierzu sind jedoch angesichts von nur zwei betrachteten Höhenprofilen nicht möglich.

6.2.4 Dritte Fallstudie: Besetzung

Eine höhere Besetzung des Fahrzeugs führt sowohl zu einer Zunahme als auch zu einer Abnahme des Energiebedarfs: Indem die Fahrgäste die Gesamtmasse des Fahrzeugs erhöhen, steigt der absolute Energiebedarf. Gleichzeitig sinkt aber der spezifische Energiebedarf je Fahrgast, denn die Zunahme der Gesamtmasse ist, verglichen mit der Leermasse des Fahrzeuges, relativ gering. Der besseren Vergleichbarkeit wegen wird die Besetzung hier als relativer Wert, bezogen auf die Summe der Sitz- und Stehplätze, variiert. Welchen Fahrgastzahlen und welcher Platzauslastung die relative Besetzung jeweils entspricht, kann der Tabelle 6.5 entnommen werden.

Die Abbildung 6.16 zeigt, dass der Energiebedarf mit steigender Besetzung annähernd linear zunimmt, wobei der Anstieg bei den rückspeisefähigen Antriebssystemen etwas geringer ausfällt. Dies liegt daran, dass Letztere bei höherer Zuladung auch mehr Energie rekuperieren können (siehe Abschnitt 6.2.7). Ebenso nimmt, wie in den beiden oberen Diagrammen der Abbildung 6.17 zu erkennen ist, der Anstieg mit steigender Gefässgrösse zu, was die höhere spezifische Zuladung bei grösseren Fahrzeugen widerspiegelt. So entspricht beim vollbesetzten Midibus die Zuladung (47 Personen) etwa 30 % der Leermasse, während es beim Doppelgelenkbus (154 Personen) ungefähr 46 % sind.

Für die zuletzt erwähnten Diagramme bietet sich eine zweite Lesart an. Der Bezug auf das leere Fahrzeug bedeutet, dass die Zunahme des Energiebedarfs allein auf die steigende Besetzung zurückzuführen ist. Der Energiemehrbedarf entspricht also gerade dem Energiebedarf, der zur Beförderung der Fahrgäste erforderlich ist. Beispielsweise verursacht die Zuladung von 154 Fahrgästen beim vollbesetzten seriellen Dieselhybrid-Doppelgelenkbus einen zusätzlichen Energiebedarf von ungefähr 22 %. Das bedeutet, dass die für die Beförderung der Fahrgäste aufgewendete Energie nur etwa einem Fünftel der Energie entspricht, die für die Fortbewegung des Fahrzeuges benötigt wird. Beim Midibus (gleiches Antriebssystem) beträgt der Anteil sogar nur ein Siebtel. Bezieht man den Anteil

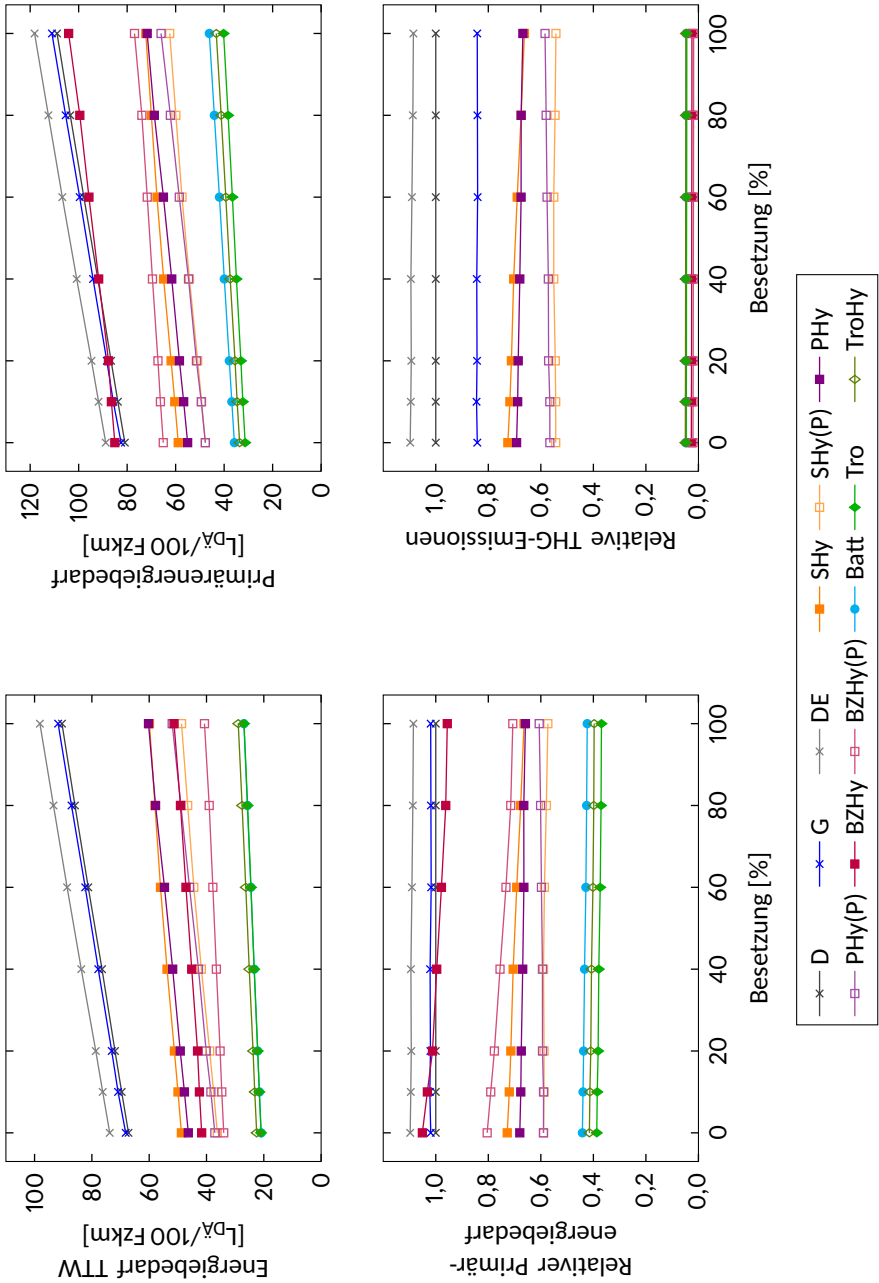


Abbildung 6.16: Einfluss der Besetzung auf Energiebedarf und Emissionen (Fahrzeug: Gelenkbus, Strommix: Erzeugung Schweiz)

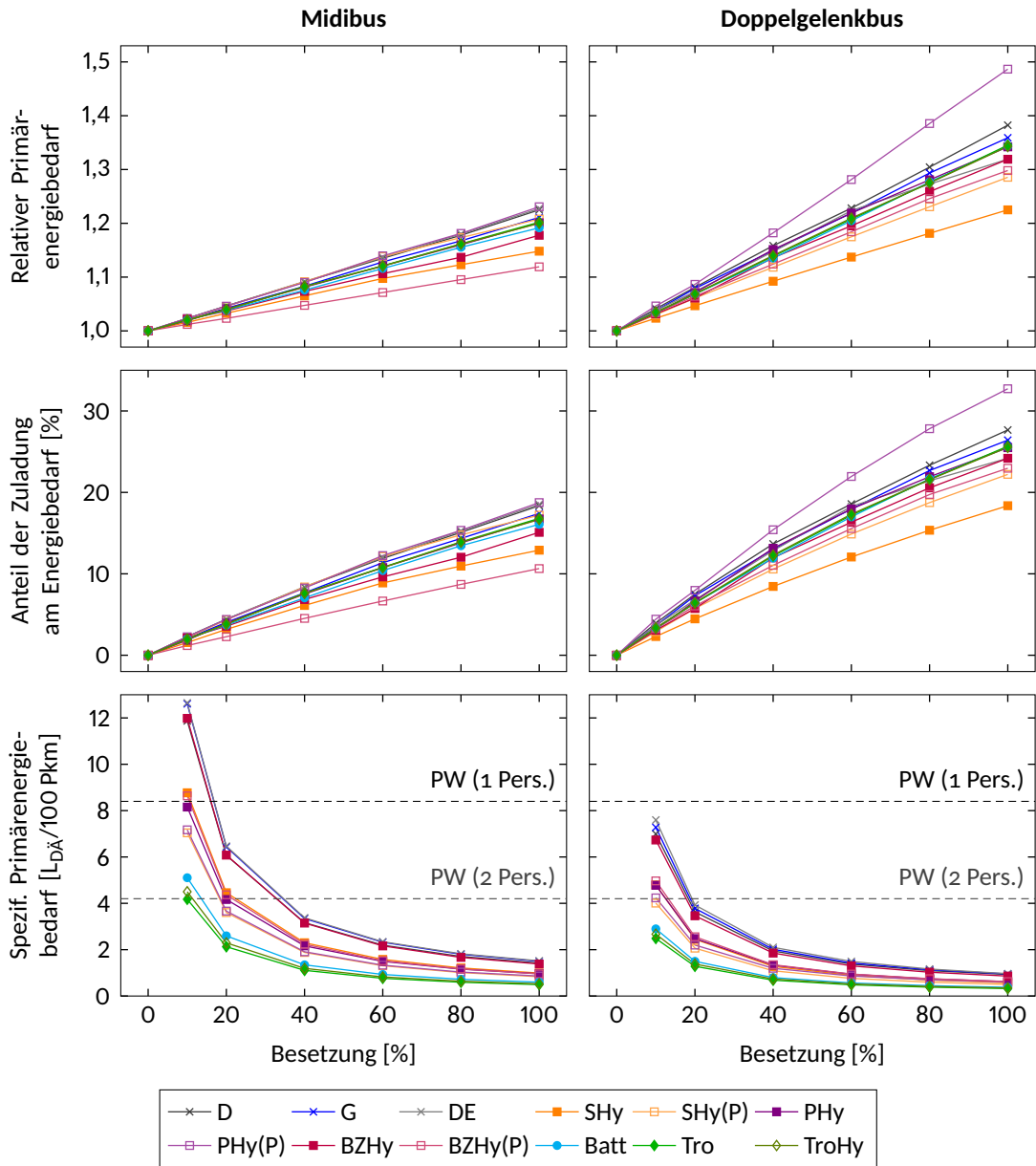


Abbildung 6.17: Entwicklung des relativen und des spezifischen Energiebedarfs in Abhängigkeit von der Besetzung (Primärenergie, Strommix: Erzeugung Schweiz)

der Zuladung auf den jeweiligen Gesamtenergiebedarf, so tritt die Dominanz des Energiebedarfs für die Bewegung des Fahrzeugs deutlicher zutage. Wie die mittleren Diagramme der Abbildung 6.17 zeigen, entfällt höchstens etwa ein Drittel des gesamten Energiebedarfs auf die eigentliche Beförderung der Fahrgäste. Mit zunehmender Gefässgröße nimmt der Einfluss des Fahrzeugs zwar ab, bleibt jedoch weiterhin bestimmend. Dies ändert sich, sobald der Fahrgastraum beheizt werden muss (siehe 4. Fallstudie).

Tabelle 6.6: Mindestbesetzung für die Unterschreitung des spezifischen Energiebedarfs eines PW (Angaben in Personen)

Antriebs- system	Diesel-PW ($7 L_{D\ddot{A}}/100$ Fzkm) besetzt mit 2 Personen				Elektro-PW ($2 L_{D\ddot{A}}/100$ Fzkm) besetzt mit 1 Person			
	Midi	Solo	Gel.	DG	Midi	Solo	Gel.	DG
D	15	16	21	27	26	29	40	51
G	15	17	22	28	28	31	40	53
DE	16	17	24	30	28	31	44	55
SHy	11	11	15	18	19	20	27	32
SHy(P)	9	9	12	15	15	16	22	27
PHy	10	11	14	18	18	19	25	33
PHy(P)	9	9	12	15	16	17	22	29
BZHy	15	16	22	26	26	29	39	48
BZHy(P)	10	13	16	18	18	22	29	34
Batt	6	7	9	10	11	12	16	19
Tro	5	5	8	9	9	9	14	16
TroHy	5	6	8	9	10	10	15	17

Gel. ... Gelenkbus, DG ... Doppelgelenkbus

Die oben angegebenen PW-Verbrauchswerte sind auf das System Fahrzeug bezogen.

Quelle: Eigene Berechnung; die Werte wurden auf ganze Zahlen aufgerundet.

Für einen Vergleich mit dem motorisierten Individualverkehr ist es sinnvoll, mit Verbrauchswerten in Litern Dieseläquivalent je 100 km zu arbeiten. Derartige Werte für Personenwagen (PW) gelten üblicherweise ab Tank, weshalb eine Umrechnung auf Primärenergie erfolgen muss, da diese hier als Vergleichsbasis dient. Der Wirkungsgrad der Dieselpreparierung ist 0,830 (siehe Tabelle 5.2); nimmt man an, dass ein Mittelklassewagen ab Tank 7 l/100 km verbraucht, was ein realistischer Wert im Stadtverkehrszyklus sein sollte, ergibt dies auf Primärenergie bezogen etwa 8,4 l/100 km. Nimmt man an, dass der PW mit nur einer Person besetzt ist, entspricht dies zugleich einem spezifischen Verbrauch von 8,4 l/100 Pkm; ein Mitfahrer halbiert diesen auf 4,2 l/100 Pkm. Beide Werte sind in den unteren beiden Diagrammen der Abbildung 6.17 eingetragen. Da die Ablesung teils etwas schwierig ist, finden sich die berechneten Werte für den mit 2 Personen besetzten PW in der Tabelle 6.6, zum Vergleich sind ausserdem die Werte eines hypothetischen Elektro-PW angeführt. Ein Diesel-Midibus muss mindestens mit 15 Fahrgästen, also zu 32 % besetzt sein, um

je Fahrgast den gleichen spezifischen Energiebedarf zu erreichen. Im Falle des Elektro-PW wären hierfür bereits 26 Fahrgäste (55 % Besetzung) nötig. Beim Diesel-Doppelgelenkbus genügen relativ zwar schon 18 % respektive 33 %, mit 27 bzw. 51 Fahrgästen sind aber fast doppelt so viele Fahrgäste nötig. Während der ÖV die Verbrauchswerte heutiger PW durchaus unterbieten kann (vor allem, solange zahlreiche PW-Fahrten mit nur einer Person erfolgen), so wäre bei einer steigenden Zahl von Elektroautos seine vollständige Elektrifizierung wohl unumgänglich, denn eine Steigerung der mittleren Auslastung auf etwa 40 % oder mehr wird sich nur schwer bewerkstelligen lassen.

6.2.5 Vierte Fallstudie: Aussentemperatur

Während beim Diesel-, Gas- und beim DE-Bus sowie, in etwas geringerem Umfang, auch bei den Dieselhybridbussen die Abwärme des Motors zur Beheizung des Fahrgastraums genutzt werden kann, besteht diese Möglichkeit bei den Plug-In-Hybriden und bei den vollelektrischen Bussen nur in einem sehr begrenzten Mass. Deren Energiebedarf ist demnach während der Heizperiode deutlich grösser. Basis der Berechnung ist eine Innenraumtemperatur von 20 °C, weshalb erst bei Temperaturen von 17 °C und niedriger Heizleistung erforderlich ist.¹

Die Abbildung 6.18 zeigt die Abhängigkeit des Energiebedarfs und der Emissionen von der Aussentemperatur am Beispiel des Gelenkbusse, die erforderliche Heizleistung wurde mit der Formel (4.22) berechnet. Es wurde zudem angenommen, dass höchstens 10 % der Maximalleistung des Dieselmotors in Form von Abwärme als Heizleistung nutzbar sind. Wird eine grössere Heizleistung benötigt, so muss diese von der Zusatzheizung aufgebracht werden. Bei den vollelektrischen Antriebssystemen sowie beim Brennstoffzellen-Hybridbus wurde von einer rein elektrischen Heizung ausgegangen. Betrachtet man den Energiebedarf TTW, so wird deutlich, dass beim Dieselbus aufgrund der zuvor genannten Annahme erst ab Temperaturen unterhalb von etwa 0 °C die Zusatzheizung benötigt wird. Das sogenannte «Downsizing» des Dieselmotors beim Dieselhybridbus äussert sich darin, dass die Zusatzheizung hier schon bei Aussentemperaturen unterhalb von 5 °C erforderlich ist. Aufgrund der hohen Energieeffizienz der vollelektrischen Systeme fällt bei diesen nur wenig Abwärme an. Eine Nutzung dieser Abwärme ist in aller Regel unwirtschaftlich, somit bedarf es schon bei geringen Temperaturdifferenzen einer aktiven Beheizung des Innenraums. Dies führt im aktuellen Beispiel dazu, dass bei -10 °C die für Heizzwecke benötigte Energie ungefähr der Traktionsenergie entspricht, der gesamte Energiebedarf ist also doppelt so gross wie ohne Heizung.

Aus rein technischer Sicht ist die Beheizung des Fahrgastraumes für das Funktionieren des Antriebsstrangs nicht erforderlich, weshalb der Heizenergiebedarf vollumfänglich den Fahrgästen anzurechnen ist. Addiert man die Heizenergie

¹Man erhält 17,2 °C als Nullstelle der Formel (4.22), wenn die Solltemperatur 20 °C als Basis für ΔT dient.

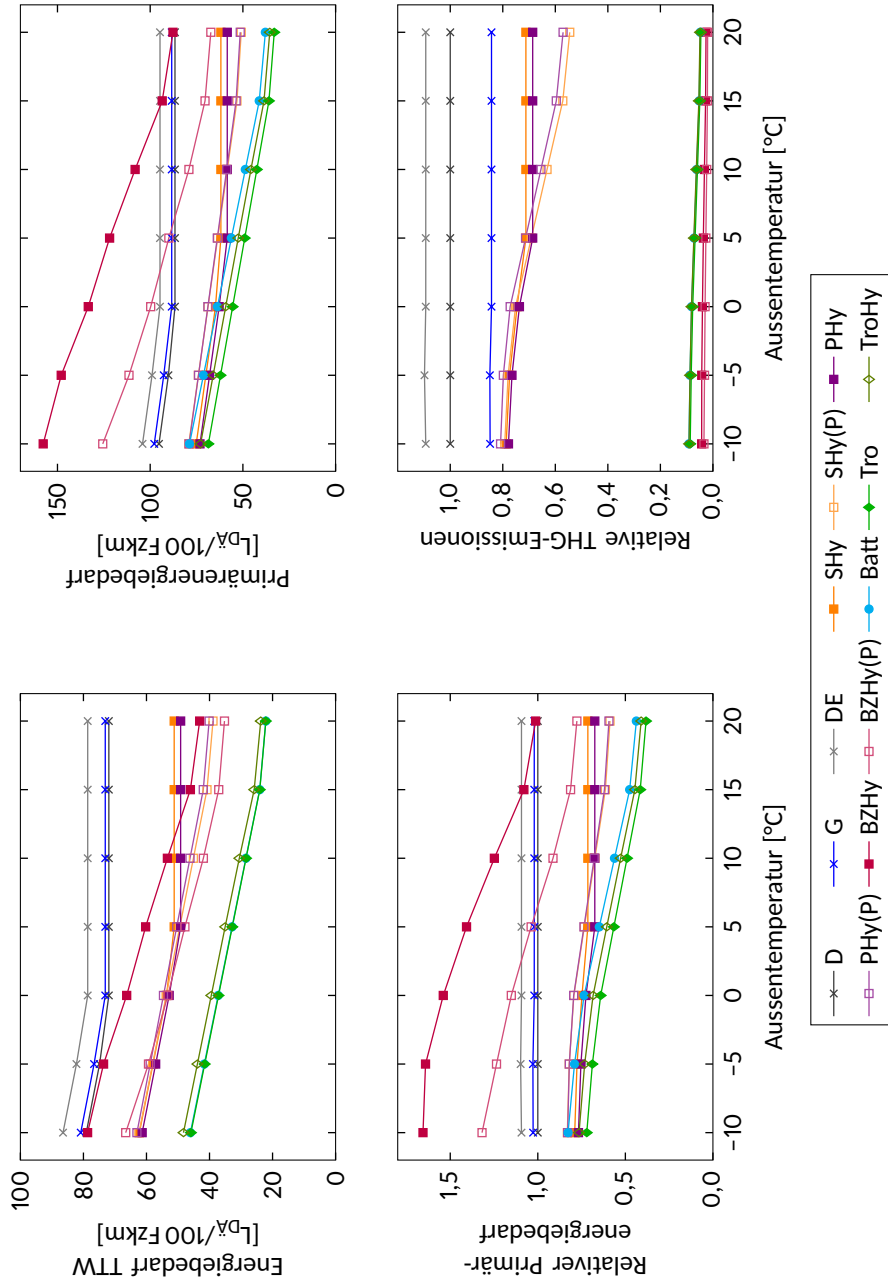


Abbildung 6.18: Einfluss der Aussentemperatur auf Primärenergiebedarf und Emissionen (Fahrzeug: Gelenkbus, Strommix: Erzeugung Schweiz)

zum Energiebedarf für die Zuladung, so kommt diesem Anteil ein wesentlich grösseres Gewicht zu als ohne Heizenergie, wie die Abbildung 6.19 zeigt (man vergleiche hierzu auch die mittleren Diagramme der Abbildung 6.17). Während die hier zu Grunde liegende Besetzung von 20 % ohne Heizung nur einem Anteil von etwa 5 % des Gesamtenergiebedarfs entspricht, so kann deren Anteil bei niedrigen Aussentemperaturen auf bis zu 58 % steigen. Bei den Antriebssystemen mit Verbrennungsmotor wurde die zu Heizzwecken genutzte Motorabwärme einberechnet; dieser Anteil geht ohnehin in den Gesamtenergiebedarf ein und wird, sofern nicht als Heizenergie verwendet, über die Motorkühlung an die Umgebung abgegeben und ist dann als Verlustleistung zu deklarieren. Somit haben, rein rechnerisch, Busse mit Verbrennungsmotor in der Heizperiode einen grösseren Wirkungsgrad (siehe Abschnitt 6.2.7).

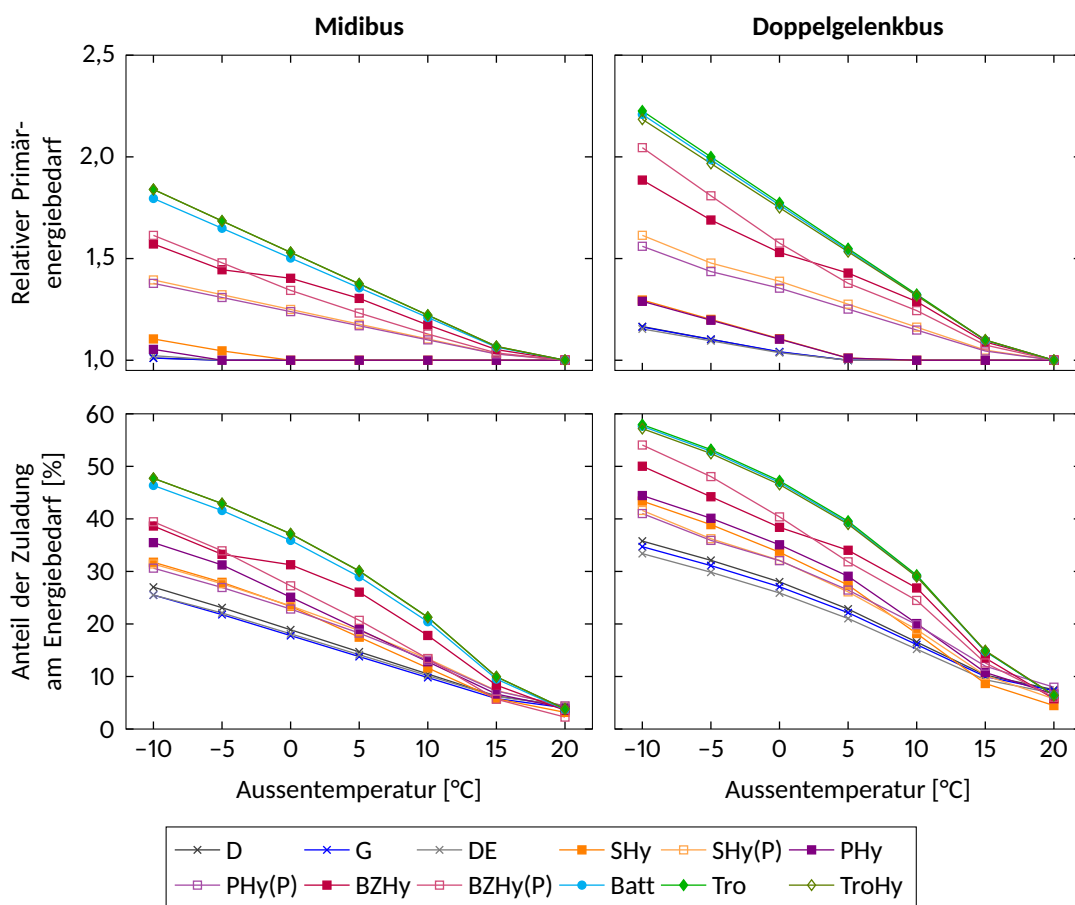


Abbildung 6.19: Entwicklung des relativen und spezifischen Energiebedarfs in Abhängigkeit von der Aussentemperatur (Besetzung 20 %, Strommix Schweiz; Bezug ist das leere Fahrzeug)

Mit zunehmendem Energiebedarf steigen auch die Emissionen. In der Betrachtung relativ zum Dieselbus (rechtes unteres Diagramm in Abbildung 6.18) verringert sich der Vorsprung der (teil)elektrischen Systeme zwar leicht, er kippt

jedoch nicht zu deren Ungunsten. Die vollelektrischen Systeme profitieren vom emissionsgünstigen Schweizer Strommix: Selbst bei niedrigsten hier betrachteten Temperatur – bei welcher der Heizenergiebedarf dem Traktionsenergiebedarf entspricht – emittieren sie nur etwa 10 % der Treibhausgase des Dieselmotors.

6.2.6 Exkurs: Rekuperationsgrad beim Trolleybus

In den Fallstudien wurde beim Trolleybus (sowie beim Trolley-Hybridbus im fahrleitungsgebundenen Betrieb) davon ausgegangen, dass die Fahrleitung jederzeit die beim elektrischen Bremsen anfallende Bremsleistung aufnehmen kann. Hierbei handelt es sich in jedem Falle um die «überschüssige» Leistung, denn es muss erst der Leistungsbedarf der Hilfsbetriebe gedeckt werden, bevor in die Fahrleitung zurückgespeist werden kann.² Allerdings repräsentiert die vollständige Rekuperation einen Idealzustand, weshalb zu untersuchen ist, wie sich der Energiebedarf des Trolleybusses entwickelt, wenn die Verhältnisse hinsichtlich der Rückspeisung sich ungünstiger gestalten.

Für die Visualisierung bietet es sich an, den Ergebnissen mit vollständiger Rekuperation den Energiebedarf und die Emissionen für den anderen Extremwert – also ohne Rekuperation in die Fahrleitung – gegenüberzustellen und die durch beide Extrema aufgespannten Wertebereiche abzubilden. Die Abbildung 6.20 zeigt dies in Abhängigkeit vom Halteabstand, im Diagramm oben links entsprechen die Werte der übrigen Antriebssysteme denen der 1. Fallstudie (siehe auch Abbildung 6.9). Um einen Vergleich zu ermöglichen, wurde die Berechnung zudem für den deutschen Strommix durchgeführt. Es fällt auf, dass der Wertebereich mit zunehmendem Halteabstand deutlich schmaler wird, was nicht überrascht, da auch die Zahl der Bremsvorgänge – und damit das Rekuperationspotenzial – zurückgeht. Beim Schweizer Strommix schneidet der Trolleybus selbst ohne Rekuperation noch gut ab, während dies beim deutschen Strommix nicht gilt: Bei niedrigen Rekuperationsgraden übersteigt der Energiebedarf des Trolleybusses den der Dieselhybridbusse, zum Dieselbus besteht aber weiterhin ein deutlicher Abstand. In weitaus deutlicherem Masse beeinflusst der Strommix die Emissionen, gezeigt am Beispiel der 1. Fallstudie (untere Diagramme der Abbildung 6.20). Dank der äusserst niedrigen Emissionsfaktoren kann der Einfluss des Rekuperationsgrades beim Schweizer Strommix vernachlässigt werden. Ein gegensätzliches Bild zeigt sich hingegen beim deutschen Strommix: Vor allem bei Halteabständen unterhalb von 400 m würde der Trolleybus bei niedrigen Rekuperationsgraden mehr Treibhausgase emittieren als Dieselhybridbusse. Falls überhaupt keine Rückspeisung möglich ist, lägen die Emissionen sogar nur knapp unter denen des Gasbusses.

Betrachtet man den Primärenergiebedarf in Abhängigkeit von der Besetzung (Abbildung 6.21 links), fällt der vergleichsweise breite Wertebereich auf. Wäh-

²Anderenfalls hiesse dies, dass gleichzeitig aus der Fahrleitung Leistung für die Hilfsbetriebe bezogen sowie Leistung in die Fahrleitung eingespeist wird, was nicht möglich ist.

rend der Trolleybus beim Schweizer Strommix selbst ohne Rekuperation meist besser als die Dieselhybridbusse abschneidet (nur der serielle Plug-In-Hybrid verbraucht, sofern die Besetzung mindestens 60 % beträgt, etwas weniger Energie), gilt dies beim deutschen Strommix nicht. In diesem Falle ist nicht nur der Energiebedarf des Trolleybusses höher, es vergrößert sich auch der vom Rekuperationsgrad abhängige Streubereich.

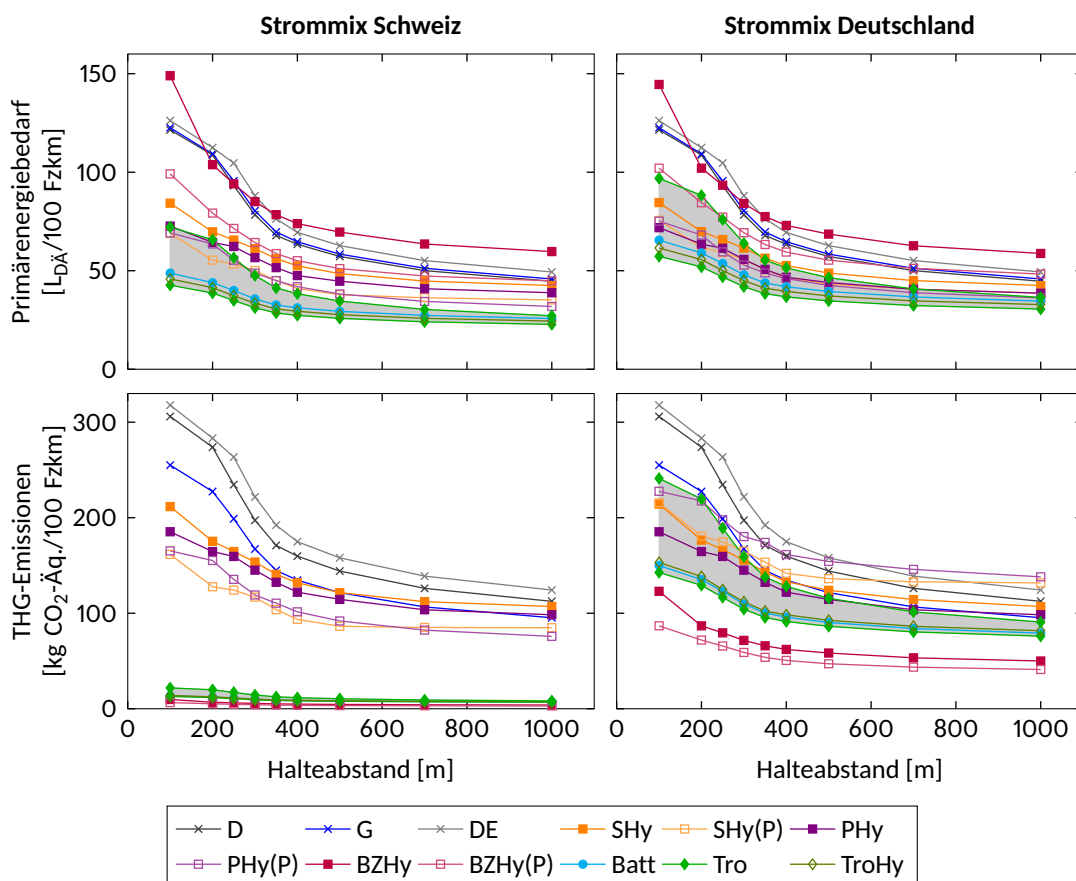


Abbildung 6.20: Einfluss des Rekuperationsgrades auf Primärenergiebedarf und THG-Emissionen des Trolleybusses in Abhängigkeit vom Halteabstand. Grau eingefärbt sind die Wertebereiche für den Trolleybus, welche sich durch die Variation des Rekuperationsgrades zwischen 0 und 100 % ergeben (Gelenkbus; Auslauf aktiv)

Auf markantere Weise äussert sich der Einfluss der Aussentemperatur: Sofern keine Rekuperation möglich ist, verbraucht der Trolleybus beim deutschen Strommix unterhalb von etwa 5 °C sogar mehr Energie als der Dieselbus (siehe Abbildung 6.21 rechts). Bei vollständiger Rückspeisung hingegen schneidet der Trolleybus selbst bei einer Temperatur von -10 °C weiterhin etwas besser als der Dieselbus ab, während der Batteriebus schon unterhalb von 0 °C einen höheren Energieverbrauch aufweist, was von seinem im Vergleich zum Trolleybus etwas niedrigeren Wirkungsgrad herrührt. Es offenbart sich abermals, dass für

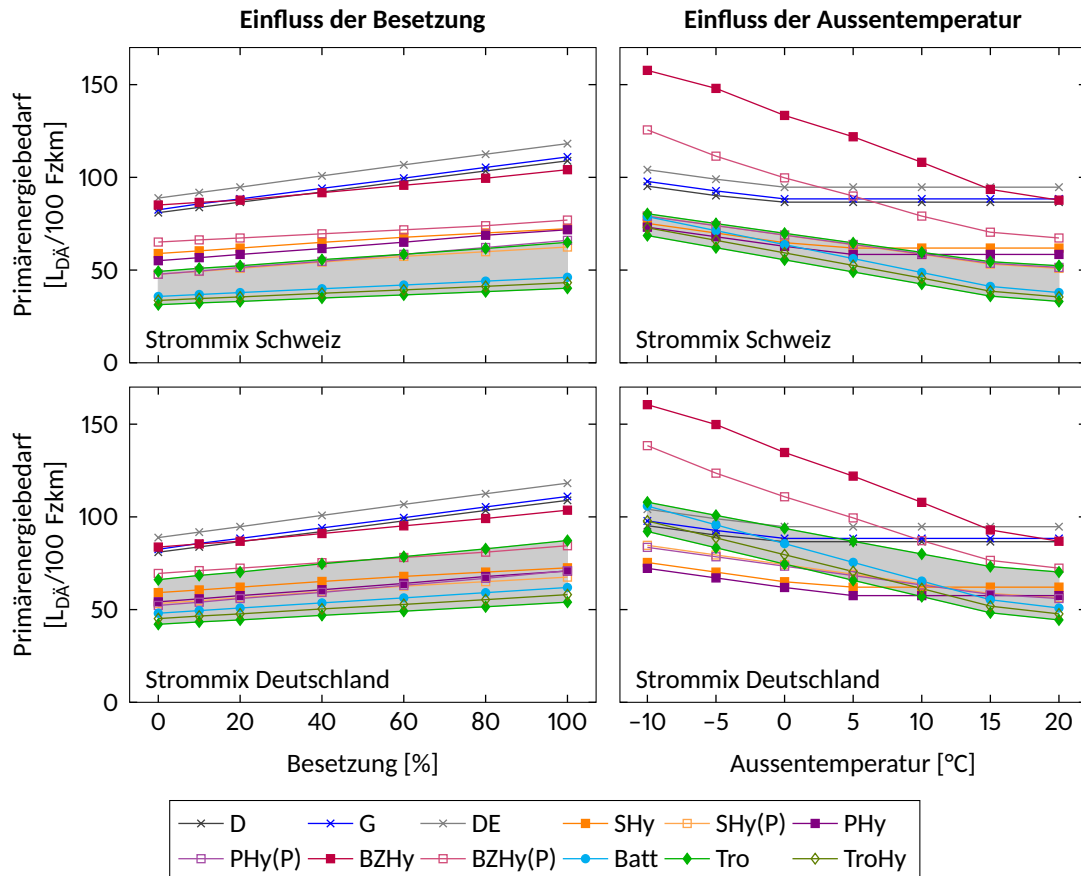


Abbildung 6.21: Einfluss des Rekuperationsgrades auf den Primärenergiebedarf des Trolleybuses in Abhängigkeit von Besetzung und Aussentemperatur. Grau eingefärbt sind die Wertebereiche für den Trolleybus, welche sich durch die Variation des Rekuperationsgrades zwischen 0 und 100 % ergeben (Werte gelten für Gelenkbusse)

eine hohe Energieeffizienz der vollelektrischen Antriebssysteme vor allem eine verlustarme Bereitstellung der elektrischen Energie entscheidend ist.

Zukünftig ist zu erwarten, dass der Einfluss des Rekuperationsgrades zurückgehen wird. Die neueste Generation von Trolleybussen ist mit leistungsfähigen Batterien ausgerüstet – in erster Linie, um längere fahrdradtlose Abschnitte im elektrischen Betrieb zurücklegen zu können. Technisch spricht aber nichts dagegen, Bremsenergie auch im fahrleitungsgebundenen Betrieb in die Batterie zu speisen, sollte das Fahrleitungsnetz vorübergehend nicht aufnahmefähig sein.

6.2.7 Aspekte der Energieeffizienz

Rekuperationspotenzial

In den vorangehenden Abschnitten war häufiger von Rekuperation die Rede, dieser Aspekt soll daher nun etwas vertiefter betrachtet werden. Es werden nur die

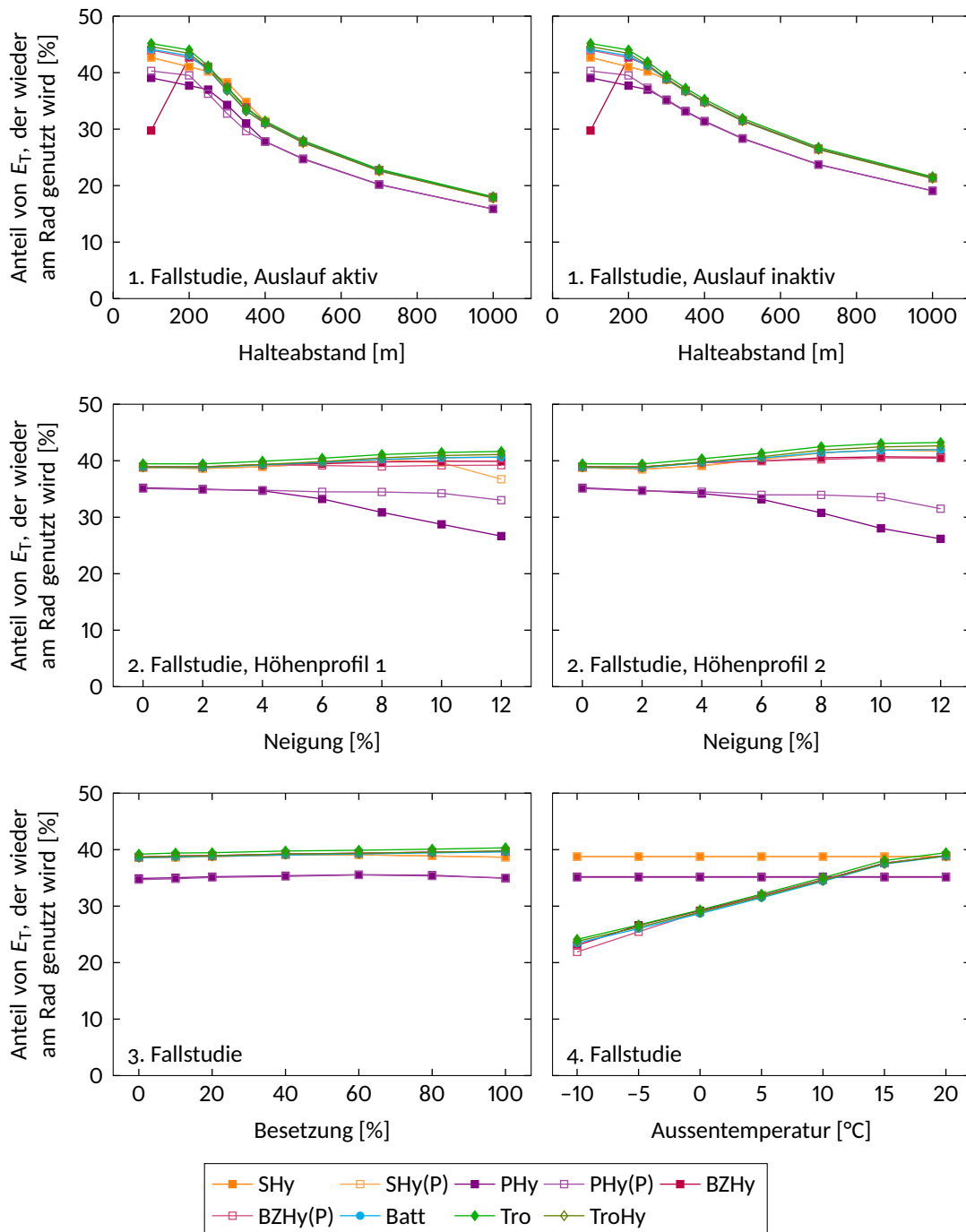


Abbildung 6.22: Wieder am Rad nutzbarer Anteil der rekuperierten Energie in Abhängigkeit von Halteabstand, Neigung, Besetzung und Aussentemperatur (Gelenkbus, Systemgrenze: Fahrzeug)

rekuperationsfähigen Antriebssysteme betrachtet; der DE-Bus, der mangels eines Speichers für elektrische Energie nur ein sehr beschränktes Rekuperationspotenzial aufweist, findet hier keine Berücksichtigung.

Es stellt sich die Frage, welcher Anteil der Traktionsenergie am Rad sich überhaupt wieder nutzen lässt. Die Herleitung dieses Anteils kann in den Abbildungen 6.4 b und 6.5 b nachvollzogen werden; im Folgenden wird nur der tatsächlich nutzbare Anteil $E_{\text{Rekup,T,Nutz}}$ in Abhängigkeit von den generischen Parametern betrachtet.

Die Abbildung 6.22 zeigt, wie gross dieser Anteil in Abhängigkeit der fünf im Rahmen der generischen Fallstudien untersuchten Parameter ausfällt. Der stärkste Einfluss kommt hierbei dem Halteabstand zu. Je grösser dieser ist, desto geringer ist der durch Rekuperation wieder nutzbare Anteil, was zwei Gründe hat: Erstens wird seltener gebremst (und nur beim Bremsen kann Energie zurückgewonnen werden), zweitens vergrössert sich der Anteil der Beharrungsfahrt. Hierbei wird zwar Traktionsenergie aufgebracht, sie dient aber (auf ebener Strecke) allein zur Überwindung des Luft- und Rollwiderstands und kann daher nicht rekuperiert werden.

Der Einfluss der Neigung hingegen ist, zumindest bei den beiden hier verwendeten Höhenprofilen, vernachlässigbar, wie die mittleren Diagramme der Abbildung 6.22 zeigen. Die zusätzlich aufzubringende Energie für die Überwindung der Steigungen wird in Form von potenzieller Energie «gespeichert», welche dann bei Gefällefahrt durch das Wirken der Hangabtriebskraft den Traktionsenergiebedarf reduziert sowie beim Bremsen das Rekuperationspotenzial vergrössert. Sind geneigte Abschnitte vorhanden, nehmen sowohl $E_{\text{T,Rad}}$ als auch $E_{\text{Rekup,T,Nutz}}$ zu, sodass der relative Anteil annähernd konstant bleibt.

Auf vergleichbare Weise lässt sich der näherungsweise konstante Anteil bei steigender Besetzung erklären (Abbildung 6.22 unten links). Die Zunahme der Fahrzeugmasse erfordert mehr Traktionsenergie. Da mit der grösseren Masse aber auch die kinetische Energie zunimmt, kann auch mehr Energie rekuperiert werden. Die Abnahme des am Rad nutzbaren Anteils rekuperierter Energie bei sinkenden Aussentemperaturen, wie es in Abbildung 6.22 unten rechts erkennbar ist, liegt schlicht darin begründet, dass die Hilfsbetriebe, zu denen die elektrische Heizung gerechnet wird, einen wachsenden Anteil der rückgespeisten Energie konsumieren. Eine Öl-Zusatzheizung, wie sie bei den Dieselhybridbussen erforderlich ist, führt dazu, dass der Anteil der rekuperierten Energie unverändert bleibt.

Es fällt auf, dass der Parallelhybridbus einen systematisch niedrigeren Anteil der wieder nutzbaren rekuperierten Energie aufweist. Dies liegt am Wirkungsgrad des Automatikgetriebes (0,93), während das bei den anderen Antriebssystemen zum Einsatz kommende Untersetzungsgetriebe wegen seines festen Übersetzungsverhältnisses über einen höheren Wirkungsgrad (0,97) verfügt. Das zweimalige Durchlaufen des Teil-Antriebsstrangs 2 ergibt beim Parallelhybrid einen Rekuperationswirkungsgrad von 0,55, bei den anderen Antriebssystemen beträgt dieser hingegen 0,60.

Gesamtwirkungsgrad des Fahrzeugs

Die Gesamtwirkungsgrade der Teil-Antriebsstränge sind definitionsgemäss bekannt (siehe Tabelle 4.7). Durch deren Zusammenwirken ergibt sich ein von diesen Werten abweichender Gesamtwirkungsgrad des Fahrzeugs (streng genommen handelt es sich um einen Energieausnutzungsgrad), der hier folgendermassen definiert werden soll:

$$\eta_{\text{Fzg}} = \frac{E_{\text{ab}}}{E_{\text{auf}}} = \frac{E_{\text{T,Rad}} - |E_{\text{Rekup,T,Nutz}}| + E_{\text{HB}} - |E_{\text{Rekup,HB}}| + E_{\text{Heiz,Ab}} + E_{\text{Heiz,Z}}}{E_{\text{TTW}}} \quad (6.3)$$

Dem Energiebedarf am Ausgang des Systems *Fahrzeug* wird also der Energiebedarf an dessen Eingang gegenübergestellt. Es wird die gesamte abgegebene Energie angerechnet, also neben der Traktionsenergie $E_{\text{T,Rad}}$, vermindert um den aus Rekuperation gedeckten Anteil $E_{\text{Rekup,T,Nutz}}$, auch der Energiebedarf der Hilfsbetriebe E_{HB} (ebenfalls abzüglich des Anteils aus Rekuperation $E_{\text{Rekup,HB}}$), die als Heizenergie genutzte Abwärme $E_{\text{Heiz,Ab}}$ sowie die Energie der Öl-Zusatzheizung $E_{\text{Heiz,Z}}$. Bei den vollelektrischen Antriebssträngen ist die Heizenergie der elektrischen Heizung im Energiebedarf der Hilfsbetriebe enthalten. Dieser Wirkungsgrad kann auch als Antriebsstrangwirkungsgrad bezeichnet werden.

Da die Aufgabe des Fahrzeugs die Ortsveränderung ist, kann der Energiebedarf der Hilfsbetriebe – die für das Funktionieren des Antriebsstrangs erforderlich sind, aber nicht unmittelbar zur Fortbewegung beitragen – als Verlust angerechnet werden. Gleiches gilt für die Heizenergie, die ebenfalls nicht für die Fortbewegung nötig ist, ohne die das Fahrzeug seine Aufgabe aber nicht erfüllen kann. Man erhält daher mit

$$\eta_{\text{Traktion}} = \frac{E_{\text{T,Rad}} - |E_{\text{Rekup,T,Nutz}}|}{E_{\text{TTW}}} \quad (6.4)$$

den Traktionswirkungsgrad, indem allein die tatsächlich abgegebene Traktionsenergie als Nutzenergie angesehen wird.

Obige Formeln, die sich auf die Systemebene Fahrzeug beziehen, können auch zur Bestimmung des Wirkungsgrades ab Primärenergie dienen, indem man im Nenner E_{TTW} durch E_{Prim} ersetzt.

Wendet man die Formeln (6.3) und (6.4) auf die Fallstudien an, so ergibt sich das in der Abbildung 6.23 gezeigte Bild. Die linken Diagramme zeigen am Beispiel der 3. Fallstudie die Verhältnisse ohne Heizenergie mit einem vom veränderlichen Wert des Parameters kaum beeinflussten Wirkungsgrad. Ähnlich verhält es sich auch bei der 1. und 2. Fallstudie, während die Heizenergie im Gegensatz dazu einen erheblichen Einfluss hat (siehe Diagramme rechts). Dort erkennt man den bei sinkender Temperatur steigenden Antriebsstrangwirkungsgrad des Diesel- und Gasbusses sowie der Dieselhybridbusse, während der Traktionswirkungsgrad konstant bleibt, da es aus dieser Sicht nicht relevant ist, ob die Wärme

an die Umwelt oder in den Fahrgastraum abgegeben wird. Erst ab der Temperatur, bei welcher die Zusatzheizung aktiviert werden muss, beginnt auch beim Dieselbus der Wirkungsgrad abzunehmen.

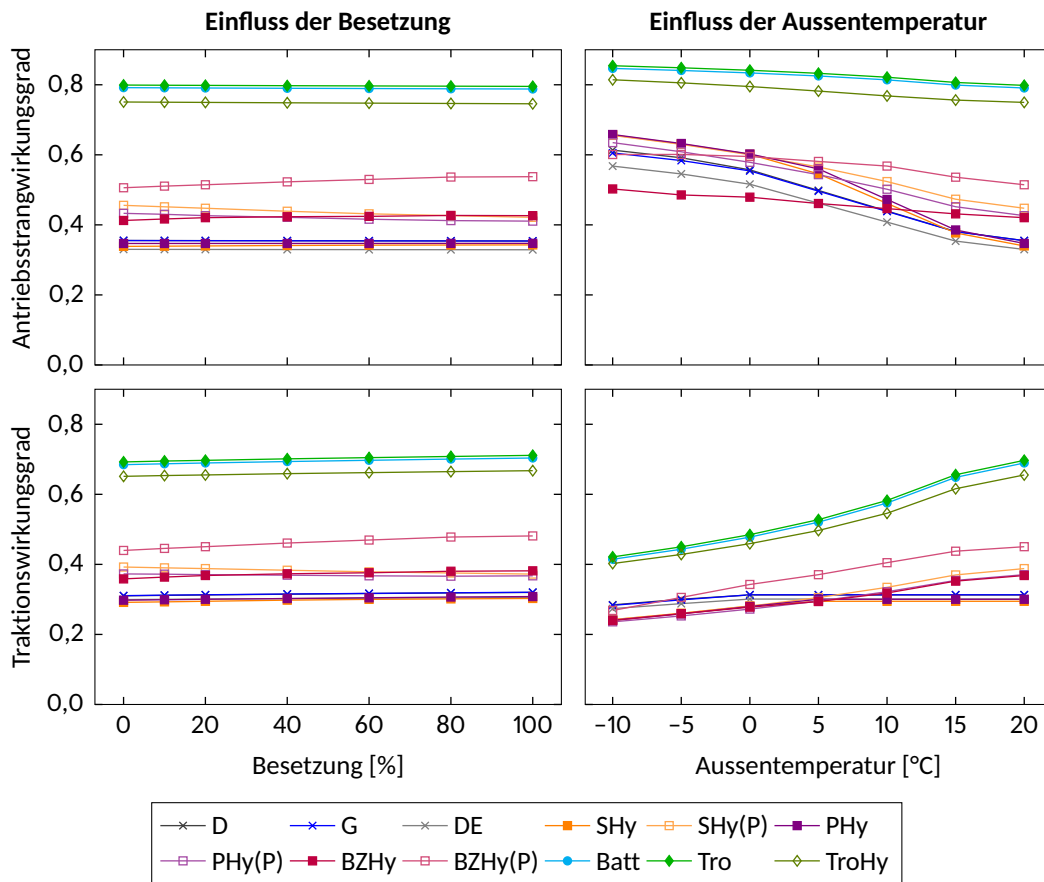


Abbildung 6.23: Gesamtwirkungsgrade der Fahrzeuge. Der Antriebsstrangwirkungsgrad wurde mit Formel (6.3), der Traktionswirkungsgrad mit Formel (6.4) berechnet. (Basis: Gelenkbus, ohne Energiebereitstellung)

Auf den ersten Blick erscheint es ungewöhnlich, dass die Antriebsstrangwirkungsgrade des Trolley- und des Batteriebusse bei 0,8 oder darüber liegen, obwohl die kombinierten Wirkungsgrade ihrer Subsysteme nur 0,781 respektive 0,774 betragen. Dies erklärt sich dadurch, dass während der Haltezeiten – in der Fallstudie beträgt deren Anteil an der Umlaufzeit rund 50 % – nur die Hilfsbetriebe versorgt werden müssen, deren Energiefluss nicht den ganzen Antriebsstrang durchläuft und daher einen höheren Wirkungsgrad (0,931) hat. Die Traktionsenergie hat aber (meist) den grösseren Anteil am Gesamtbedarf, sodass der Gesamtwirkungsgrad (der, wie schon erwähnt, eher ein Energieausnutzungsgrad ist) wegen der grösseren Verluste in der Regel nicht dem Mittelwert beider Wirkungsgrade entspricht. Entspricht aber der Heizenergiebedarf dem Traktionsenergiebedarf, wie dies bei -10 °C der Fall ist, stellt sich genau der Mittelwert

(0,856) ein (siehe rechtes oberes Diagramm in der Abbildung 6.23). Der Einfluss der Haltezeit auf den Wirkungsgrad betrifft sämtliche Antriebssysteme.

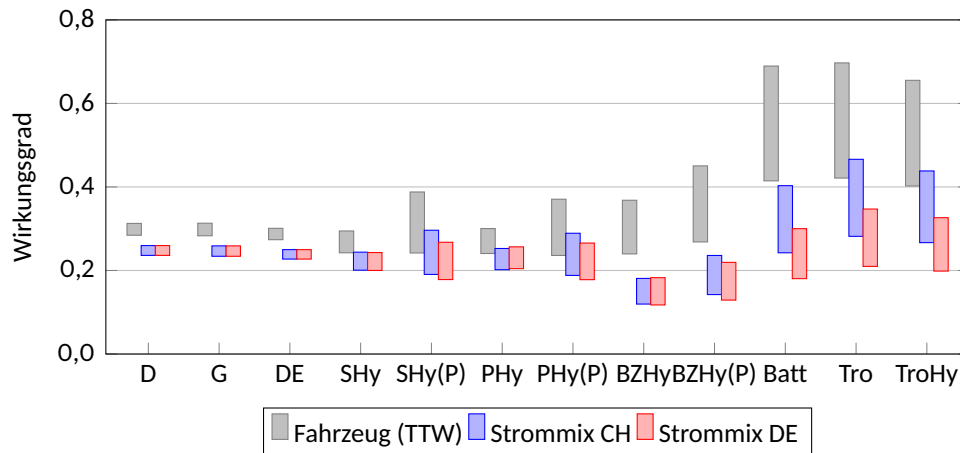


Abbildung 6.24: Bereiche der Traktionswirkungsgrade der Fahrzeuge ohne und mit Energiebereitstellung. Die Obergrenze bilden die Wirkungsgrade ohne Heizenergie (Aussentemperatur 20 °C), die Untergrenze die Wirkungsgrade mit Heizenergie bei einer Aussentemperatur von -10 °C. (Basis: 4. Fallstudie, Gelenkbus)

Unter Berücksichtigung der Energiebereitstellung erhält man die in der Abbildung 6.24 gezeigten Ergebnisse, die vor allem den erheblichen Einfluss des Bereitstellungswirkungsgrades zeigen. Mit zunehmendem Heizenergiebedarf nähern sich die Werte der elektrischen Antriebssysteme denen von Diesel-, Gas- und Hybridbussen an.

6.2.8 Rangfolge

Nachdem der Einfluss verschiedener Parameter auf den Energiebedarf sowie die Emissionen untersucht wurde, soll abschliessend der Versuch unternommen werden herauszufinden, welches Antriebssystem am besten abschneidet. Es genügt jedoch nicht, nur eine einfache Rangfolge der Systeme anzugeben. Wie in den Betrachtungen dieses Kapitels ersichtlich, ist der Abstand zwischen bestimmten Systemen oft nur sehr klein, was sich in einer schlichten Rangfolge aber nicht widerspiegeln würde. Aus diesem Grunde wurde stattdessen der Ansatz einer Normierung der Werte anhand einer Skala von 0 bis 10 Punkten verfolgt, wobei der Wert 0 das jeweils schlechteste (ineffizienteste) und der Wert 10 das beste System repräsentiert. Für jeden Parameterwert wird also dem Maximum des Energiebedarfs der Skalenwert 0, dem Minimum der Wert 10 zugewiesen und die dazwischenliegenden Energiewerte linear eingeordnet; mit den Emissionswerten wurde ebenso verfahren. Auf diese Weise werden die Abstände korrekt abgebildet und man kann dennoch eine Rangfolge ablesen. Die Normierung erleichtert es, die Rangwerte zu kombinieren. Dies ist sinnvoll, da das energieeffizienteste

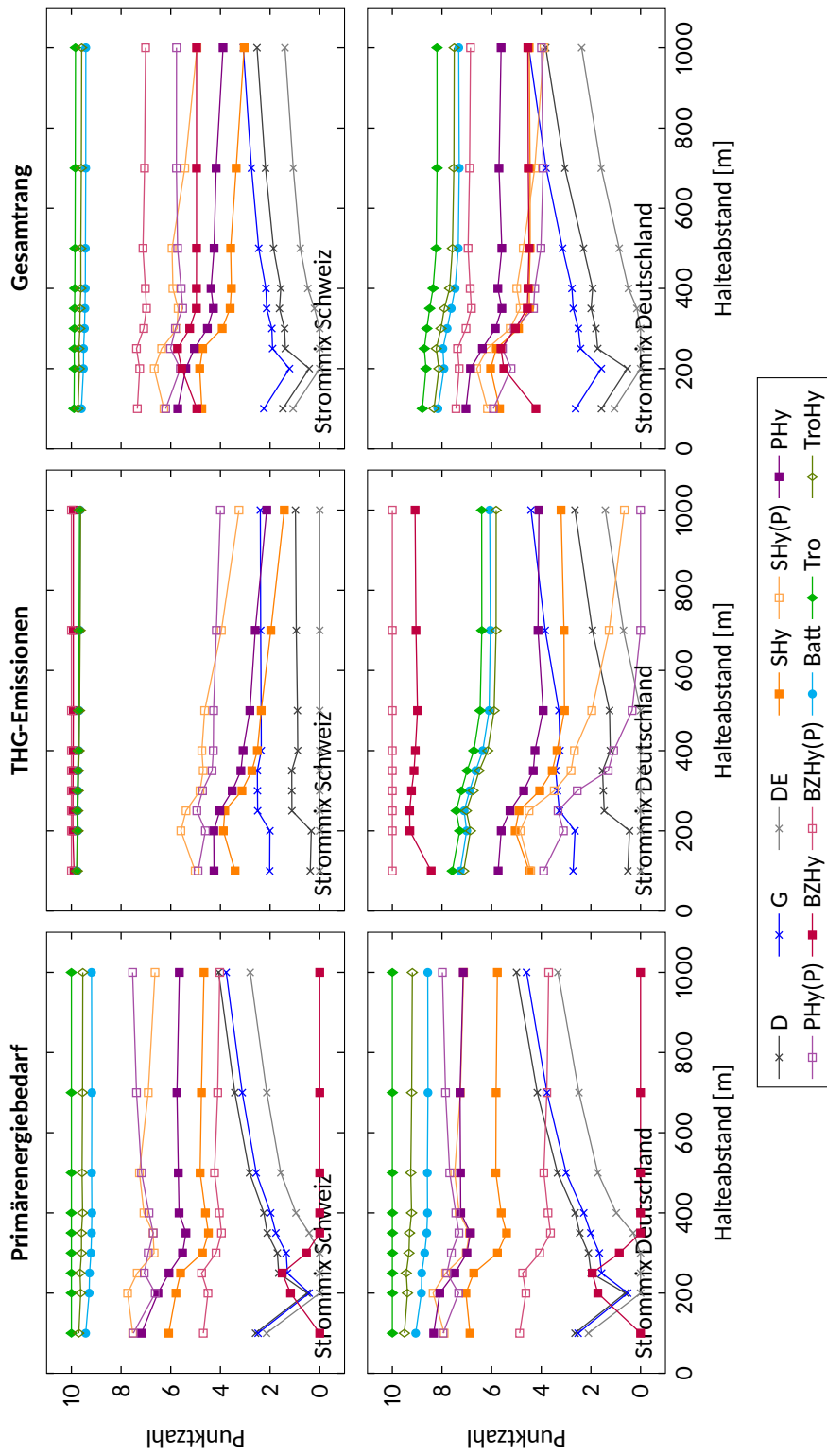


Abbildung 6.25: Einfluss des Halteabstands auf die Rangfolge der Antriebssysteme (Gelenkbus, Auslauf aktiv; Basis: Ergebnisse der 1. Fallstudie)

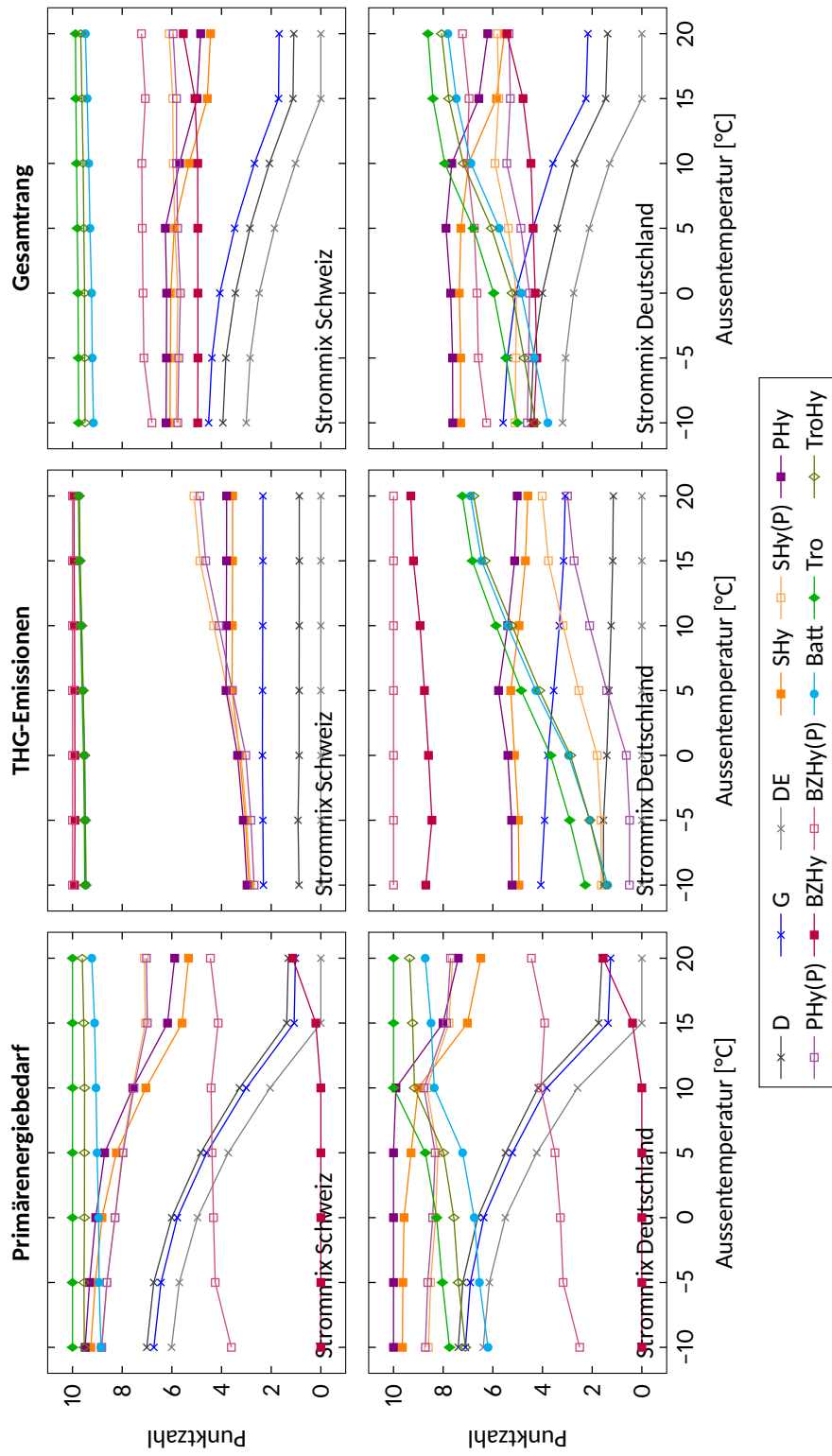


Abbildung 6.26: Einfluss der Aussetemperatur auf die Rangfolge der Antriebssysteme (Gelenkbus; Basis: Ergebnisse der 4. Fallstudie)

System nicht unbedingt auch das emissionsgünstigste sein muss. Für die Bestimmung des Gesamttrags werden hier die beiden Rangwerte des Energiebedarfs und der Emissionen zu je 50 % gewichtet.

Hier sollen zwei Parameter betrachtet werden, welche den grössten Einfluss auf den Energiebedarf (und damit auch auf die THG-Emissionen) haben: der Halteabstand (1. Fallstudie) sowie die Aussentemperatur (4. Fallstudie). Bei den beiden übrigen Fallstudien sind die Auswirkungen auf den Energiebedarf geringer, auch die Rangfolge verändert sich kaum, deren nähere Betrachtung kann hier also entfallen. Die Abbildung 6.25 zeigt die Rangfolgen der Antriebssysteme in Abhängigkeit vom Halteabstand. Beim Schweizer Strommix sind Trolley-, Trolley-Hybrid- und Batteriebus klar führend, wobei die Unterschiede so gering ausfallen, dass sie als praktisch gleichwertig angesehen werden können. Erwartungsgemäss vergrössern sich diese Unterschiede beim deutschen Strommix, der Batteriebus ist hier um einen Punkt niedriger platziert als der Trolleybus. Zudem ist der Abstand zu den Dieselhybridbussen beim Energiebedarf geringer, als es beim Schweizer Strommix der Fall ist. Abermals wird die spezielle Position des Brennstoffzellen-Hybridbusses deutlich: Meist an letzter Stelle beim Energiebedarf liegend,³ verursacht er andererseits die geringsten THG-Emissionen, sodass er in der Gesamtbetrachtung im Mittelfeld liegt und etwas besser abschneidet als die Dieselhybridbusse.

Während sich über den Wertebereich des Halteabstands vergleichsweise wenige Änderungen in der Rangfolge ergeben, ist dies beim Parameter Aussentemperatur (Abbildung 6.26) anders, denn insbesondere beim deutschen Strommix kommt es bei sinkender Temperatur zu grossen Verschiebungen. Sinkt die Aussentemperatur unter 5 °C, avancieren die Dieselhybridbusse zu den energieeffizientesten Antriebssystemen, unterhalb von etwa -5 °C gleicht sich der Energiebedarf der vollelektrischen Systeme dem des Gas- und Dieselbusses an. In einer Region mit langer Heizperiode und einem ähnlichen Strommix wären Dieselhybridbusse den vollelektrischen Systemen also zumindest ebenbürtig – und dies bei merklich geringerem Investitionsbedarf.

6.3 Vereinfachtes Modell

6.3.1 Herleitung

Im Rahmen der im vorstehenden Abschnitt beschriebenen generischen Fallstudien wurden die vier wichtigsten Einflussfaktoren, Halteabstand, Steigung, Besetzung und Heizenergie, getrennt untersucht. Als Abschluss dieses Kapitels soll nun der Versuch unternommen werden, diese getrennte Betrachtung in Form eines vereinfachten Modells zur Abschätzung des Energiebedarfs wieder zusam-

³Es sei daran erinnert, dass dies nur für den Primärenergiebedarf gilt. Betrachtet man hingegen allein das Fahrzeug, liegt der Energiebedarf des Brennstoffzellen-Hybridbusses in der Regel unter dem der Dieselhybridbusse.

menzuführen. Die Genauigkeit dieses vereinfachten Modells soll an den Ergebnissen, die für die VBZ-Fallstudie mit dem Berechnungsmodell bestimmt wurden, geprüft werden.

Die Grundidee besteht darin, den Energiebedarf für jeden Einflussfaktor als spezifische Grösse (in Wattstunden je Bruttotonnenkilometer) anzugeben, sodass der Energiebedarf für einen bestimmten Zeitraum (eben den Zeitraum, in welchem die gegebenen Fahrzeugkilometer geleistet werden) einfach mittels der Multiplikation mit den Fahrzeugkilometern und der mittleren Gesamtmasse berechnet werden kann. Dies geschieht für jeden der vier Einflussfaktoren, den Gesamtenergiebedarf erhält man schliesslich durch Addition der vier Werte.

Als *Basisenergiebedarf* $E_{B, \text{spez}}$ dient der durch den Halteabstand bedingte Energiebedarf, welcher mit Zunahme des Halteabstands sinkt. Dieser Verlauf ist hyperbolisch, sodass sich eine Näherung mittels einer Funktion des Typs $E_{B, \text{spez}} = ax^b$ mit $b < 0$ anbietet. Da ein Halteabstand von 100 m eher unrealistisch ist, werden nur die Werte zwischen 200 und 1000 m für die Approximation herangezogen. Aufgrund des mit zunehmender Gefässgrösse abnehmenden spezifischen Energiebedarfs kann leider keine für alle vier generischen Fahrzeugtypen gültige Approximation erfolgen. Da aber die Werte für Midi- und Solobus sowie Gelenk- und Doppelgelenkbus jeweils recht nahe beieinanderliegen, genügen zwei Formeln je Antriebssystem.

Die lineare Zunahme des Energiebedarfs bei steigender *Besetzung* erlaubt es, mit nur einem spezifischen Wert je Antriebssystem auszukommen.

Etwas komplizierter gestaltet sich die Berücksichtigung des *Heizenergiebedarfs*. Die Basis bildet der spezifische Heizleistungsbedarf $P_{\text{Heiz, spez}}$ in Watt je Bruttotonne und Kelvin Temperaturdifferenz für den Gelenkbus. Die Temperaturdifferenz bezieht sich auf diejenige Aussentemperatur, ab der eine aktive Beheizung des Fahrgastraums notwendig wird, welche hier als Einsatztemperatur ϑ_E bezeichnet werden soll. Diese ist unterschiedlich, je nachdem, ob und wie viel Abwärme des Verbrennungsmotors genutzt werden kann:

$$\vartheta_E = \vartheta_{\text{Soll}} - \frac{P_{\text{Heiz, VM}} + 3,8776 \cdot n_{\text{Korr}}}{1,3882 \cdot n_{\text{Korr}}} \quad (6.5)$$

Es bedeuten

ϑ_{Soll}	Soll-Innenraumtemperatur in Grad Celsius
$P_{\text{Heiz, VM}}$	nutzbare Abwärmeleistung des Verbrennungsmotors in Kilowatt
n_{Korr}	Korrekturfaktor gemäss Tabelle 4.9 (dimensionslos)

Wie in der 4. Fallstudie gilt auch hier die Annahme, dass 10 % der Nennleistung des Verbrennungsmotors als Heizleistung dienen (Nutzung der Abwärme), somit ergibt sich beispielsweise für einen Solobus (Korrekturfaktor 0,67) mit einer Motorleistung von 210 kW (also 21 kW Abwärmeleistung) eine Einsatztemperatur der Zusatzheizung von rund $-5,5$ °C. Die spezifische Heizenergie $E_{\text{Heiz, spez}}$ in

Wattstunden je Bruttotonnenkilometer erhält man mittels

$$E_{\text{Heiz, spez}} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } \vartheta_A \geq \vartheta_E \\ n_{\text{Korr}} \cdot \frac{P_{\text{Heiz, spez}}}{V_R} \cdot (\vartheta_A - \vartheta_E) & \text{wenn } \vartheta_A < \vartheta_E \end{cases} \quad (6.6)$$

wobei ϑ_A die Aussentemperatur in Grad Celsius und V_R die Reisegeschwindigkeit in Kilometern je Stunde bezeichnen. Letztere lässt sich aus dem Halteabstand d_H in Metern ableiten; für eine mittlere Haltezeit von 20 s und eine Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h gilt

$$V_R = 2,75 \cdot 10^{-8} d_H^3 - 7,19 \cdot 10^{-5} d_H^2 + 0,077 d_H + 2,20 \quad (6.7)$$

Für die Berücksichtigung der Steigung konnte nicht auf spezifische Werte aus der 2. Fallstudie zurückgegriffen werden. Es wird daher vorgeschlagen, diese mittels der folgenden Abschätzung herzuleiten. Der Ansatz ist, dass die Summe der potenziellen Energie über einen Umlauf gesehen Null ergibt, die Energie also wieder genutzt wird. Allerdings wird für das «Anheben» des Fahrzeugs zusätzliche Antriebsleistung benötigt, was Verluste verursacht, weshalb der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs η_{Tr} gemäss Tabelle 4.7 heranzuziehen ist, wobei im Falle der hybriden Antriebssysteme vereinfachend nur der Teil-Antriebsstrang 1 berücksichtigt wird. Diese Verlustenergie beträgt

$$E_{\text{V,H}} = \frac{m \cdot g \cdot \Delta h}{\eta_{\text{Tr}}} - m \cdot g \cdot \Delta h = m \cdot g \cdot \Delta h \left(\frac{1}{\eta_{\text{Tr}}} - 1 \right) \quad (6.8)$$

Mit der Masse m in Tonnen erhält man den spezifischen Energiebedarf $E_{\text{V,H, spez}}$ in Wattstunden je Bruttotonne und Meter Höhendifferenz, es ergibt sich

$$E_{\text{V,H, spez}} = \frac{m \cdot g \cdot \Delta h \left(\frac{1}{\eta_{\text{Tr}}} - 1 \right)}{3,6 \cdot m \cdot \Delta h \cdot \eta_{\text{Ber}}} = \frac{g}{3,6 \cdot \eta_{\text{Ber}}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{Tr}}} - 1 \right) \quad (6.9)$$

wobei zu beachten ist, dass der Bereitstellungswirkungsgrad η_{Ber} einfließen muss, weil die Betrachtung auf der Ebene der Primärenergie erfolgt. Im Ergebnis erhält man von der Gefässgrösse unabhängige spezifische Werte.

Die Tabelle 6.7 stellt alle spezifischen Eingangswerte zusammen. Der Basisenergiebedarf berücksichtigt, sofern der Halteabstand das Erreichen der zulässigen Geschwindigkeit von 50 km/h überhaupt zulässt, einen Auslaufabschnitt von etwa 10 s Dauer. Zu beachten ist, dass die Anwendung der Parameter nur für Halteabstände zwischen 200 und 1000 m zulässig ist. Ebenso gilt dies für die Formel (6.7), da sie auf den gleichen Eingangsdaten basiert.

6.3.2 Anwendungsbeispiel

Die Anwendung des im vorstehenden Abschnitt hergeleiteten Modells soll hier zur besseren Veranschaulichung anhand eines Beispiels demonstriert werden, wofür die Linie 46 dienen soll. Es werden die folgenden Eingangsgrössen benötigt:

- Infrastruktur
 - Linienlänge: 7,34 km
 - Mittlerer Halteabstand (inkl. verkehrsbedingter Halte): 396,6 m
 - Höhendifferenz zwischen tiefstem und höchstem Punkt: 101,0 m
- Fahrzeug
 - Gefässgrösse: Gelenkbus, also $n_{\text{Korr}} = 1$
 - Kapazität: 107 Plätze
 - Leermasse: 19,5 t
- Betrieb
 - Fahrzeugkilometer: 755'000 Fzkm
 - Mittlere Besetzung: 21,14 Personen (70 kg je Fahrgast)
- Aussentemperatur: 10,1 °C
- Soll-Innenraumtemperatur: 20 °C

Die Linie wird mit Trolleybussen betrieben, sodass die Berechnung beispielhaft anhand dieses Antriebssystems gezeigt wird.

Tabelle 6.7: Spezifische Eingangswerte des vereinfachten Modells der Energiebedarfsberechnung

Antriebs- system	Basisenergiebedarf ($E_{\text{B,spez}} = ax^b$)				Energiebedarf für		Heiz- leistung W/(Bt · K)
	Midi/Solo		(D)Gelenk		Besetzung	Steigung	
	a	b	a	b	Wh/Ntkm	Wh/Btm	
D	9160,1	-0,5235	10159,6	-0,5579	366,95	6,10	92,40
G	9053,9	-0,5222	9878,7	-0,5525	377,87	6,10	88,29
DE	8202,9	-0,4999	9536,7	-0,5402	393,02	6,82	88,61
SHy	2178,5	-0,3294	1777,7	-0,3246	185,57	6,37	84,22
SHy(P)	1518,4	-0,3108	1298,8	-0,3061	199,18	6,37	84,22
PHy	2029,2	-0,3200	2104,0	-0,3497	383,75	6,10	91,48
PHy(P)	2632,0	-0,3878	3076,2	-0,4346	240,28	6,10	91,48
BZHy	2950,0	-0,3320	2786,9	-0,3497	250,25	7,03	135,56
BZHy(P)	2358,3	-0,3466	2344,8	-0,3714	165,64	7,03	135,56
Batt	1135,6	-0,3042	1181,8	-0,3390	136,88	1,19	108,38
Tro	937,1	-0,2929	973,9	-0,3322	116,45	1,14	112,02
TroHy	1011,0	-0,2933	1030,6	-0,3299	125,18	1,14	112,02

Die Parameter des Basisenergiebedarfs gelten für Halteabstände zwischen 200 und 1000 m, eine zulässige Geschwindigkeit von 50 km/h sowie eine Besetzung von 20 %.

Quelle: Eigene Berechnungen

Aus der Tabelle 6.7 entnimmt man aus der Zeile «Tro» für Trolleybus die folgenden Parameterwerte sowie spezifischen Grössen

- Basisenergiebedarf aus Spalte (D)Gelenk: $a = 973,9$; $b = -0,3322$
- Besetzung: 116,45 Wh/Ntkm

- Steigung: 1,14 Wh/Btm
- Heizleistung: 112,02 W/(Bt · K)

Der (spezifische) Basisenergiebedarf ergibt sich mit den obigen Parameterwerten aus

$$E_{B, \text{spez}} = ax^b = 973,9x^{-0,3322} \quad (6.10)$$

wobei x für den mittleren Halteabstand steht; man erhält 133,46 Wh/Btkm. Für den spezifischen Energiebedarf der Steigungen ergibt sich mit dem Wert 1,14 Wh/Btm und der Höhendifferenz 115,14 Wh/Bt. Um den Heizenergiebedarf abschätzen zu können, wird die Reisegeschwindigkeit benötigt, das Einsetzen des mittleren Halteabstands in (6.7) liefert 23,24 km/h. Aus der Formel (6.5) ergibt sich unter Berücksichtigung der Soll-Innenraumtemperatur die Einsatztemperatur der Heizung zu 17,2 °C. Die Aussentemperatur liegt darunter, also wird Heizenergie benötigt. Die massgebliche Temperaturdifferenz beträgt 7,1 K, mittels der Formel (6.6) erhält man die spezifische Heizenergie zu 34,25 Wh/Btkm. Hiermit stehen die spezifischen Grössen in der Form zur Verfügung, wie sie für die Abschätzung der Gesamtenergie benötigt werden.

Die Parameter für den Basisenergiebedarf gelten für eine Besetzung von 20 %, was hier 21,40 Personen (1,5 t) entspricht; die Referenz-Bruttomasse beträgt also 21,0 t. Multipliziert mit den Fahrzeugkilometern erhält man 15,855 Millionen Btkm, was einen Basisenergiebedarf von 2116,0 MWh ergibt. Die tatsächliche mittlere Besetzung liegt nur geringfügig darunter, sodass eine Anpassung unterbleiben könnte. Sie soll hier zur Veranschaulichung des Berechnungsablaufs dennoch erfolgen. Die Differenz beträgt –0,26 Personen (–0,0182 t). Multiplikation mit den Fahrzeugkilometern ergibt –13'741 Ntkm, was mit dem spezifischen Wert von 116,45 Wh/Ntkm einem Bedarf von –1,6 MWh entspricht. Den erforderlichen Energiebedarf für die Steigungen berechnet man durch Bildung des Produkts aus der tatsächlichen Bruttomasse (20,9818 t), der Anzahl Umläufe (Fahrzeugkilometer dividiert durch doppelte Linienlänge) und der im vorigen Absatz bestimmten spezifischen Grösse (115,14 Wh/Bt), er beträgt 124,2 MWh. Die Heizenergie wiederum ergibt sich mit den Bruttotonnenkilometern des Basisenergiebedarfs zu 543,0 MWh. Somit beträgt der abgeschätzte Jahresenergiebedarf 2781,6 MWh. Das Berechnungsmodell bestimmt den Energiebedarf zu 2856,2 MWh, somit weicht die Abschätzung hier nur um –2,6 % von der Berechnung ab.

6.3.3 Fazit

Das obige Beispiel ist natürlich nicht ausreichend, um die Güte der Abschätzung bewerten zu können. Hierfür wurde der Energiebedarf aller Linien der VBZ-Fallstudie mit dem hier vorgestellten Modell abgeschätzt und anschliessend mit den Werten verglichen, die durch Anwendung des Berechnungsmodells erhalten wurden.

Li.	D	G	DE	SHy	SHy(P)	PHy	PHy(P)	BZHy	BZHy(P)	Batt	Tro	TroHy	Mw.
31	11,7	12,0	11,7	13,7	6,0	13,2	9,5	4,8	6,2	2,6	6,0	4,8	8,5
32	18,6	18,9	19,0	22,9	13,0	19,0	13,9	16,9	10,9	8,7	12,5	11,6	15,5
33	2,9	2,8	4,1	10,4	1,5	8,4	3,5	2,8	0,4	1,5	6,1	6,1	4,2
34	7,0	7,1	10,7	22,7	3,5	14,4	5,8	-0,2	3,3	-5,5	-0,4	-2,8	5,5
46	-4,2	-4,2	-2,2	9,3	2,6	4,3	5,8	-0,9	3,3	-6,7	-2,6	-4,8	0,0
72	8,8	8,6	9,8	12,5	6,8	13,5	12,9	7,8	7,3	3,3	7,7	5,6	8,7
61	17,5	17,3	18,8	11,2	5,9	13,1	11,0	2,7	2,9	4,3	8,5	8,1	10,1
63	9,1	9,0	10,2	5,6	4,1	5,0	3,3	-7,3	-3,5	-4,1	0,1	-0,5	2,6
69	4,7	4,6	7,0	16,4	10,0	10,4	11,8	1,4	11,6	-4,3	0,1	1,0	6,2
75	17,4	17,2	20,4	14,5	7,1	13,9	12,9	-2,4	0,8	2,4	6,8	6,7	9,8
80	1,6	1,7	4,0	8,7	3,4	7,7	3,9	-4,1	-2,2	-4,9	-0,8	-2,2	1,4
94	3,9	3,9	5,3	3,6	-1,6	3,9	-0,1	-5,8	-3,1	-2,9	0,9	-1,1	0,6
67	10,7	10,6	10,9	11,1	10,7	11,6	12,6	2,8	4,6	2,3	3,3	1,9	7,8
70	-3,3	-3,4	-1,1	13,0	-2,9	4,7	-5,3	-7,8	4,8	-8,5	-7,0	-8,6	-2,1
76	14,6	14,8	15,6	15,2	-7,9	9,8	-3,7	-8,3	-11,8	-1,9	-1,1	-2,5	2,7
77	2,5	2,5	4,1	13,8	-9,4	7,0	-8,3	-9,2	-11,3	-9,0	-7,9	-7,7	-2,7
89	1,5	1,4	2,4	9,9	4,7	7,6	8,0	2,7	7,7	-1,6	-0,3	-0,4	3,6
701	-12,4	-12,7	-10,8	5,0	-11,0	-6,1	-12,7	-1,2	-5,0	-7,6	-5,7	-7,2	-7,3
743	-2,8	-3,4	-2,9	3,3	-10,1	0,2	-9,4	1,1	-0,4	-0,8	0,2	-2,0	-2,3
DG	15,1	15,5	15,4	18,3	9,5	16,1	11,7	10,8	8,6	5,6	9,2	8,2	12,0
Gel.	6,9	6,8	8,8	11,5	4,3	9,5	7,1	-0,6	2,1	-1,7	2,6	1,6	4,9
Solo	1,5	1,4	2,6	10,2	-3,7	5,0	-2,7	-2,8	-1,6	-3,9	-2,6	-3,8	0,0

Abbildung 6.27: Berechnungsgenauigkeit des vereinfachten Modells. Verglichen wurde der Jahresenergiebedarf der Linien der VBZ-Fallstudie, dargestellt sind die Abweichungen der Ergebnisse des vereinfachten Modells von den mit dem Berechnungsmodell in Prozent (grün: Betrag der Abweichung bis 10 %, orange: Betrag der Abweichung zwischen 10 und 20 %, rot: Betrag der Abweichung grösser als 20 %)

Die Abbildung 6.27 zeigt das Ergebnis des Vergleichs mit den für die VBZ-Fallstudie berechneten Werten. Dargestellt sind die relativen Abweichungen, solche zwischen -10 und 10 % (in der Abbildung grün hinterlegt) wurden als tolerabel, solche in den Bereichen -20 und -10 % respektive 10 und 20 % (orange) als bedenklich sowie Werte, die stärker abweichen (rot), als problematisch eingestuft. Bildet man die Mittelwerte über die Linien, so erkennt man, dass der Energiebedarf der mit Doppelgelenkbussen betriebenen Linien tendenziell um etwa 12 % überschätzt wird, während für die Gelenk- und Solobuslinien genauere Ergebnisse geliefert werden. Vergleicht man die Antriebssysteme, so werden insbesondere die vollelektrischen Systeme recht gut angenähert, die Genauigkeit der Abschätzung für die Dieselhybridbusse ist hingegen verbesserungsbedürftig. Auch für Diesel-, Gas- und DE-Bus liegen die Ergebnisse der Abschätzung teils recht deutlich über denen der Berechnung.

Insgesamt überwiegen jedoch die tolerablen Abweichungen, sodass das vereinfachte Modell als grundsätzlich tauglich angesehen werden kann, wenn eine

erste Abschätzung des Energiebedarfs für eine zu untersuchende Linie gefragt ist und keine grössere Genauigkeit als ungefähr $\pm 15\%$ verlangt wird. Für das Ermitteln einer Rangfolge der Systeme ist es daher nur mit Einschränkungen geeignet. Es ist zu erwarten, dass, sobald eine genauere Abschätzung des Energiebedarfs der Steigungen gefunden ist, eine bessere Näherung der auf fahrdynamischer Basis berechneten Werte erzielt werden kann.

7

Schlussfolgerungen

7.1 Erkenntnisse

7.1.1 Einfluss des Antriebssystems

Es ist vermutlich wenig überraschend, dass es *das* ideale Antriebssystem, das allen denkbaren Anforderungen gleichermaßen genügt, nicht gibt. Auf ein System, das wenig Energie verbraucht, kaum Emissionen verursacht, keine Kompromisse bei den betrieblichen Einsatzparametern erfordert, möglichst geringer Investitionen bedarf und nicht zuletzt auch mit niedrigen Betriebskosten aufwartet, werden die Verkehrsbetriebe noch längere Zeit warten müssen. Kompromisse sind somit unvermeidlich, je nach den zu erreichenden Zielen kommen unterschiedliche Systeme in Betracht. In dieser Arbeit stand der Energiebedarf im Mittelpunkt und es wurden die Treibhausgasemissionen abgeschätzt, weshalb sich die Schlussfolgerungen auf diese beiden Teilgebiete konzentrieren. Es ist bekannt, dass nicht nur den THG-Emissionen, sondern auch den Emissionen von Schadstoffen Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte. Mangels geeigneter Emissionsfaktoren für Schadstoffe musste sich diese Arbeit auf die Abschätzung der THG-Emissionen beschränken.

Ist die Emissionsreduktion das vorrangige Ziel, können durch den Einsatz von **Erdgasbussen** die THG-Emissionen gegenüber dem Einsatz von Dieselsebussen um etwa 20 % reduziert werden, wobei diese (relative) Reduktion grundsätzlich unabhängig von den betrieblichen Kenngrößen ist. Da die Einsatzparameter von Erdgasbussen identisch zu denen der Dieselsebuse sind, lassen sich solche Fahrzeuge vergleichsweise rasch einführen. Hinsichtlich des Energiebedarfs erreicht man damit jedoch keine Verbesserungen, zudem bleibt die Abhängigkeit von fossiler Primärenergie bestehen.

Die niedrigsten Emissionen verursacht der **Brennstoffzellen-Hybridbus** – unter der Bedingung, dass der benötigte Wasserstoff mittels Elektrolyse aus Wasser gewonnen wird und hierfür ausschliesslich erneuerbare Primärenergie herangezogen wird. Die Emissionsreduktion gegenüber dem Dieselsebus ist mit über 95 % mehr als beachtlich. Dies wird allerdings mit dem meist höchsten Primärenergiebedarf aller Systeme «erkauft»; nur wenn die Halteabstände zwi-

schen 200 und 300 m liegen, liegt der Energiebedarf knapp unter dem des Dieselsebusses, ansonsten deutlich darüber. Auch wenn es sich, gemäss Definition, vollumfänglich um erneuerbare Energie handelt, ist die Frage, ob dies sinnvoll ist, berechtigt. Eine direkte Nutzung dieser Energie in elektrischen Antriebssystemen wäre wesentlich effizienter. Dies zeigt sich, wenn der Brennstoffzellen-Hybridbus als **Plug-In-Hybrid** betrieben wird: Werden nur etwa 25 % der benötigten Energie über elektrische Ladestationen zugeführt, sinkt der Primärenergiebedarf (Schweizer Strommix) bereits um 25 bis 40 %. Damit die Emissionen nicht in gleichem Masse steigen, ist darauf zu achten, dass die Aufladung ausschliesslich mit Elektrizität aus erneuerbaren Quellen erfolgt.

Den meist niedrigsten Energiebedarf sowie, selbst bei einem Strommix mit hohem Anteil fossiler Primärenergie, geringe Emissionen verzeichnet der **Trolleybus**, dicht gefolgt vom **Trolley-Hybridbus** (batteriegestützter Trolleybus) und dem **Batteriebus**. Sie verbrauchen in der Regel nur etwa 40 bis 50 % der Energie, welche ein Dieselsebus auf gleicher Strecke benötigt. Beim Schweizer Strommix erreichen sie ebenso niedrige Emissionswerte wie der Brennstoffzellen-Hybridbus. Im deutschen Strommix ist der Abstand zu Letzterem grösser, es werden, verglichen mit dem Dieselsebus, dennoch etwa 30 bis 50 % weniger Treibhausgase emittiert. Aufgrund ihrer ähnlichen Wirkungsgrade bilden diese drei Antriebssysteme eine meist sehr eng beieinanderliegende Gruppe, sodass sie im Hinblick auf die Kenngrössen Energiebedarf und Emissionen als gleichwertig anzusehen sind. Es ist daher wenig sinnvoll, eines davon als bestes System auszuweisen.

Eine Zwischenstellung nehmen die **Dieselhybridbusse** ein. Ihr Energie- und Emissionsreduktionspotenzial liegt im Vergleich zum Dieselsebus zwischen 0 und 40 %, insbesondere abhängig vom Halteabstand. Auf ebener Strecke ist bei Halteabständen um etwa 1000 m der Punkt erreicht, ab dem mit einem Dieselhybridbus keine Energieeinsparung mehr möglich ist. Bei Halteabständen zwischen etwa 300 und 500 m, welche im Stadtverkehr üblich sind, kann mit einer Energieersparnis im Bereich von 20 bis 35 % gerechnet werden; je geringer der Halteabstand ist, desto mehr Energie spart der Hybridbus; das (eher theoretische) Maximum wird mit gut 40 % Einsparung bei etwa 200 m Halteabstand erreicht. Die THG-Emissionen nähern sich hingegen bei grösseren Halteabständen als 400 m denen des Gasbusses an, sodass ihr Vorteil dann allein in deren geringerem Energiebedarf besteht. Werden sie als **Plug-In-Hybride** betrieben, erhöht sich die Energieersparnis, da der Anteil des Dieselsebetriebs reduziert wird. Mit einem Anteil der über Ladestationen zugeführten Energie zwischen etwa 20 und 35 % (Systemgrenze Fahrzeug) verringert sich die Abhängigkeit des Energiebedarfs vom Halteabstand, sodass selbst bei 1000 m etwa 35 bis 40 % Ersparnis möglich sind. Die Systemeigenschaften nähern sich also denen des Batteriebusses an.

7.1.2 Einfluss externer Faktoren

Der **Halteabstand** beeinflusst, wie schon im vorigen Abschnitt deutlich wurde, den Energiebedarf stark. Die teil- und vollelektrischen Antriebssysteme ver-

zeichnen bei kurzen Halteabständen (200 m) einen ungefähr doppelt, Diesel-, Gas und DE-Busse sogar einen etwa zweieinhalb Mal so hohen Energiebedarf wie bei langen Halteabständen (1000 m). Innerhalb dieser beiden Gruppen ist, unabhängig vom unterschiedlichen absoluten Energiebedarf, der relative Zuwachs annähernd gleich.

Beginnend bei Halteabständen um 250 m kann mittels **Auslaufabschnitten** Energie gespart werden. Im Falle von Diesel-, Gas- und DE-Bus sinkt der Energiebedarf gegenüber der Fahrt ohne Nutzung des Auslaufs um bis zu 15 % (Halteabstand 350 m), aber auch bei grösseren Abständen sind noch 10 % möglich (Halteabstand 700 m). Ist das Antriebssystem rückspeisefähig, sinkt dieser Anteil zwar, die Energieeinsparung erreicht trotzdem Werte zwischen 5 und 10 %. Die Reisezeitverlängerung beträgt nur etwa 1,0 bis 1,5 % (Dauer je Auslaufabschnitt ca. 10 s) und kann vernachlässigt werden.

Betrachtet man den Einfluss der **Neigung**, unterscheidet sich der relative Zuwachs, über alle Antriebssysteme gesehen, erheblich. Generell schlägt sich ein grösserer Anteil der geneigten Strecken in einem höheren Energiebedarf nieder. Leider ist es nicht gelungen, eine allgemeingültige spezifische Grösse – angedacht war ein auf die Summe der Höhendifferenzen bezogener Wert in Wattstunden je Bruttotonne und Höhenmeter – abzuleiten. Für die beiden in der generischen Fallstudie betrachteten Höhenprofile schien dies zwar möglich zu sein, die Berechnung weiterer Höhenprofile ergab jedoch, dass der Ansatz in dieser Form nicht haltbar ist.

Eine steigende **Besetzung** führt zu einer linearen Zunahme des Energiebedarfs. Relativ zum leeren Fahrzeug streuen die Werte, über alle Antriebssysteme gesehen, erheblich. Zudem wird der Einfluss der Gefässgrösse sichtbar: Der vollbesetzte Midibus verzeichnet, je nach Antriebssystem, einen Mehrbedarf von maximal 10 bis 25 %, während dieser Bereich beim Doppelgelenkbus zwischen etwa 20 und 50 % liegt. In dieser Betrachtung ist ein höherer Anteil positiv, denn er bedeutet, dass der Energiebedarf für die Bewegung des Fahrzeuges weniger stark ins Gewicht fällt, d. h. ein grösserer Anteil der Gesamtenergie dient der Bewegung der Nutzlast. Entscheidend ist es, eine möglichst hohe Auslastung zu erreichen, um den spezifischen Energiebedarf je Fahrgast zu minimieren. Ist die Besetzung zu niedrig, übersteigt der Verbrauch pro Kopf die im motorisierten Individualverkehr üblichen Werte.

Wenn **Heizenergie** benötigt wird, beeinflusst dies den Energiebedarf der Antriebssysteme auf sehr unterschiedliche Weise. Die Abwärmennutzung bei Diesel-, Gas- und DE-Bus sowie den Dieselhybridbussen lässt deren Energiebedarf erst dann anwachsen, wenn die Aussentemperatur so niedrig ist, dass die Zusatzheizung benötigt wird. Bei den vollelektrischen Systemen ist hingegen von Anbeginn zusätzliche Heizenergie erforderlich, sodass der Heizenergiebedarf bei niedrigen Aussentemperaturen (um -10°C) annähernd dem Traktionsenergiebedarf entspricht, sich der gesamte Energiebedarf also verdoppelt hat. Gerade in diesem Zusammenhang ist der Einfluss des **Strommixes** besonders augenfällig: Während beim Schweizer Strommix bei Temperaturen um -10°C der Energiebedarf von

Trolley-, Trolley-Hybrid und Batteriebusen sich langsam dem der Dieselhybridbusse angleicht, verbrauchen sie beim deutschen Strommix bereits fast so viel Energie wie der Dieselbus. Schon unterhalb von $+10^{\circ}\text{C}$ beziehen die vollelektrischen Systeme mehr Energie als die Dieselhybridbusse (und emittieren entsprechend auch mehr Treibhausgase). Gewichtet man Energiebedarf und Emissionen mit demselben Faktor, so sind beim deutschen Strommix die Dieselhybridbusse bei Temperaturen unterhalb von $+10^{\circ}\text{C}$ führend, während beim Schweizer Strommix, aufgrund der trotz des höheren Energiebedarfs weiterhin niedrigen Emissionen, die drei vollelektrischen Systeme unabhängig von der Aussentemperatur mit deutlichem Abstand am besten abschneiden.

7.1.3 Infrastruktur

Mit dem steigenden Grad der Elektrifizierung des Antriebsstrangs geht ein zunehmender Bedarf an Infrastrukturen der Energieversorgung einher. Beim Trolleybus bestand in dieser Hinsicht bis vor Kurzem keine Wahlmöglichkeit – es musste der gesamte Linienverlauf mit **Fahrleitung** ausgerüstet werden, da der Hilfsantrieb zu wenig leistungsfähig war, um nennenswerte Strecken damit zurücklegen zu können. Dies hat sich inzwischen geändert, mit dem Trolley-Hybridbus hat die Flexibilität zugenommen. Auch wenn dieser Aspekt hier nicht im Detail betrachtet werden konnte, ist in vielen Fällen die Ausrüstung von nur etwa der Hälfte der Strecke mit Fahrleitung ausreichend, um die Batterie wieder vollständig aufladen zu können (wobei eine Ladeleistung von 100 kW angenommen wurde). Die mitgeführte Batterie ermöglicht zudem, dass bei niedrigem **Rekuperationsgrad** (d. h. es findet sich aufgrund des Betriebsprogramms oder der Schaltung der Fahrleitungsanlage nur selten ein Abnehmer der Bremsenergie) die Bremsenergie dennoch gespeichert (und wieder genutzt) werden kann, was die Energieeffizienz verbessert. Dies ist vor allem bei einem höheren fossilen Anteil der Stromerzeugung (z. B. Strommix Deutschland) wichtig. Sinkt der Rekuperationsgrad in diesem Falle auf unter 50 %, würde der Trolleybus bei Halteabständen unter 400 m mehr Energie verbrauchen sowie mehr Treibhausgase emittieren als Dieselhybridbusse. Die gelegentlich geäußerte Meinung, er schneide gar schlechter als der Dieselbus ab, kann jedoch nicht bestätigt werden. Selbst ohne Rekuperation liegen Energiebedarf und Emissionen des Trolleybusses weiterhin etwa 20 % unter denen des Dieselbusses.

Für die **Ladeinfrastruktur** von Batteriebusen ist zuerst entscheidend, welches Ladekonzept angewendet wird: Zwischenaufladung oder Nachtladung. Zumindest für die hier untersuchten VBZ-Linien ist wegen des hohen Energiebedarfs die Nachtladung auf absehbare Zeit illusorisch, sodass hier nur die Zwischenaufladung betrachtet wird. Dieses Konzept ist sinnvoll nur umsetzbar, indem vorrangig die Wendezeiten als Ladezeit genutzt werden. Beispielsweise können bei einem spezifischen Energiebedarf von 2 kWh/km und einer Ladeleistung von 300 kW Linien bis zu einer Länge von etwa 8 km mit zwei Ladestationen versorgt werden. Längere Linien erfordern Ladestationen auch an Zwi-

schenhaltstellen, wobei aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Zeit jeweils nur wenig Energie übertragen werden kann, was die benötigte Anzahl schnell anwachsen lässt. Entscheidendes Kriterium ist die Ladeleistung: Für die VBZ-Dieselbuslinien wären bei 200 kW Ladeleistung rechnerisch 91 Ladestationen erforderlich. Wählt man stattdessen 300 kW, genügen deren 39.¹ Ein denkbare Szenario wäre, durch den Einsatz von Plug-In-Hybridbussen anfangs mit wenigen Ladestationen auszukommen und deren Anzahl sukzessive zu steigern, womit der elektrische Fahranteil der Busse stetig zunimmt. Hiermit würde man auch die Frage nach der Energiereserve für Verspätungen vermeiden, da der Dieselantrieb als Rückfallebene bereitsteht, falls eine oder mehrere Aufladungen verspätungsbedingt entfallen mussten.

7.2 Diskussion

7.2.1 Beantwortung der Forschungsfrage

An dieser Stelle gilt es, den Kreis zu schliessen, indem zuerst die Hypothesen geprüft werden und anschliessend die Forschungsfrage beantwortet wird.

1. Der Antriebsstrang von Bussen kann auf systemtheoretischer Basis, also unabhängig von der konkreten technischen Realisierung, modelliert werden.

Die Hypothese kann bestätigt werden, denn das im 4. Kapitel hergeleitete generische Modell erlaubt eine realisierungsunabhängige Modellierung. Daran ändert auch die – grundsätzlich auf einer konkreten Realisierung basierende – Aufteilung des Wandlers am Gleichspannungszwischenkreis nichts. Ist dieser nicht vorhanden, so kann das Modell durch das «Unwirksamschalten» von Subsystemen angepasst werden.

2. Das Zusammenwirken der Subsysteme lässt sich mittels Überlagerung von Energieflüssen abbilden.

Die Hypothese kann bestätigt werden. Mit den insgesamt neun Energie-, oder besser, Leistungsflüssen sowie deren Überlagerung ergibt sich, unter Heranziehung der jeweiligen Subsystemwirkungsgrade, der Leistungsbedarf eines jeden am Energiefluss beteiligten Subsystems. Der Leistungsbedarf am Ausgang eines Subsystems legt denjenigen an dessen Eingang fest, womit sich wiederum der Leistungsbedarf des benachbarten Subsystems ergibt.

3. Für alle Einsatzbedingungen im Stadtverkehr lässt sich mindestens ein dafür geeignetes Antriebssystem bestimmen.

¹Der tatsächliche Bedarf wäre geringer, da sich gewisse Linienabschnitte überlagern, was sich in der vereinfachten Berechnung nicht widerspiegelt.

Diese Hypothese konnte nicht widerlegt werden; eine Bestätigung für alle denkbaren Fälle ist naturgemäss nicht möglich. Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Fallstudien konnten stets für alle zwölf Antriebssysteme plausible Ergebnisse erhalten werden.

4. Der Energiebedarf elektrischer Antriebssysteme ist stets geringer als der des Referenzsystems Dieselmotors.

Diese Hypothese ist widerlegt worden, sofern die Betrachtung auf Basis der Primärenergie (WTV) erfolgt. Sie trifft dann zu, wenn die genutzte Elektrizität überwiegend aus erneuerbarer Primärenergie stammt. Sobald jedoch ein nennenswerter Anteil der Stromerzeugung auf fossiler Primärenergie basiert, kann es vorkommen, dass Elektrobusse mehr Primärenergie benötigen als Dieselmotore. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn Heizenergie benötigt wird.

Die ersten drei Hypothesen stehen in direktem Zusammenhang mit der Forschungsfrage:

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?

Angesichts dessen, dass die ersten beiden Hypothesen bestätigt, die dritte zumindest nicht widerlegt wurde, kann die Forschungsfrage somit bejaht werden. In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass sich für zwölf verschiedene Antriebssysteme eine gemeinsame Vergleichsbasis finden lässt und der Vergleich erfolgreich durchgeführt werden kann.

7.2.2 Verbesserungspotenziale

Trotz aller Mühen, die für die Erstellung des Modells aufgewendet wurden, bestehen selbstverständlich zahlreiche Verbesserungspotenziale. Da nach der Devise «Vollständigkeit vor Genauigkeit» verfahren werden musste, waren im Bestreben, die Energieflüsse zum und im Fahrzeug vollständig abzubilden, verschiedentlich Abstriche bei der Berechnungsgenauigkeit unvermeidlich, dies betrifft verschiedene Subsysteme. Im Rahmen einer allfälligen Weiterentwicklung des Berechnungsmodells wären zuerst die folgenden Erweiterungen umzusetzen:

- Modellierung des Verbrennungsmotors anhand eines Drehzahl-Leistungskennlinienfeldes mit den zugehörigen Wirkungsgraden
- Integration eines Getriebemodells für das Automatikgetriebe
- Drehzahlabhängige Modellierung des Elektromotors

- Vertiefte Betrachtung der Hilfsbetriebe (z. B. Klimatisierung, Druckluftanlage)

Auch wenn es durch die Begrenzung der nutzbaren Ladung der Batterie (standardmässig zwischen 20 und 85 % der maximalen Energiemenge) indirekt berücksichtigt wurde, sollte auch ein Batteriemodell hinterlegt werden, das die Veränderung der Entlade- und Ladespannung abbildet. Hiermit lassen sich die erforderlichen Ströme (sowie die Verluste) bestimmen und auch allfällige Leistungsgrenzen aufgrund der Strombegrenzung besser abbilden. In einem weiteren Schritt liesse sich durch die Berücksichtigung der leistungsabhängigen Verluste der Stromrichter die Genauigkeit der Berechnung abermals verbessern. Grundsätzlich gilt es aber, zwischen Aufwand und Genauigkeit abzuwägen. Besonderes Augenmerk sollte dabei darauf gelegt werden, den Eingabeaufwand möglichst gering zu halten, damit das Modell für den Praktiker handhabbar bleibt.

Die zweite «Baustelle» ist das Energiemanagement. Gerade bei den Hybridbussen – und dabei vor allem den seriellen – hängt der Energiebedarf in hohem Masse von der Güte des Energiemanagements ab. Insbesondere ein zu grosser Anteil des Aufladebetriebs führt zu einem unnötig hohen Energieverbrauch, weshalb die Implementierung einer vorausschauenden Regelung der Energieflüsse hilfreich wäre. Es ist daher davon auszugehen, dass der serielle Dieselhybridbus in den hier berechneten Fallstudien etwas schlechter abschneidet, als es in der Realität der Fall wäre. Das Energiemanagement des Parallelhybridbusses ist offensichtlich robuster, sodass die berechneten Werte das Energiesparpotenzial besser wiedergeben.

Notwendig ist die Ergänzung von energiebasierten Emissionsfaktoren für die Schadstoffe, wodurch sich die Aussagekraft der Vergleichsmethodik vergrössern würde. Je nach Detailtiefe der Modellierung des Verbrennungsmotors wäre zudem denkbar, die Schadstoffemissionen direkt zu berechnen.

Eine wünschenswerte, wenn auch aufwändige Ergänzung wäre die Modellierung der Energieflüsse in der Fahrleitung. Hiermit würde man sowohl die Verluste genauer berechnen können als auch das Rekuperationspotenzial korrekt abbilden. Letzteres erfordert allerdings, die Berechnung auf sämtliche Fahrzeuge zumindest einer Linie (oder gar des ganzen Netzes) auszuweiten, was einen erheblichen Zusatzaufwand bei der Dateneingabe sowie längere Berechnungszeiten zur Folge hätte. In diesem Falle muss zwingend der Berechnungsgeschwindigkeit erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet werden. Beispielsweise sollte sich die Rechenzeit durch die Verbesserung der Bremswegberechnung (mittels Rückwärtsberechnung) verkürzen lassen.

7.3 Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick

Ein wichtiger Schritt wäre, das hier vorgestellte Modell um eine detaillierte Betrachtung des Investitionsbedarfs und der Betriebskosten zu erweitern. Diese Erweiterung muss, neben den Prognosen zur Preisentwicklung für Energie und

Emissionszertifikate, auch die zu erwartende Entwicklung der Rohstoffpreise berücksichtigen. Käme es tatsächlich dazu, dass der motorisierte Individualverkehr elektrifiziert würde, stiege die Nachfrage nach bestimmten Rohstoffen erheblich an. Gemäss einer Studie von UBS Global Research nähme die Nachfrage nach Lithium gegenüber heute um das 25-Fache, die nach Kobalt um rund das 20-Fache zu, wenn nur noch Fahrzeuge des Typs Chevrolet Bolt gebaut würden.² Ein zu starker Preisanstieg dieser Rohstoffe könnte sich zu einem Hindernis für die Einführung von Batteriebusen entwickeln, denn die benötigten Mengen sind für einen Bus bedeutend grösser als für einen PW, sodass Preissteigerungen entsprechend stärker ins Gewicht fallen.

Versucht man sich an einer Quantifizierung der grauen Energie, erkennt man, dass die erforderlichen Energiebedarfswerte für die Herstellung von Bussen sowie insbesondere für die Errichtung der benötigten Infrastruktur nur sehr spärlich zu finden sind. Natürlich ist der ÖV, verglichen z. B. mit dem motorisierten Individualverkehr, eine Nischenanwendung. Es wäre dennoch wünschenswert, wenn solche Angaben wenigstens für einige generische Fälle zur Verfügung stünden. Angesichts der prognostizierten Veränderungen hinsichtlich der benötigten Rohstoffe ist zu erwarten, dass der grauen Energie zukünftig ein grösserer Anteil an der Gesamtenergie zukommen wird. Die Energieeffizienz der elektrischen Antriebssysteme verstärkt diese Tendenz.

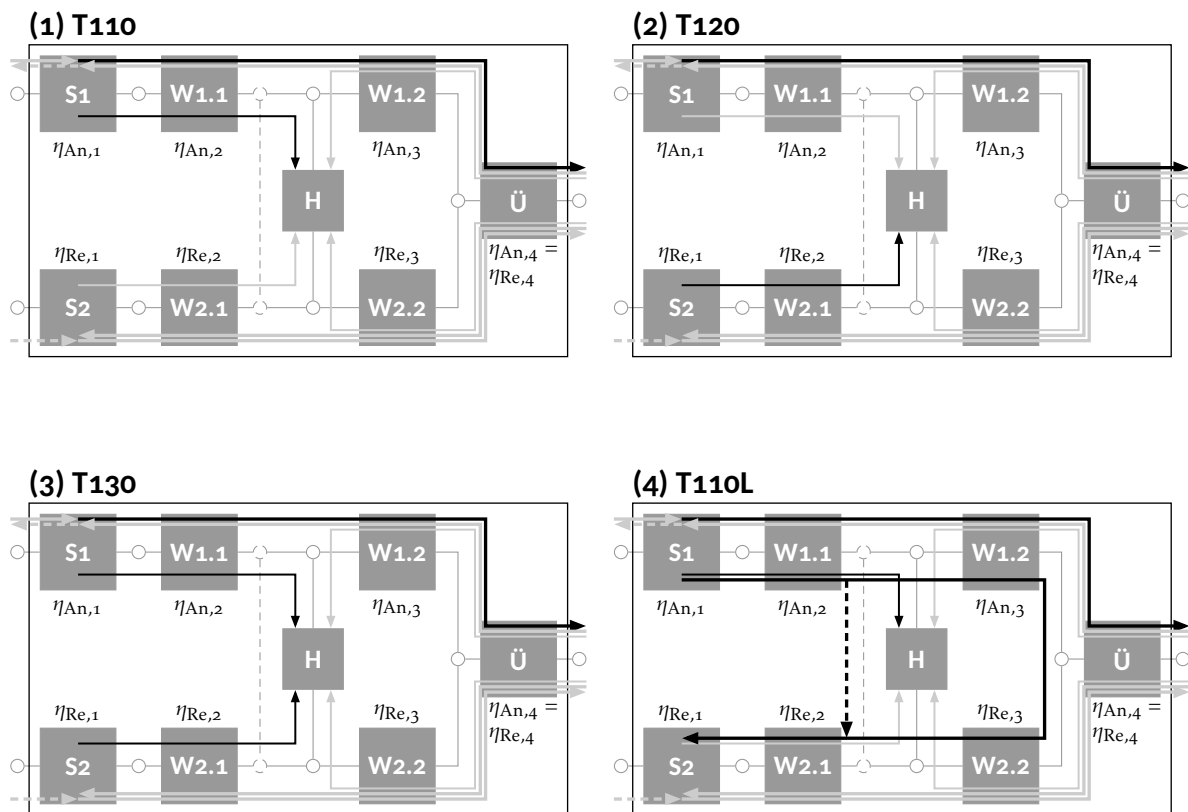
Man muss kein Hellseher sein, um zu erkennen, dass, unabhängig davon, welchem (teil)elektrischen Antriebssystem der Vorzug gegeben wird, die Batterie der Schlüssel zum Erfolg ist. Es müssen die beiden gegensätzlichen Forderungen – Gewährleistung sowohl einer hohen Leistungs- als auch Energiedichte – in Einklang gebracht werden, wobei eine dritte (und die vielleicht wichtigste) Anforderung nicht aus den Augen verloren werden darf: eine möglichst lange Lebensdauer. Gerade Letzteres ist entscheidend für einen wirtschaftlichen Betrieb.

²Zoll 2017.

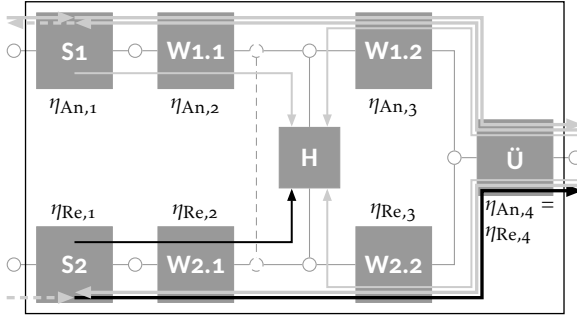
A | Anhang

A.1 Energieflussschemata

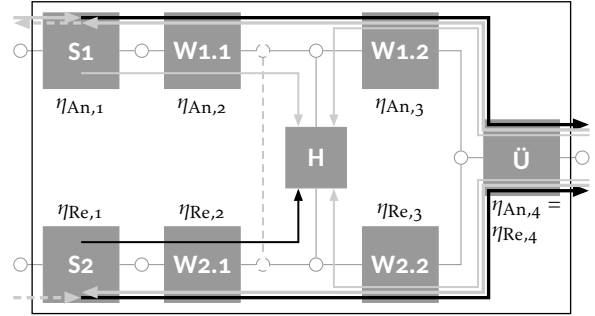
An dieser Stelle sind beispielhaft die Energieflussschemata der am häufigsten vorkommenden Betriebsmodi aufgeführt, um die Anwendung des Bezeichnungsprinzips gemäss Abbildung 4.5 zu veranschaulichen.



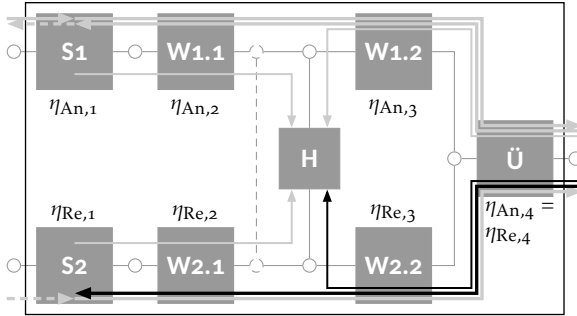
(6) T220



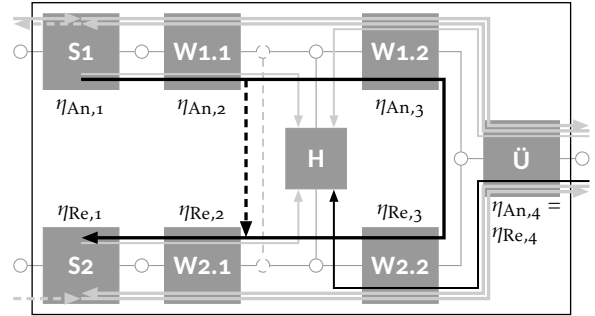
(9) T320



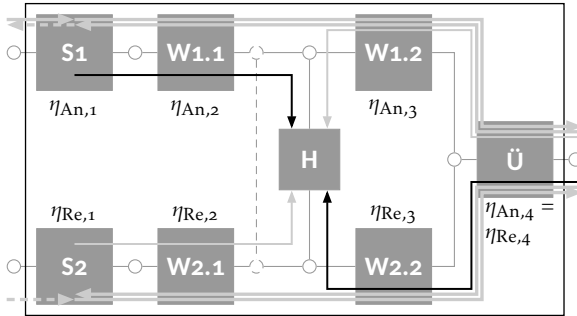
(23) B202



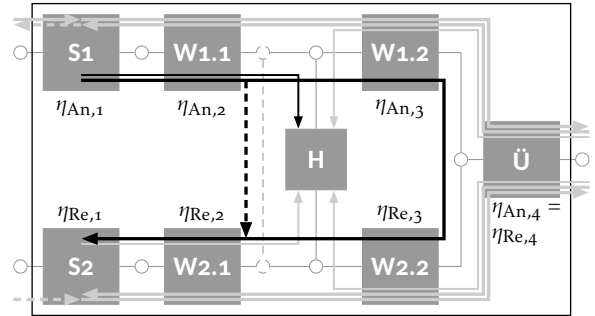
(32) B002L



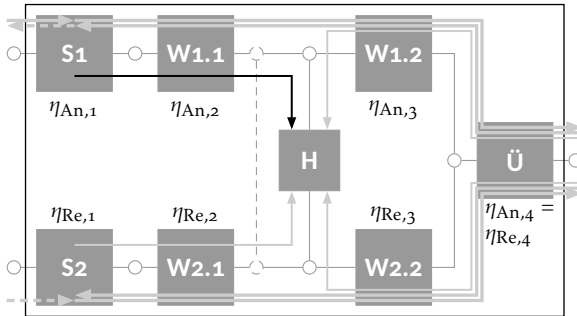
(34) B012



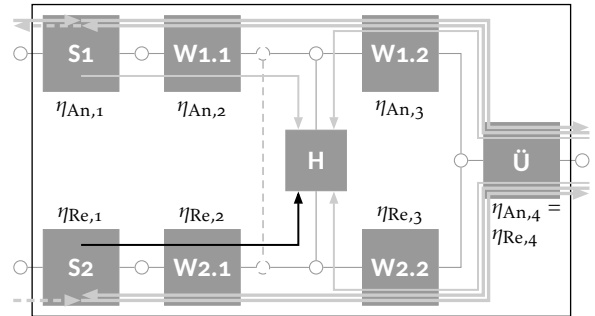
(45) B010L



(46) B010



(47) B020



A.2 Mittlerer Luftwiderstand

Um den mittleren Luftwiderstand für zwei Geschwindigkeiten v_1 und v_2 bestimmen zu können, wird die zugehörige mittlere Geschwindigkeit v_m benötigt, die wegen der Nichtlinearität eben nicht das arithmetische Mittel aus v_1 und v_2 ist. Mit Δv ist der Windzuschlag bezeichnet, der den durch Gegenwind verursachten Luftwiderstand überschlägig abbildet.

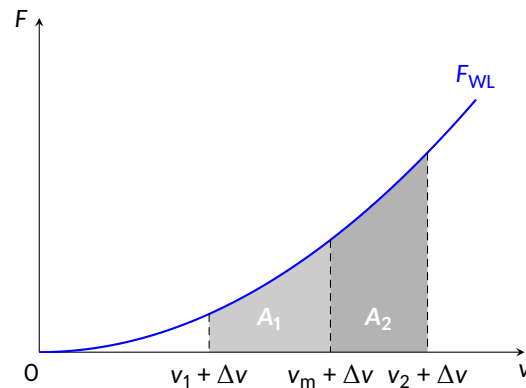


Abbildung A.1: Geschwindigkeit v_m für den mittleren Luftwiderstand

Gemäss Abbildung A.1 ergibt sich der Ansatz, dass der Wert v_m gesucht ist, für den $A_1 = A_2$ gilt. Somit ist die folgende Gleichung zu lösen:

$$\int_{v_1 + \Delta v}^{v_m + \Delta v} v^2 dv = \int_{v_m + \Delta v}^{v_2 + \Delta v} v^2 dv \quad (\text{A.1})$$

Mit der Lösung für das zugehörige unbestimmte Integral

$$\int v^2 = \frac{1}{3} v^3 + C \quad (\text{A.2})$$

erhält man mit den aufgelösten bestimmten Integralen die Gleichung

$$\frac{1}{3}(v_m + \Delta v)^3 - \frac{1}{3}(v_1 + \Delta v)^3 = \frac{1}{3}(v_2 + \Delta v)^3 - \frac{1}{3}(v_m + \Delta v)^3 \quad (\text{A.3})$$

woraus sich schliesslich die gesuchte Geschwindigkeit

$$v_m = \sqrt[3]{\frac{1}{2}(v_1 + \Delta v)^3 + \frac{1}{2}(v_2 + \Delta v)^3} - \Delta v \quad (\text{A.4})$$

ergibt, mit der sich die mittlere Luftwiderstandskraft bestimmen lässt.

A.3 Steigfähigkeit

Die maximale Steigfähigkeit ergibt sich, wenn – unter Vernachlässigung des Luftwiderstands und unter der Voraussetzung, dass die Antriebsleistung ausreicht – die maximal übertragbare Traktionskraft der Summe aus Roll- und Steigungswiderstand entspricht:

$$F_{Z,\max} = F_{WR} + F_{WS} \quad (\text{A.5})$$

Die Gewichtskraft auf den Treibachsen $F_{G,A}$ aus der Formel (4.3) lässt sich als

$$F_{G,A} = z_{G,A} \cdot m \cdot g \quad (\text{A.6})$$

mit $z_{G,A}$ als relativer Anteil der auf der Treibachse lastenden Gewichtskraft schreiben. Setzt man den Rollwiderstand gemäss (4.4) und den Steigungswiderstand nach (4.7) ein, so lässt sich die Gewichtskraft kürzen und man erhält

$$z_{G,A} \cdot \mu_H = f_R + \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \quad (\text{A.7})$$

Nun gilt bekanntlich

$$\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha = \frac{n}{100} \quad (\text{A.8})$$

womit sich folgende Beziehung ergibt, mit der sich die Steigfähigkeit (also die maximal überwindbare Steigung n) rein aus spezifischen Grössen bestimmen lässt:

$$n = (z_{G,A} \cdot \mu_H - f_R) \cdot 100 \quad (\text{A.9})$$

Beispielsweise würde ein Gelenkbus mit einer angetriebenen Achse ($z_{G,A} = 0,4$) und einem spezifischen Rollwiderstand von $f_R = 0,012$ bei einem Haftreibungsbeiwert von $\mu_H = 0,5$ eine Steigung von maximal 18,8 % bewältigen können. Da Strecken mit derartig starken Steigungen die Ausnahme darstellen, wird auf eine Prüfung der Steigfähigkeit verzichtet.

A.4 Energiemanagement

Dem Energiemanagement obliegt die Bestimmung der Traktions- oder Bremsleistung sowie, darauf beruhend, die Wahl des Betriebsmodus. Insbesondere bei den hybriden Antriebssträngen ist dies recht komplex, da zusätzlich eine Abhängigkeit zum Batterieladezustand besteht. Die Tabellen A.1 bis A.5 sind der Versuch, diese Abhängigkeiten in einer möglichst übersichtlichen Form darzustellen.

Tabelle A.1: Wahl des Betriebsmodus beim seriellen Dieselhybridbus

Batterieladezustand L	Bedingung	Modus	P_{DM}
Antreiben ($P_T > 0$)			
$L \geq L_{\max} - 10\%a$	1) $t - t_0 < 20\text{ s}$	T220 (6)	0
	2) $P_T \leq P_{DM,\max}$	T120 (2)	P_T
	3) sonst	T320 (9)	$P_{DM,\max}$
$L_{\min} + 10\% \leq L < L_{\max} - 10\%a$	1) $t - t_0 < 10\text{ s}$	T220 (6)	0
	2) $P_T + P_{HB} \leq P_{DM,\max}$	T110 (1)	$P_T + P_{HB}$
	3) $P_T \leq P_{DM,\max}$	T120 (2)	P_T
	4) sonst	T320 (9)	$P_{DM,\max}$
$L_{\min} < L < L_{\min} + 10\%$ (es gilt $P_T \leq P_{DM,\max}$)	1) $P_T = P_{DM,\max}$	T120 (2)	$P_{DM,\max}$
	2) $P_T + P_{HB} > P_{DM,\max}$	T130 (3)	$P_{DM,\max}$
	3) sonst	T110L (4)	$P_{DM,\max}$
$L \leq L_{\min}$ oder Aufladebetrieb (es gilt $P_T + P_{HB} \leq P_{DM,\max}$)	1) $P_T + P_{HB} = P_{DM,\max}$	T110 (1)	$P_{DM,\max}$
	2) sonst	T110L (4)	$P_{DM,\max}$
Bremsen ($P_B < 0$)			
$L \geq L_{\max}$	1) $P_{B,el} := 0$	B020 (47)	0
$L_{\max} - 10\% \leq L < L_{\max}$	1) $ P_{B,el} < P_{HB}$	B022 (37)	0
	2) sonst $P_{B,el} := -P_{HB}$	B002 (43)	0
$L_{\min} + 10\% \leq L < L_{\max} - 10\%$ $L \geq L_{anf}$ oder $L(t) > L(t - 120\text{ s})$	1) $ P_{B,el} < P_{HB}$	B022 (37)	0
	2) sonst	B202 (23)	0
sonst	1) $ P_{B,el} < P_{HB}$	B012L (31)	$P_{DM,soll}$
	2) sonst	B202L (23)	$P_{DM,soll}$
$L \leq L_{\min} + 10\%$ oder Aufladebetrieb	1) $ P_{B,el} < P_{HB}$	B012L (31)	$P_{DM,\max}$
	2) sonst	B202L (27)	$P_{DM,\max}$
Stillstand ($P_T = 0$ und $P_B = 0$)			
$L > L_{\min} + 10\%$	1) $L \geq L_{anf}$ oder $L(t) > L(t - 120\text{ s})$	B020 (47)	0
	2) sonst	B010L (45)	$P_{DM,soll}$
$L_{\min} < L \leq L_{\min} + 10\%$	-	B010L (45)	$P_{DM,soll}$
$L \leq L_{\min}$ oder Aufladebetrieb	-	B010L (45)	$P_{DM,\max}$

^a Für den Plug-In-Hybrid gilt hier ein Wert von 30 %.

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle A.2: Wahl des Betriebsmodus beim parallelen Dieselhybridbus

Batterieladezustand L	Bedingung	Modus	P_{DM}
Antreiben ($P_T > 0$)			
$L \geq L_{max} - 20\%a$	1) $t - t_0 < 10\text{ s}$ und $P_T \leq P_{EM,max}$	T220 (6)	0
	2) $P_T < P_{EM,max} + P_{DM,soll}$		
	2.1) $P_T \leq P_{EM,max}$	T220 (6)	0
	2.2) sonst	T320 (9)	$P_T - P_{EM,max}$
	3) sonst	T320 (9)	$P_{DM,soll}$
$L_{min} + 10\% \leq L < L_{max} - 20\%a$	1) $t - t_0 < 10\text{ s}$ und $P_T \leq P_{EM,max}$	T220 (6)	0
	2) $P_T + P_{HB} < P_{DM,max}$		
	2.1) $L \geq L_{anf}$ od. $L(t) > L(t - 120\text{ s})$	T120 (2)	P_T
	2.2) sonst	T110 (1)	P_T
	3) $P_T \leq P_{DM,max}$	T120 (2)	P_T
	4) sonst	T320 (9)	$P_{DM,soll}$
$L_{min} < L < L_{min} + 10\%$ (es gilt $P_T \leq P_{DM,max}$)	1) $P_T + P_{HB} < P_{DM,max}$	T110L (4)	$P_{DM,max}$
	2) $P_T + P_{HB} = P_{DM,max}$	T110 (1)	$P_{DM,max}$
	3) $P_T < P_{DM,max}$	T130 (3)	$P_{DM,max}$
	4) sonst	T120 (4)	$P_{DM,max}$
$L \leq L_{min}$ oder Aufladebetrieb (es gilt $P_T + P_{HB} \leq P_{DM,max}$)	1) $P_T + P_{HB} < P_{DM,max}$	T110L (4)	$P_{DM,max}$
	2) sonst	T110 (1)	$P_{DM,max}$
Bremsen ($P_B < 0$)			
$L \geq L_{max} - 10\%$	1) $ P_{B,el} < P_{HB}$	B022 (37)	0
	2) sonst $P_{B,el} := -P_{HB}$	B002 (43)	0
$L_{min} + 10\% \leq L < L_{max} - 10\%$	1) $ P_{B,el} < P_{HB}$	B022 (37)	0
	2) sonst	B202 (23)	0
$L \leq L_{min} + 10\%$	1) $ P_{B,el} < P_{HB}$	B012 (34)	$P_{HB} + P_{B,el}$
	2) sonst	B202 (23)	0
Stillstand ($P_T = 0$ und $P_B = 0$)			
$L > L_{min} + 10\%$	1) $L \geq L_{anf}$ oder $L(t) > L(t - 120\text{ s})$	B020 (47)	0
	2) sonst	B010L (45)	$P_{DM,soll}$
$L_{min} < L \leq L_{min} + 10\%$	-	B010L (45)	$P_{DM,soll}$
$L \leq L_{min}$ oder Aufladebetrieb	-	B010L (45)	$P_{DM,max}$

^a Für den Plug-In-Hybrid gilt hier ein Wert von 30 %.

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle A.3: Wahl des Betriebsmodus beim Brennstoffzellen-Hybridbus

Batterieladezustand L	Bedingung	Modus	P_{BZ}
Antreiben ($P_T > 0$)			
$L \geq L_{\max} - 10\%$	1) $P_T \leq P_{BZ,\min}$		
	1.1) $P_T + P_{HB} < P_{BZ,\min}$	T110L (4)	$P_{BZ,\min}$
	1.2) $P_T + P_{HB} = P_{BZ,\min}$	T110 (1)	$P_{BZ,\min}$
	1.3) $P_T < P_{BZ,\min}$	T130 (3)	$P_{BZ,\min}$
	1.4) sonst	T120 (2)	$P_{BZ,\min}$
	2) sonst		
	2.1) $P_T > P_{BZ,\text{mittl}}$	T320 (9)	$P_{BZ,\text{mittl}}$
	2.2) sonst	T120 (2)	P_T
$L_{\min} + 10\% < L < L_{\max} - 10\%$	1) $P_T + P_{HB} < P_{BZ,\min}$	T110L (4)	$P_{BZ,\min}$
	2) $P_T + P_{HB} = P_{BZ,\min}$	T110 (1)	$P_{BZ,\min}$
	3) $P_T < P_{BZ,\min}$	T130 (3)	$P_{BZ,\min}$
	4) $P_T = P_{BZ,\min}$	T120 (2)	$P_{BZ,\min}$
	5) sonst		
	5.1) $P_T + P_{HB} \leq P_{BZ,\text{mittl}}$	T110 (1)	$P_T + P_{HB}$
	5.2) $P_T < P_{BZ,\text{mittl}}$	T130 (3)	$P_{BZ,\text{mittl}}$
	5.3) $P_T = P_{BZ,\text{mittl}}$	T120 (2)	$P_{BZ,\text{mittl}}$
	5.4) $L \geq L_{\text{anf}}$ oder $L(t) > L(t - 120 \text{ s})$	T320 (9)	$P_{BZ,\text{mittl}}$
	5.5) sonst		
	5.5.1) $P_T + P_{HB} < P_{BZ,\text{soll}}$	T110L (4)	$P_{BZ,\text{soll}}$
	5.5.2) $P_T < P_{BZ,\text{soll}}$	T130 (3)	$P_{BZ,\text{soll}}$
	5.5.3) $P_T = P_{BZ,\text{soll}}$	T120 (2)	$P_{BZ,\text{soll}}$
5.5.4) sonst	T320 (9)	$P_{BZ,\text{soll}}$	
$L_{\min} < L \leq L_{\min} + 10\%$ (es gilt $P_T \leq P_{BZ,\text{soll}}$)	1) $P_T = P_{BZ,\text{soll}}$	T120 (2)	$P_{BZ,\text{soll}}$
	2) $P_T + P_{HB} > P_{BZ,\text{soll}}$	T130 (3)	$P_{BZ,\text{soll}}$
	3) $P_T + P_{HB} = P_{BZ,\text{soll}}$	T110 (1)	$P_{BZ,\text{soll}}$
	4) sonst	T110L (4)	$P_{BZ,\text{soll}}$
$L \leq L_{\min}$ (es gilt $P_T + P_{HB} \leq P_{BZ,\text{max}}$)	1) $P_T = P_{BZ,\text{max}}$	T120 (2)	$P_{BZ,\text{max}}$
	2) $P_T + P_{HB} > P_{BZ,\text{max}}$	T130 (3)	$P_{BZ,\text{max}}$
	3) $P_T + P_{HB} = P_{BZ,\text{max}}$	T110 (1)	$P_{BZ,\text{max}}$
	4) sonst	T110L (4)	$P_{BZ,\text{max}}$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.3: Wahl des Betriebsmodus beim Brennstoffzellen-Hybridbus (Fortsetzung)

Batterieladezustand L	Bedingung	Modus	P_{BZ}
Bremsen ($P_B < 0$)			
$L \geq L_{\max}$	1) $P_{HB} > P_{BZ,\min}$	BO30 (48)	$P_{BZ,\min}$
	2) $P_{HB} = P_{BZ,\min}$	BO10 (46)	$P_{BZ,\min}$
	sonst	BO10L (45)	$P_{BZ,\min}$
$L_{\max} - 10\% \leq L < L_{\max}$	1) $ P_{B,\text{el}} \leq P_{HB}$		
	1.1) $P_{HB} + P_{B,\text{el}} > P_{BZ,\min}$	BO32 (40)	$P_{BZ,\min}$
	1.2) $P_{HB} + P_{B,\text{el}} = P_{BZ,\min}$	BO12 (34)	$P_{BZ,\min}$
	1.3) sonst	BO12L (31)	$P_{BZ,\min}$
	2) sonst $P_{B,\text{el}} := P_{HB}$	BO02L	$P_{BZ,\min}$
$L_{\min} + 10\% < L < L_{\max} - 10\%$	1) $ P_{B,\text{el}} \leq P_{HB}$		
	1.1) $P_{HB} + P_{B,\text{el}} \geq P_{BZ,\min}$	BO12 (34)	P_{HB}
	1.2) sonst	BO12L (31)	$P_{BZ,\min}$
	2) sonst	B202L (27)	$P_{BZ,\min}$
$L \leq L_{\min} + 10\%$	1) $ P_{B,\text{el}} < P_{HB}$	BO12L (31)	$P_{BZ,\text{soll}}$
	2) sonst	B202L (27)	$P_{BZ,\text{soll}}$
Stillstand ($P_T = 0$ und $P_B = 0$)			
$L \geq L_{\max} - 10\%$	1) $P_{HB} > P_{BZ,\min}$	BO30 (48)	$P_{BZ,\min}$
	2) $P_{HB} = P_{BZ,\min}$	BO10 (46)	$P_{BZ,\min}$
	sonst	BO10L (45)	$P_{BZ,\min}$
$L_{\min} + 10\% \leq L < L_{\max} - 10\%$	$L \geq L_{\text{anf}}$ oder $L(t) > L(t - 120 \text{ s})$	1) $P_{HB} \geq P_{BZ,\min}$	BO10 (46) P_{HB}
		2) sonst	BO10L (45) $P_{BZ,\min}$
	sonst	1) $P_{HB} \geq P_{BZ,\text{mittl}}$	BO10 (31) P_{HB}
		2) sonst	BO10L (45) $P_{BZ,\text{mittl}}$
$L < L_{\min} + 10\%$	-	BO10L (45)	$P_{BZ,\text{soll}}$

$P_{BZ,\text{mittl}} = (P_{BZ,\min} + P_{BZ,\max}) / 2$
 Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle A.4: Wahl des Betriebsmodus bei den nicht-hybriden Antriebssystemen

Fahrzustand	Bedingung	Modus
Diesel- und Gasbus		
Antreiben ($P_T > 0$)	-	T110 (1)
Bremsen ($P_B < 0$)	-	B010 (46)
Stillstand ($P_T = 0$ und $P_B = 0$)	-	B010 (46)
Dieselelektrischer Bus		
Antreiben ($P_T > 0$)	-	T110 (1)
Bremsen ($P_B < 0$)	1) $ P_{B,el} < P_{HB}$	B011 (33)
	2) sonst $P_{B,el} := -P_{HB}$	B001 (42)
Stillstand ($P_T = 0$ und $P_B = 0$)	-	B010 (46)
Batteriebus		
Antreiben ($P_T > 0$)	-	T220 (6)
Bremsen ($P_B < 0$)	1) $ P_{B,el} < P_{HB}$	B022 (37)
	2) $ P_{B,el} = P_{HB}$	B002 (43)
	3) sonst	B202 (23)
Stillstand ($P_T = 0$ und $P_B = 0$)	-	B020 (47)
Trolleybus		
Antreiben ($P_T > 0$)	-	T110 (1)
Bremsen ($P_B < 0$)	1) $ P_{B,el} < P_{HB}$	B011 (33)
	2) $ P_{B,el} = P_{HB}$	B001 (42)
	3) sonst	
	3.1) $\eta_{\text{Rekup}} > 0$	B101 (15)
	3.2) sonst $P_{B,el} := -P_{HB}$	B001 (42)
Stillstand ($P_T = 0$ und $P_B = 0$)	-	B010 (46)

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle A.5: Wahl des Betriebsmodus beim Trolley-Hybridbus im fahrleitungsgebundenen Betrieb

Batterieladezustand L	Bedingung	Modus
Antreiben ($P_T > 0$)		
$L = L_{\max}$	-	T110 (1)
$L < L_{\max}$	-	T110L (4)
Bremsen ($P_B < 0$)		
$L = L_{\max}$	1) $ P_{B,el} < P_{HB}$	B011 (33)
	2) $ P_{B,el} = P_{HB}$	B001 (42)
	3) sonst	
	3.1) $n_{\text{Rekup}} > 0$	B101 (15)
	3.2) sonst $P_{B,el} := -P_{HB}$	B001 (42)
$L < L_{\max}$	1) $ P_{B,el} < P_{HB}$	B012L (31)
	2) $ P_{B,el} = P_{HB}$	B002L (32)
	3) $ P_{B,el} < P_{Lad} $	B202L (27)
	4) sonst	
	4.1) $n_{\text{Rekup}} > 0$	B302 (29)
	4.2) sonst $P_{B,el} := P_{Lad} - P_{HB}$	B202 (23)
Stillstand ($P_T = 0$ und $P_B = 0$)		
$L = L_{\max}$	-	B010 (46)
$L < L_{\max}$	-	B010L (45)

P_{Lad} bezeichnet die Soll-Batterieladeleistung ab Fahrleitung (Vorgabe: $P_{Lad} = 100$ kW).

Quelle: Eigene Darstellung

A.5 Wirkungsgrade der Energiebereitstellung

Im Auftrag der EU-Kommission wurden zahlreiche Pfade der Energiebereitstellung («well-to-tank») für eine Reihe von fossilen und biogenen Kraftstoffen sowie für elektrische Energie untersucht.¹ Die Pfade sind jeweils in mehrere Zwischenschritte aufgeteilt, zu jedem dieser Zwischenschritte finden sich Zahlenwerte im Anhang 4 der zitierten Studie. Diese sind jedoch nicht in Form von Wirkungsgraden, sondern als Energiebedarf, bezogen auf 1 MJ des Kraftstoffs, angegeben. Diese Energiewerte müssen in Wirkungsgrade umgerechnet werden. Die Abbildungen A.2 bis A.4 enthalten die Wirkungsgrade jedes Zwischenschritts der Bereitstellungspfade für Dieselkraftstoff, Erdgas, elektrische Energie sowie Wasserstoff.

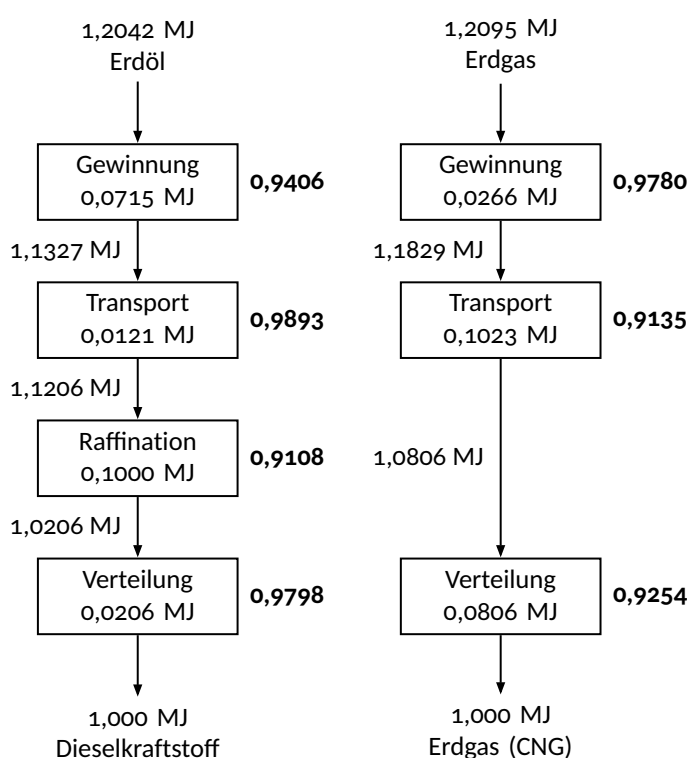


Abbildung A.2: Bereitstellungspfade für Dieseldieselkraftstoff und Erdgas (CNG). Die Energiewerte stammen aus Edwards u.a. 2014, Anhang 4, Datei *wtt_appendix_4_v4a_1_oil_gas.xlsx*, Pfade «COD1» und «GPCG1b». Die daraus abgeleiteten Wirkungsgrade sind in halbfetter Schrift angegeben.

Die Werte berücksichtigen nur die für die Wandlungen benötigte Energie, die graue Energie, z. B. für die Errichtung der Anlagen, ist nicht enthalten. Somit kann dem Windkraftwerk ein Wirkungsgrad von 1,0 zugeordnet werden, weil

¹Edwards u. a. 2014.

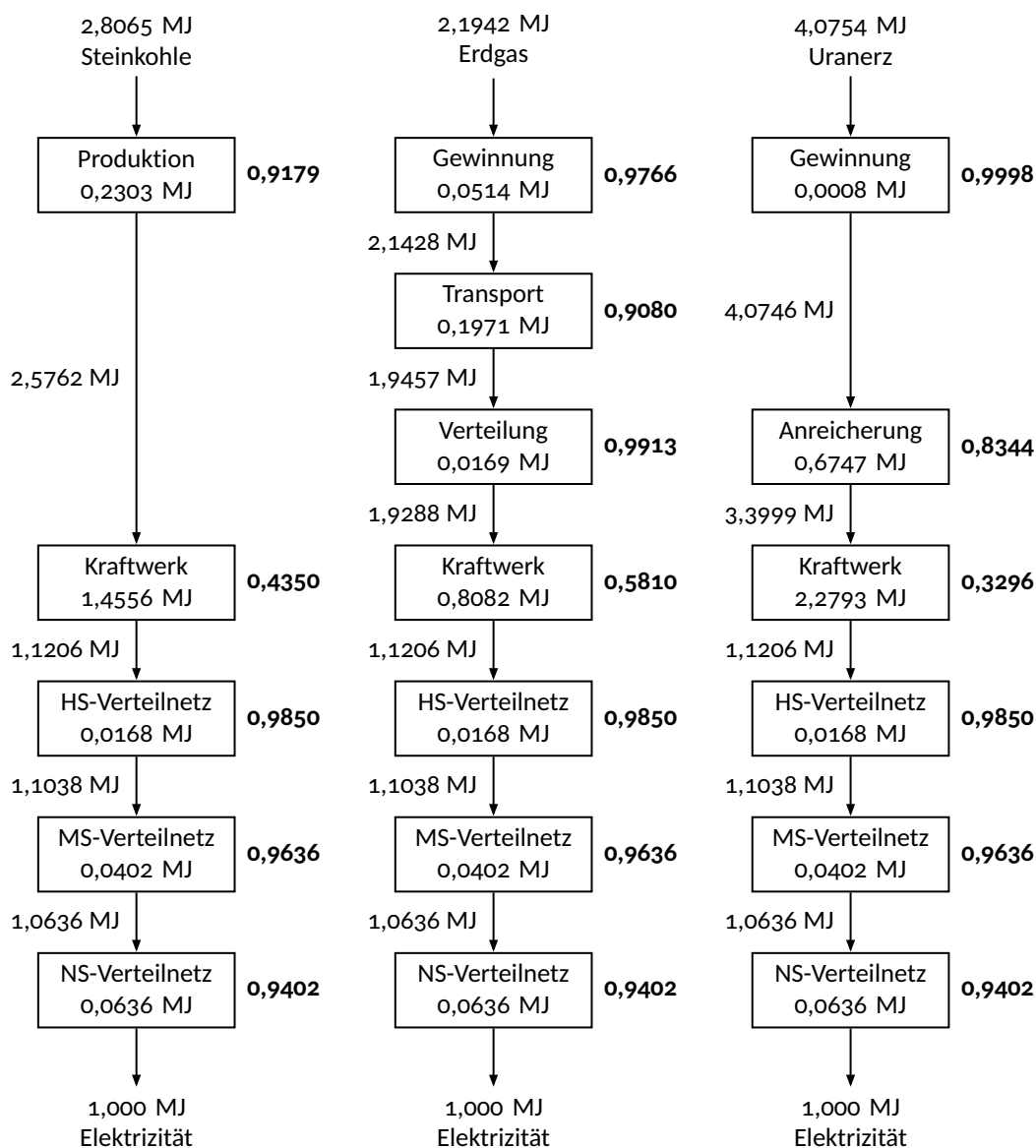


Abbildung A.3: Bereitstellungspfade für elektrische Energie. Die Energiewerte stammen aus Edwards u. a. 2014, Anhang 4, Datei *wtt_appendix_4_v4a_6_electricity.xlsx*, Pfade «KOEL1», Pfade «GPEL1b» und «NUEL». Die daraus abgeleiteten Wirkungsgrade sind in halbfetter Schrift angegeben.

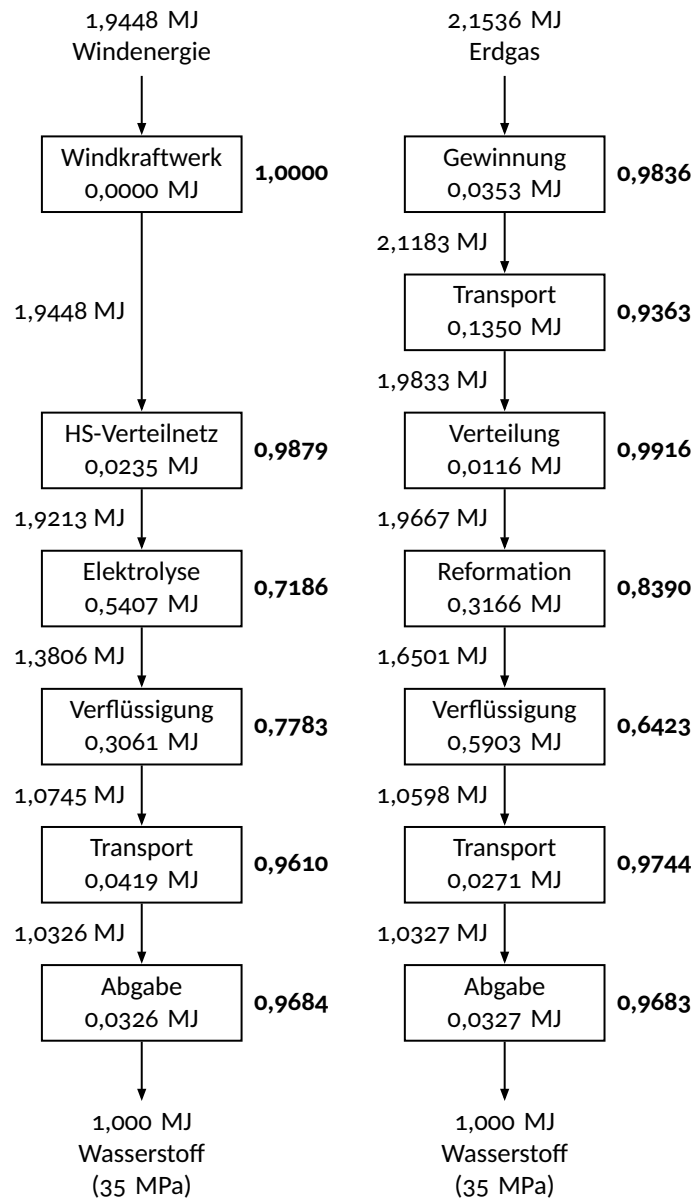


Abbildung A.4: Bereitstellungspfade für Wasserstoff (gasförmig, komprimiert auf 35 MPa). Die Energiewerte stammen aus Edwards u. a. 2014, Anhang 4, Dateien *wtt_appendix_4_v4a_9_hydrogen_electrolysis.xlsx*, Pfad «WDEL1/LH1» und *wtt_appendix_4_v4a_8_hydrogen_thermal.xlsx*, Pfad «GPLH1b». Die daraus abgeleiteten Wirkungsgrade sind in halbfetter Schrift angegeben.

wegen der praktisch unbegrenzten und kostenfreien Verfügbarkeit des Windes die Effizienz der Energiewandlung in der Energiebilanzbetrachtung nicht relevant ist.

Für Erdgas wurde aus mehreren möglichen Bereitstellungspfaden derjenige mit einem mittleren Energiebedarf ausgewählt. Diesem liegt die Annahme einer Gasförderung in Zentralasien sowie ein Pipelinetransport über ca. 4000 km zu Grunde. Dieser dürfte die Verhältnisse in Mitteleuropa am besten abbilden, da die Versorgung ausserdem, zu ähnlichen Anteilen, aus dem Nordseeraum (über ca. 1000 km) und aus Russland (über ca. 7000 km) erfolgt. Warum die Wirkungsgrade des Ferntransports (bei CNG 0,9135, bei Elektrizität 0,9080, bei Wasserstoff sogar 0,9363) differieren, obwohl jeweils die gleichen Annahmen zu Grunde liegen sollten, geht aus der Quelle leider nicht hervor.

Für die Wasserstoffbereitstellung wurden von den in der Studie untersuchten Pfaden zwei ausgewählt, welche für die mobile Nutzung des Wasserstoffs als am geeignetsten erschienen: Die elektrolytische Erzeugung mittels Elektrizität aus Windkraft sowie die chemische Reformation aus Erdgas in einer grossindustriellen Anlage. Da der Einsatz wasserstoffgetriebener Fahrzeuge in erster Linie deshalb geschieht, um Emissionen zu minimieren, sollte auch die Bereitstellung möglichst emissionsarm sein. Somit wird in dieser Arbeit allein der erste Pfad in Betracht gezogen.

A.6 Technische Daten von Bussen

Um einen Überblick über die als Eingangsgrössen benötigten Fahrzeugdaten zu erhalten, wurde versucht, die technischen Daten realisierter Fahrzeuge zusammenzustellen. Dies war mit gewissen Schwierigkeiten verbunden, da die Hersteller bei der Veröffentlichung technischer Daten ihrer Produkte unerwartet zurückhaltend agieren. Glücklicherweise konnten die benötigten Angaben stattdessen auf den Internetseiten von ÖV-Betreibern gefunden werden. Mehrere Beiträge in der Zeitschrift *stadtverkehr* waren ebenfalls hilfreich.

Es konnten die wichtigsten Daten für insgesamt 36 verschiedene Modelle, verteilt auf vier Gefässgrössen, zusammengetragen werden: 4 Midi- (Tabelle A.6), 14 Solo- (Tabelle A.7), 13 Gelenk- (Tabelle A.8) und 5 Doppelgelenkbusse (A.9). Dabei ist jedoch nicht jede Antriebsart bei jeder Gefässgrösse vertreten; beispielsweise sind, soweit bekannt, bislang noch keine Brennstoffzellen-Midibusse oder Batterie-Doppelgelenkbusse realisiert worden.

Die in den Tabellen angegebenen Stehplätze sind anscheinend meist auf etwa 6 Personen je Quadratmeter bezogen, eine Angabe des Bezugswertes fehlt jedoch in aller Regel. Ebenso ist oft nicht angegeben, ob es sich bei den Motorleistungen um Nenn- oder Maximalleistungen handelt. Es wird dann davon ausgegangen, dass es sich um die Nennleistungen handelt.

Für die Berechnung der maximal übertragbaren Traktionskraft wird der Anteil der Leer- und Gesamtmasse benötigt, welcher auf den Antriebsachsen lastet.

Tabelle A.6: Beispiele realisierter Midibusse

		Diesibus	Batteriebusse		Trolleybus
Hersteller		MAN	Optare	SOR	MAN/HESS
Typ		A35	Solo EV	EBN 10,5	NMT222
Baujahr		2011	2012		
Länge	m	9,65	9,2	10,37	9,7
Breite	m	2,38	k. A.	2,53	2,4
Höhe	m	2,98	k. A.	2,8	k. A.
Leermasse	t	10,24	11,3	10,1	9,1
zul. GG	t	k. A.	k. A.	16,5	k. A.
Sitzplätze		23	insg.	19	28
Stehplätze		33 ^b	55 Pl.	66	37 ^c
Leistung VM	kW	176	-	-	-
Leistung EM	kW	-	150	80 ^d	155
Batterie ^a	kWh	-	LE/138	LE/170	-
Quelle		[1]	[2]	[3]	[4]
spez. Leistung	kW	17,2	13,3	8,0 (12,0)	17,0
spez. Masse	kg/Sitzpl.	445		532	325

^a LE ... Lithium-Eisenphosphat

^b Hochgerechnet aus den in [1] angegebenen 11 Stehplätzen für 2 Pers./m²

^c Hochgerechnet aus den in [4] angegebenen 25 Stehplätzen für 4 Pers./m²

^d Dauerleistung (als Maximalleistung sind 120 kW angegeben)

Quellen: [1] VBZ 2017b; [2] *ZeEUS eBus Report* 2016, S. 96 f.; [3] Hondius 2013a, S. 15;

[4] Hondius 2003, S. 31

Die Achsen eines Busses sind dabei nicht gleichmässig belastet. Angaben zu den Achslasten sind allerdings recht selten zu finden, sodass hier nur eine Abschätzung anhand eines Beispiels erfolgen kann (siehe Tabelle A.10). Für Midibusse konnten keine Angaben gefunden werden; die Masseverteilung dürfte annähernd derjenigen des Solobusses entsprechen, sodass ebenfalls ein Wert von 0,6 angenommen werden kann.

Die Angaben zu den Stehplätzen sind mit gewisser Vorsicht zu interpretieren, denn in den meisten Fällen fehlt der Bezugswert, wie viele Personen je Quadratmeter angenommen wurden; Angaben zu Stehflächen finden sich noch weitaus seltener. Somit ist nicht klar, ob nicht sogar der Bemessungswert für die Nutzlast angegeben ist, was wenig hilfreich wäre: Beispielsweise schreiben die schweizerischen Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV) als Belastungsannahme für Strassenbahnen einen Wert von 8 Personen je Quadratmeter vor,² im alltäglichen Betrieb sind solche Dichten aber (glücklicherweise) vollkommen unrealistisch. Es werden daher wirklichkeitsnahe Stehplatzzahlen benötigt, auf deren Basis die Annahmen für die generischen Fahrzeuge getroffen werden können. Hier hilft die Internetpräsenz der Verkehrsbetriebe Zürich

²AB-EBV, AB 47.1, Ziffer 5.2.1; für Busse dürften vergleichbare Werte gelten.

Tabelle A.7: Beispiele realisierter Solobusse

Hersteller	Dieselbusse			Gasbusse			Dieselhybridbusse		
	EvoBus	MAN	Solaris	Volvo	EvoBus	MAN	VDL	Volvo	
Typ	O 530		Urbino 12 LE		Citaro NGT	Lion's City Hybrid (seriell)	Citea SLF-120 Hybrid (seriell)	7900 Hybrid (parallel)	
Baujahr	2008	2011	2015	2007	2015				
Länge	12	11,98	12	12,04	12,14	11,98	12	12,13	
Breite	2,55	2,5	2,55	2,55	2,55	2,5	k. A.	2,55	
Höhe	3,10	2,99	k. A.	3,37	3,39	3,3	k. A.	3,28	
Leermasse	11,99	11,27	11,6	12,54	k. A.	12,76	12,28	11,5	
zul. GG	17,98	18,75	18	18	k. A.	18	k. A.	19	
Sitzplätze	32	30	41	31	30	28	25	32	
Stehplätze	55	31	53	49	60	49	70	70	
Leistung VM	220	213	204	221	222	184	157	177	
Leistung EM	-	-	-	-	-	150	160	110	
Batterie ^a	-	-	-	-	-	SC/0,4	LT/18	LI/4,8	
Quelle	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	
spez. Leistung	18,3	18,9	17,6	17,6		14,4 (d) 11,8 (e)	12,8 (d) 13,0 (e)	15,4 (d) 9,6 (e)	
spez. Masse	375	376	283	405		456	491	359	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.7: Beispiele realisierter Solobusse (Fortsetzung)

Hersteller	BZ-Busse			Batteriebusse			Trolleybus
	EvoBus	VanHool New A 330 FC	Skoda	BYD	HESS	Skoda	
Typ			Perun HE	e-Bus12	Primove Mannheim	26Tr	
Baujahr	-	2014	-	-	2015	-	
Länge	12	13,16	12	12	11,97	12	
Breite	k. A.	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	
Höhe	k. A.	3,42	3,25	3,36	3,24	3,45	
Leermasse	13,2	15,7	12,86 ^b	13,9	12	10,9	
zul. GG	k. A.	26,0	18,6	18	18	k. A.	
Sitzplätze	insg.	33	27	19	36	34	
Stehplätze	76 Pl.	67	55	41	44	68	
Leistung VM	120	150	-	-	-	-	
Leistung EM	240	170	160	180	280	160	
Batterie ^a	LI/26,9	LI/17,4	LE/222	LE/324	LI/60	-	
Quelle	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	
spez. Leistung	9,1 (b) 18,2 (e)	9,6 (b) 10,8 (e)	12,4	12,9	23,3	14,7	
spez. Masse		476	476	732	333	321	

^a LI ... Lithium-Ionen, LE ... Lithium-Eisenphosphat, LT ... Lithium-Titanat, SC ... Superkondensatoren

^b Eigene Schätzung auf Basis des zulässigen Gesamtgewichts (Annahme: 70 kg je Fahrgast)

Quellen: [1] tpg 2017b; [2] BERNMOBIL 2017b; [3] Hondius 2015a; [4] BERNMOBIL 2017a; [5] Fritsch 2016; [6] Görgler 2013; [7] Hondius 2015c; [8] Volvo Buses 2016 und Hondius 2013b; [9] Skiker u. a. 2016, S. 11; [10] Marquardt 2014; [11] Škoda 2017a und ZeEUS eBus Report 2016, S. 101; [12] Hondius 2013a; [13] Koebel 2016; [14] Škoda 2017b

Tabelle A.8: Beispiele realisierter Gelenkbusse

Hersteller	Dieselbusse			Gasbus			Dieselhybridbusse		
	EvoBus	MAN		EvoBus			EvoBus	Solaris	Volvo
Typ	O 530 G	Lion's City GL		Citaro	BGH-N2C (seriell)		Citaro G BlueTec- Hybrid (seriell)	Urbino 18H (leistungs- verzweigt)	7900 Hybrid (parallel)
Baujahr	2008	2015		2009	2010		2011	2008	
Länge	17,94	18,75		18,14	17,98		17,94	18	18,13
Breite	2,55	2,55		2,55	2,55		2,55	2,55	2,55
Höhe	3,10	3,06		3,12	3,44		3,33	k. A.	3,28
Leermasse	17,42	15,6		17,14	19,28		18,8	17,59	17,1
zul. GG	28	27,8		28	28		28	28	29
Sitzplätze	46	39		39	38		35	47	41
Stehplätze	103	125		104	82		100	103	113
Leistung VM	260	265		240	220		160	181	177
Leistung EM	-	-		-	240		320	150	130
Batterie ^a	-	-		-	SC/0,9		LI/26	Ni/11,2	LI/9,6
Antriebsachsen	1	1		1	2		2	1	1
Quelle	[1]	[2]		[3]	[2]		[2]	[4]	[5]
spez. Leistung	14,9	17,0		14,0	11,4 (d)		8,5 (d)	10,3 (d)	10,4 (d)
spez. Masse	379	400		439	12,4 (e)		17,0 (e)	8,5 (e)	7,6 (e)
					507		537	374	417

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.8: Beispiele realisierter Gelenkbusse (Fortsetzung)

Hersteller	BZ-Bus		Batteriebusse		Trolleybusse		
	APTS	VanHool Exqui.City 18B	Bozankaya Sileo S18	VDL SLFA-180 Electric	Swisstrolley4 BGT-N2D	HESS	VanHool Exqui.City 18T
Baujahr	k. A.	2016	2016	2015	2013	2014	2014
Länge	18,5	18,6	17,96	18,15	18,7	18,6	18,6
Breite	k. A.	k. A.	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55
Höhe	k. A.	k. A.	3,2	3,30	3,45	3,5	3,5
Leermasse	20,2	19,8 ^b	20	ca. 18	19,6	20,34	20,34
zul. GG	k. A.	28	28	28	30	29	29
Sitzplätze	37	insg.	53	48	45	41	41
Stehplätze	61	117 Pl.	63	110	105 ^c	90	90
Leistung VM	150	-	-	-	-	-	-
Leistung EM	240	320	340	210	240	360	360
Batterie ^a	Ni/26 + SC/0,6	LI/215	LE/300	LI/122	LI/k. A.	LI/k. A.	LI/k. A.
Antriebsachsen	1	2	2	k. A.	2	2	2
Quelle	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[11]
spez. Leistung	7,4 (b) 11,9 (e)	16,2	17,0	11,7	12,2	17,7	17,7
spez. Masse	546		377	375	436	496	496

^a Li ... Lithium-Ionen, LE ... Lithium-Eisenphosphat, Ni ... Nickel-Metallhydrid, SC ... Superkondensatoren

^b Eigene Schätzung auf Basis des zulässigen Gesamtgewichts (Annahme: 70 kg je Fahrgast)

^c Hochgerechnet aus den in [10] angegebenen 35 Stehplätzen für 2 Pers./m²

Quellen: [1] tpg 2017c; [2] DVB 2017; [3] BERNMOBIL 2017c; [4] üstra 2017; [5] Hondius 2013b und Volvo Buses 2016;

[6] Hondius 2013a und Skiker u. a. 2016; [7] ZeEUS eBus Report 2016, S. 109 f.; [8] Bünnagel 2016; [9] Anemüller 2016c;

[10] VBZ 2017a; [11] tpg 2017d

Tabelle A.9: Beispiele realisierter Doppelgelenkbusse

Hersteller	Dieselbus		Dieselhybridbusse		Trolleybusse					
	VanHool AGG 300	2005	VanHool Exqui.City 24 (seriell)	2012	HESS UREVO (seriell)	2014	HESS LighTram3	2005	VanHool Exqui.City 24T	2017
Baujahr		2005		2012		2014		2005		2017
Länge		24,78		23,82		24,5		24,66		24
Breite		2,55		2,55		2,55		2,55		2,55
Höhe		3,28		k. A.		3,26		3,44		3,5
Leermasse		22,67		22,7		25,95		24,58		24
zul. GG		35,52		36		39		39,63		k. A.
Sitzplätze		70		42		60		66		53
Stehplätze		104		120		130		126		127
Leistung VM		265		184		220		-		-
Leistung EM		-		240		320		320		320
Batterie ^a		-		LI/48		LE/50		-		k. A./20
Antriebsachsen		1		1		2		2		2
Quelle		[1]		[2]		[3]		[4]		[5]
spez. Leistung		11,7		8,1 (d) 10,6 (e)		8,5 (d) 12,3 (e)		13,0		13,3
spez. Masse		324		540		433		372		453

^a LI ... Lithium-Ionen, LE ... Lithium-Eisenphosphat

Quellen: [1] tpg 2017a; [2] Hondius 2012; [3] Hondius 2015b; [4] tpg 2017e; [5] LINZ AG LINIEN 2015

Tabelle A.10: Abschätzung des Masseanteils auf den Antriebsachsen

	MAN Solo-Dieselbus		Volvo Solo-Dieselbus		Citaro Gelenk-Dieselbus		HESS Gelenk-Trolleybus		Doppelgelenkbus		
	leer	voll	leer	voll	leer	voll	leer	voll	leer	voll	
Gesamtmasse	t	11,27	18,74	12,54	18,05	17,14	28,00 ^a	16,93	27,95	23,70	38,00
Anteil VA	t	3,38	7,24	4,04	6,55	4,90	7,24	4,48	6,68	4,60	6,70
Anteil 1. MA	t	-	-	-	-	4,06	10,00	6,60	10,75	6,60	10,60
Anteil 2. MA	t	-	-	-	-	-	-	-	-	6,60	10,60
Anteil HA	t	7,89	11,50	8,50	11,50	8,18	11,50	5,85	10,52	5,90	10,10
Anteil (1 Antriebsachse)	-	0,70	0,61	0,68	0,64	0,48	0,41	0,39	0,38	0,28	0,28
gewählt		0,6		0,6		0,4		0,4		0,3	
Anteil (2 Antriebsachsen)	-	-	-	-	-	-	-	0,74	0,76	0,56	0,56
gewählt		-		-		-		0,7		0,5	
Quelle		[1]		[2]		[3]		[4]		[5]	

^a Zulässiges Gesamtgewicht (Summe der Achslasten ist höher)

Halbfett hervorgehobene Werte kennzeichnen die Antriebsachse, **halbfett kursiv** hervorgehobene Werte die allfällige 2. Antriebsachse.

Abkürzungen: VA ... Vorderachse, MA ... Mittelachse, HA ... Hinterachse

Quellen: [1] BERNMOBIL 2017b; [2] BERNMOBIL 2017a; [3] BERNMOBIL 2017c; [4] BERNMOBIL 2002;

[5] Eigene Schätzung auf Basis der Werte für den Gelenktrolleybus

Tabelle A.11: Sitz- und Stehplätze der bei den VBZ eingesetzten Bustypen

Gefässgrösse	Fahrzeugtyp	Baujahr	Länge in m	Breite in m	Sitzplätze	Stehplätze 2 Pers./m ²	Stehfläche in m ²	Stehfläche relativ ^a
Midibus	MAN A35	2006	9,65	2,38	23	11	5,5	23,9%
Solobus	Neoplan Centroliner N4516	2003	11,95	2,50	32	17	8,5	28,5%
»	Mercedes Benz O 530	2008	12,00	2,55	33	16	8,0	26,1%
»			Mittelwert:		32,5	16,5		
Gelenkbus	Neoplan Centroliner N4522	2003	18,72	2,50	48	29	14,5	31,0%
»	Mercedes Benz O 530 G	2008	18,00	2,55	43	27	13,5	29,4%
»	MAN Lion's City	2015	18,75	2,50	43	27	13,5	28,8%
»	HESS Swisstrolley3 BGT-N2C	2007	18,70	2,55	44	35	17,5	36,7%
»	HESS Swisstrolley4 BGT-N2C	2013	18,70	2,55	45	35	17,5	36,7%
»			Mittelwert:		44,6	30,6		
Doppelgelenkbus	HESS DGT LighTram3 (BGGT-N2C)	k. A.	24,70	2,55	60	48	24,0	38,1%

^a Bezogen auf die Grundfläche des Fahrzeugs

Quellen: <https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/de/vbz/fahrzeuge/>, besucht am 10.04.2017 und eigene Berechnungen

(VBZ) weiter, in welcher die Stehplätze mit kundenfreundlichen 2 Personen je Quadratmeter angesetzt sind und dieser Bezugswert auch explizit angegeben ist. Gemäss eigener Beobachtung entspricht die Innenraumaufteilung der VBZ-Busse dem üblichen Standard, weshalb sich die Zahlen guten Gewissens verallgemeinern lassen. Die Tabelle A.11 enthält die Angaben gemäss VBZ, die auf deren Basis gewählten Werte für die generischen Fahrzeuge sind in der Tabelle 4.1 auf Seite 57 zu finden; zu beachten ist, dass die dort aufgeführten Stehplätze auf 4 Personen je Quadratmeter bezogen sind.

A.7 Höhenprofile

Die Höhenprofile der Linien des VBZ-Netzes wurden auf Basis der in den Daten enthaltenen Koordinaten der Haltepunkte³ generiert. Die im System WGS84 – dem in GPS-Geräten verwendeten Bezugssystem – gegebenen Werte mussten zuerst mittels Näherungsformeln⁴ in Schweizer Landeskoordinaten umgerechnet werden, da das frei verfügbare digitale Höhenmodell DHM25 / 200m von Swisstopo⁵ auf Letzteren basiert. Es beinhaltet für das gesamte Gebiet der Schweiz die Höhenlagen in einem 200-m-Raster; um eine brauchbare Näherung für den Höhenwert einer Haltestelle zu erhalten, ist also eine Interpolation nötig.

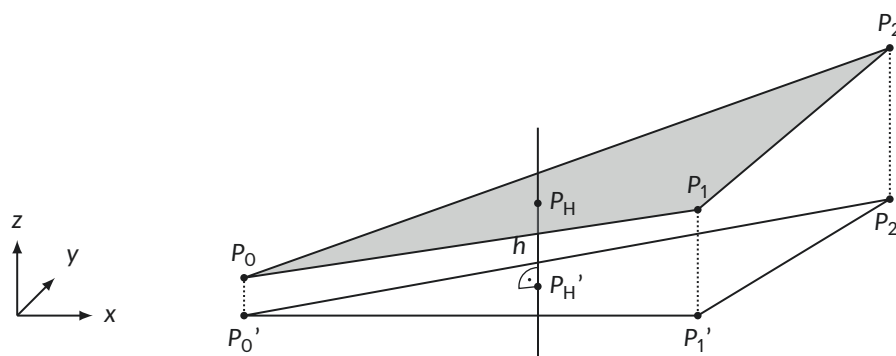


Abbildung A.5: Interpolation der Höhenlage der Haltestelle

Eine vergleichsweise einfache Variante ist, den Schnittpunkt einer senkrecht (in z-Richtung) durch den in der x-y-Ebene⁶ liegenden Koordinatenpunkt des Haltepunkts verlaufenden Gerade $\vec{r}_g(w)$ mit derjenigen Ebene $\vec{r}_e(u, v)$, die durch die (bezogen auf die x-y-Ebene) nächstgelegenen drei Rasterpunkte P_0 , P_1 und P_2

³Stadt Zürich 2015, Tabelle Haltepunkt.csv.

⁴swisstopo 2008, S. 11.

⁵swisstopo 2010.

⁶Hierbei ist zu beachten, dass bei den Schweizer Landeskoordinaten die x-Werte der Nord-Süd- und die y-Werte der West-Ost-Achse zugeordnet sind.

verläuft (siehe Abbildung A.5), zu berechnen:

$$\text{Ebene:} \quad \vec{r}_e(u, v) = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} x_3 - x_1 \\ y_3 - y_1 \\ z_3 - z_1 \end{pmatrix} v$$

$$\text{Gerade:} \quad \vec{r}_g(w) = \begin{pmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} w$$

Den gesuchten Schnittpunkt P_H erhält man, indem man die Geraden- und Ebenengleichung gleichsetzt, also

$$\vec{r}_e(u, v) = \vec{r}_g(w)$$

wodurch sich folgendes Gleichungssystem ergibt:

$$\begin{aligned} (x_2 - x_1)u + (x_3 - x_1)v &= x_4 - x_1 \\ (y_2 - y_1)u + (y_3 - y_1)v &= y_4 - y_1 \\ (z_2 - z_1)u + (z_3 - z_1)v - w &= z_4 - z_1 \end{aligned}$$

Indem man die zweite Gleichung mit dem Term

$$-\frac{x_3 - x_1}{y_3 - y_1}$$

multipliziert und anschliessend die erste Gleichung hinzuaddiert, erhält man einen Wert für u ; dieser lässt sich in die nach v umgestellte zweite Gleichung einsetzen, womit sich schliesslich durch Einsetzen beider Werte in die nach w umgestellte dritte Gleichung der Schnittpunkt ergibt:

$$\begin{aligned} u &= \frac{(x_4 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_4 - y_1)}{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)} \\ v &= \frac{y_4 - y_1 - (y_2 - y_1)u}{y_3 - y_1} \\ w &= (z_2 - z_1)u + (z_3 - z_1)v - (z_4 - z_1) \end{aligned}$$

Dabei ist w der eigentlich gesuchte Wert, nämlich die Höhe. Die Abbildung A.6 zeigt die Höhenprofile der für die VBZ-Fallstudie ausgewählten Buslinien.

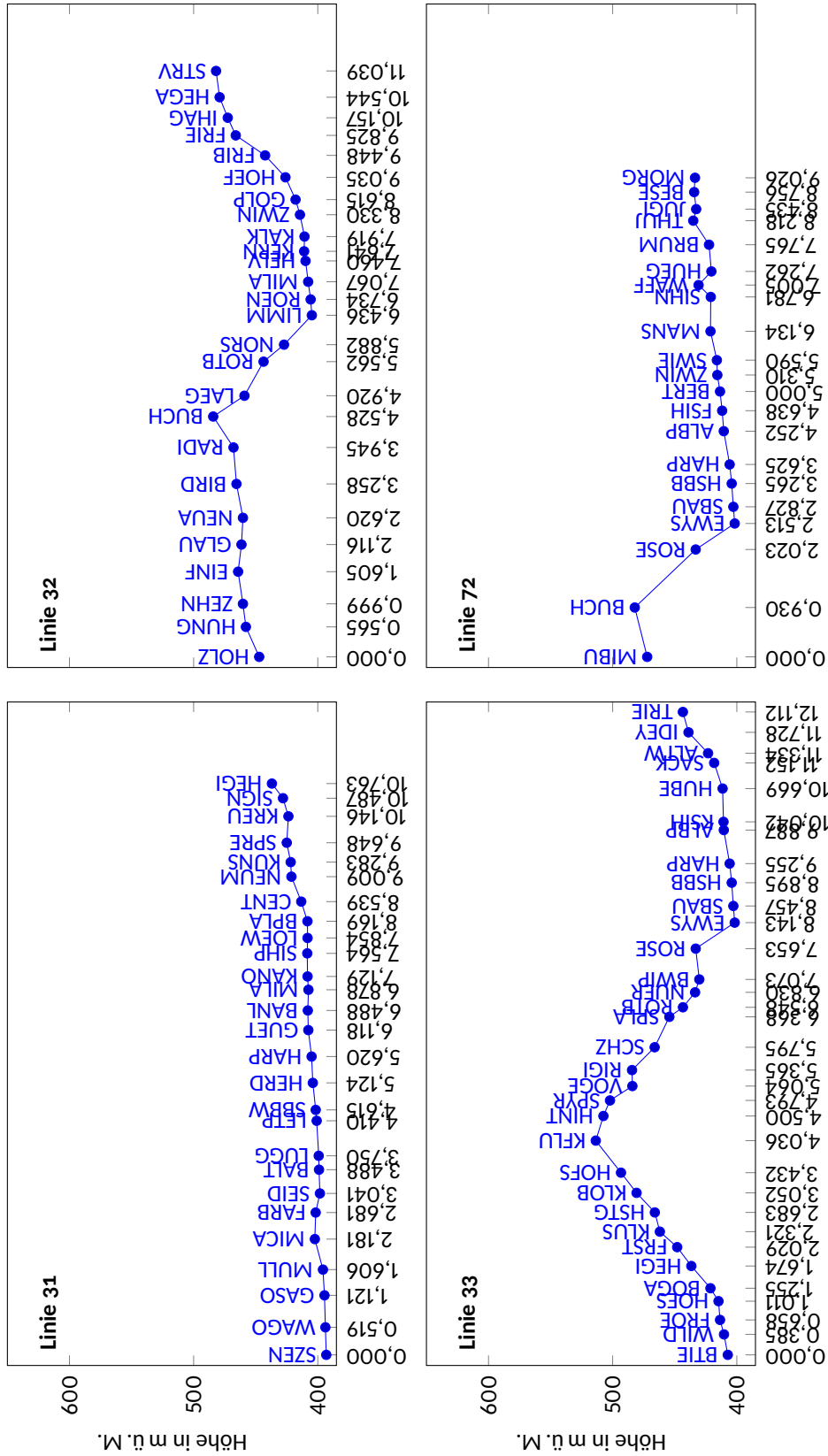


Abbildung A.6: Höhenprofile der für die VBZ-Fallstudie ausgewählten Buslinien

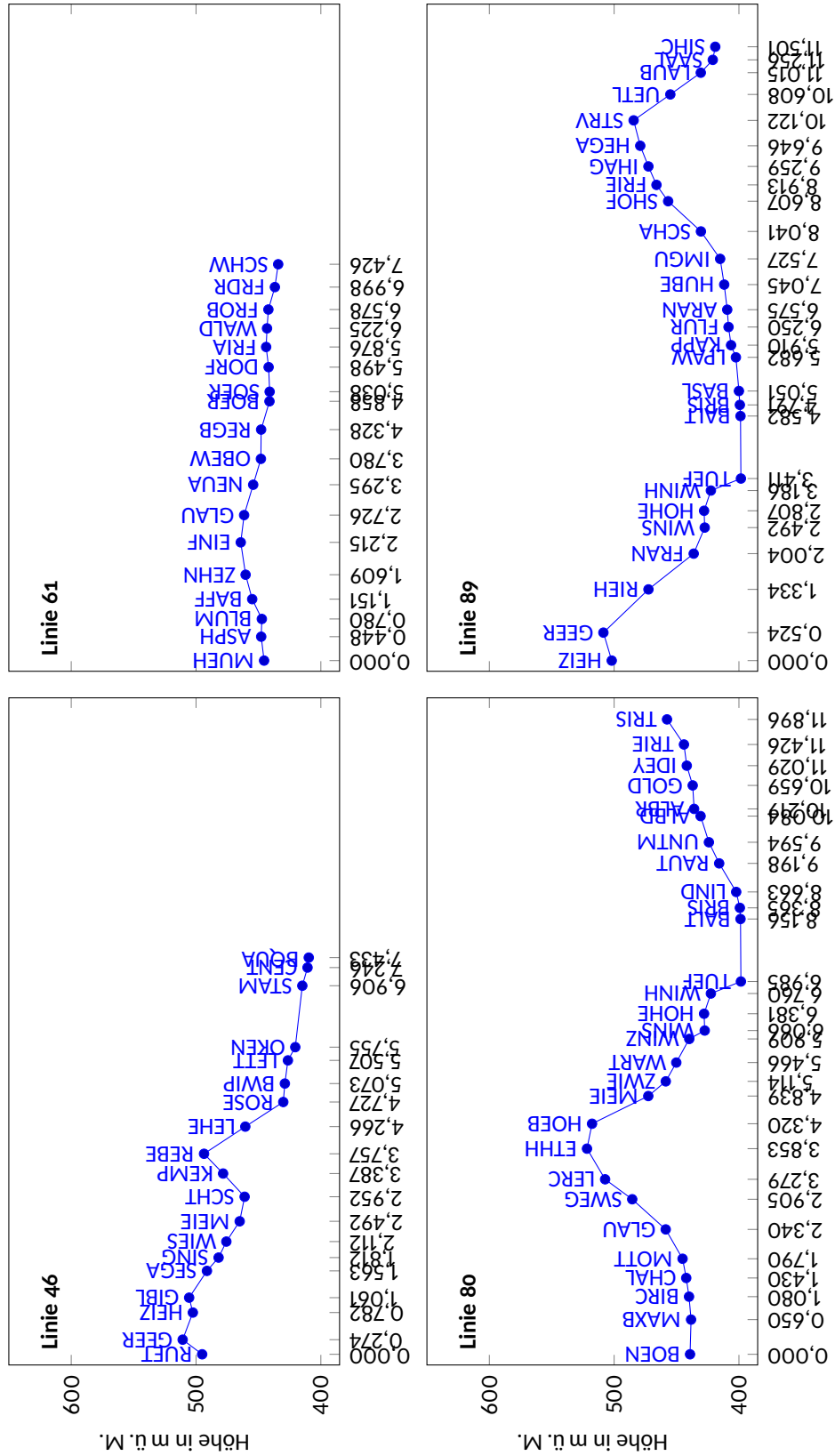


Abbildung A.6: Höhenprofile der für die VBZ-Fallstudie ausgewählten Buslinien (Fortsetzung)

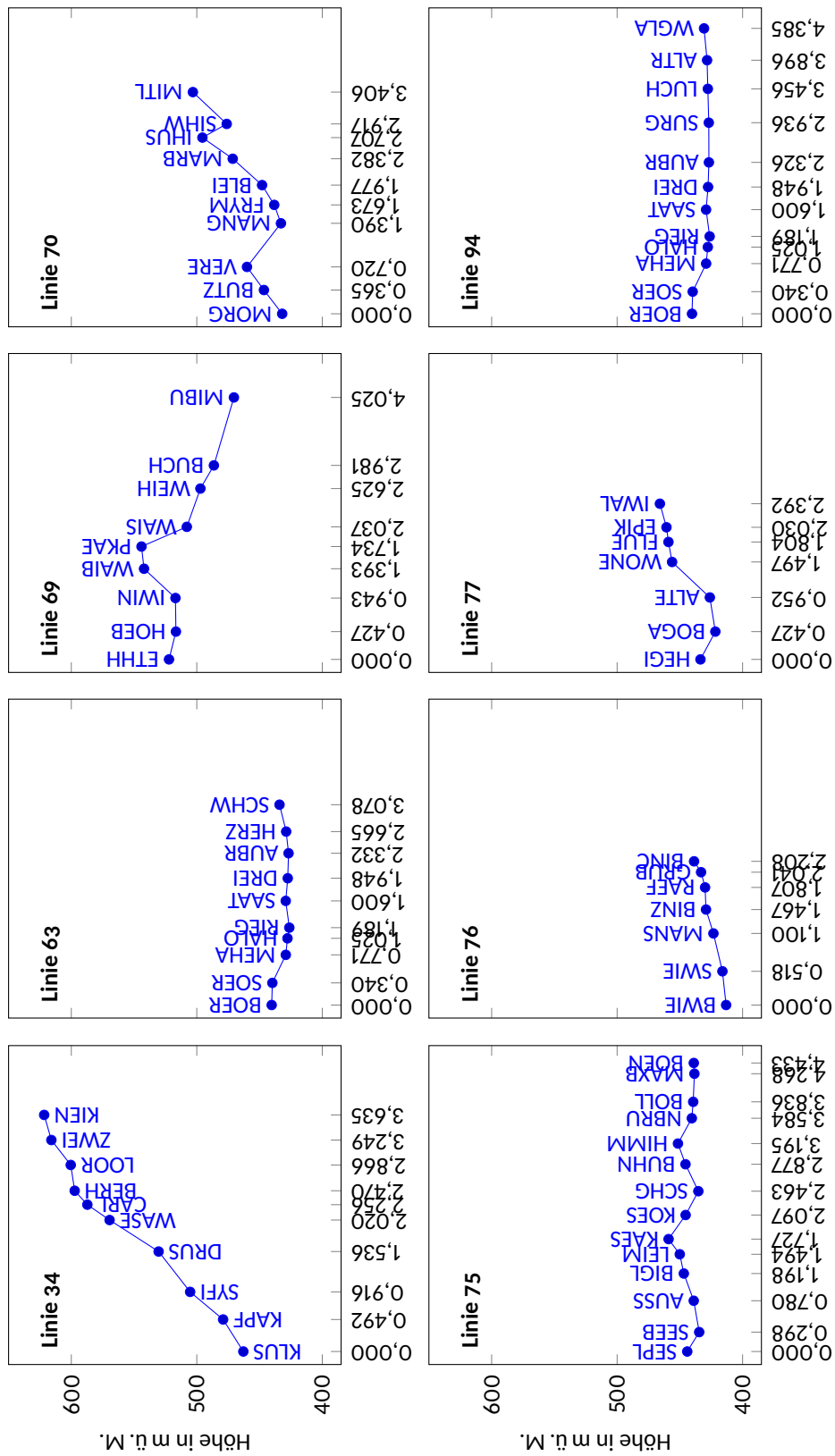


Abbildung A.6: Höhenprofile der für die VBZ-Fallstudie ausgewählten Buslinien (Fortsetzung)

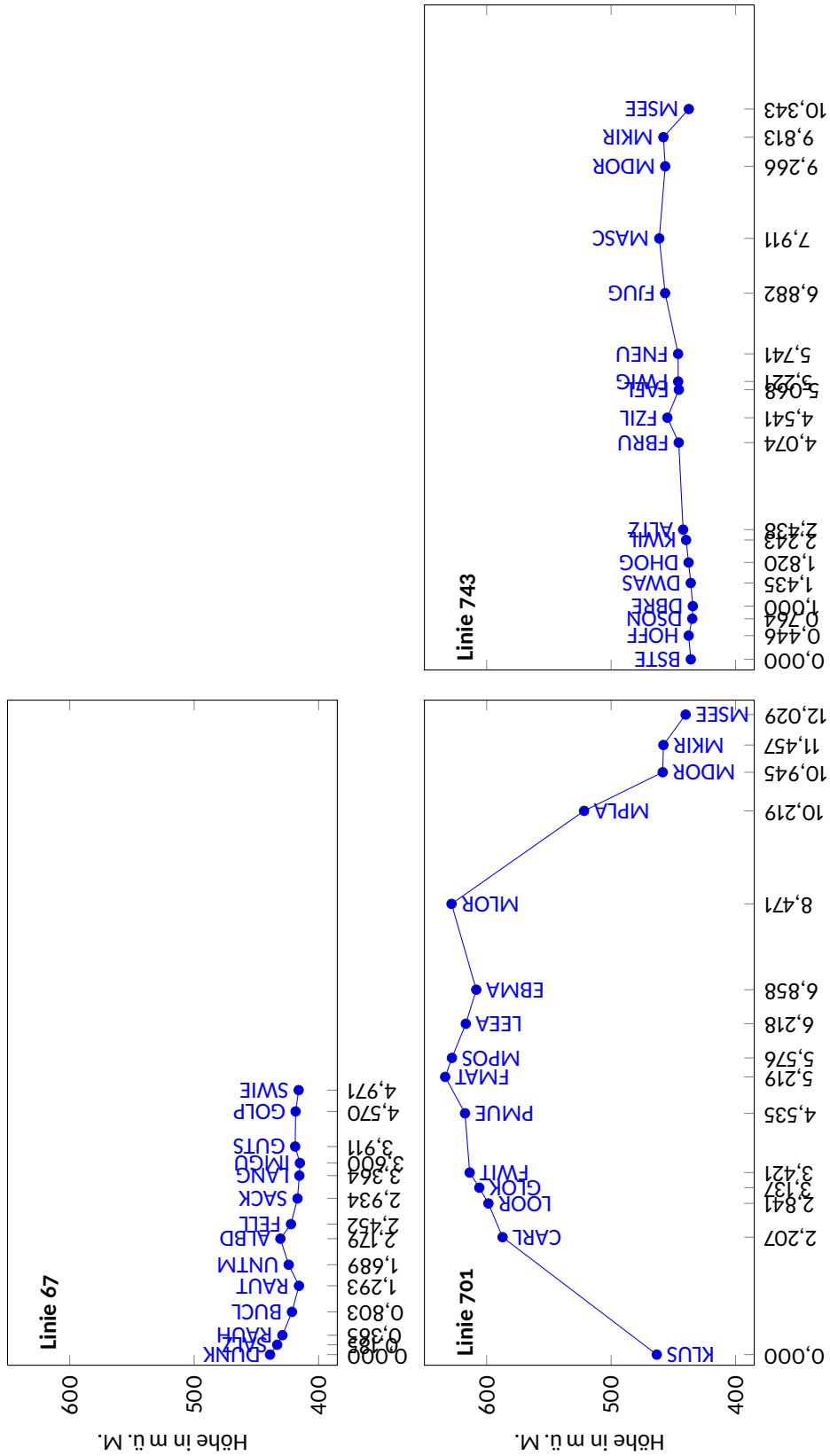


Abbildung A.6: Höhenprofile der für die VBZ-Fallstudie ausgewählten Buslinien (Schluss)

Literatur

- AG Energiebilanzen e.V., Hrsg. (2016). *Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern*. URL: http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=20161019_brd_stromerzeugung1990-2015.pdf (besucht am 13. 11. 2016).
- Andersson, Christian (2001). «Observations on Electric Hybrid Bus Design». Masterarbeit. Lund: Lund University.
- (2004). «On auxiliary systems in commercial vehicles». Dissertation. Lund: Lund University.
- Anemüller, Stephan (2016a). «Bus-Linie 133 der KVB wird elektrisiert – Teil 1. Mit einem umfangreichen Projekt leisten KVB und VDL Technologietransfer für die Zukunft des öffentlichen Nahverkehrs». In: *Verkehr+Technik* 69 (1), S. 3–6.
- (2016b). «Bus-Linie 133 der KVB wird elektrisiert – Teil 2. Mit einem umfangreichen Projekt leisten KVB und VDL Technologietransfer für die Zukunft des öffentlichen Nahverkehrs». In: *Verkehr+Technik* 69 (2), S. 50–54.
- (2016c). «Technologietransfer: Kölner E-Bus auf dem Weg zum Kunden». In: *stadtverkehr* 61 (3), S. 6–10.
- Aurich, Axel u. a. (2005). *Straßenbahnatlas Deutschland 2005*. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Blickpunkt Straßenbahn e.V.
- Barnitt, R. und K. Chandler (2006). *New York City Transit (NYCT) Hybrid (125 Order) and CNG Transit Buses. Final Evaluation Results*. NREL/TP-540-40125. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Basile, Robert (2013). «Nebenverbraucher und ihr Einfluss auf Reichweiten von E-Bussen. Herausforderungen an Klimatisierungs- und Heizungs-lösungen bei ÖPNV-Fahrzeugen mit Elektroantrieb». In: *Der Nahverkehr* 31 (11), S. 20–24.
- Bauer, Gerhard (1997). *Von der Gleislosen zum Oberleitungsomnibus. Die Entwicklung zwischen 1882 und 1945*. Dresden: Verlag für Verkehrsliteratur Dr. Bauer.
- Behmann, Uwe (2013). «Erster vollelektrisch autarker Serienomnibus in Europa». In: *Elektrische Bahnen* 111 (2), S. 86–88.
- (2014). «Elektrobus-Projekt TOSA in Genf». In: *Elektrische Bahnen* 112 (1-2), S. 10–12.

- BERNMOBIL (2002). *Gelenk - Trolleybus 1-8 + 9-20*. Typenblatt. URL: <https://www.bernmobil.ch/file/Unternehmen/Portrait/Fahrzeugpark/Typenblatt-Hess-Trolleybus.pdf> (besucht am 31.01.2017).
- (2017a). *Autobus 121-133/141-143*. Typenblatt. URL: <https://www.bernmobil.ch/file/Unternehmen/Portrait/Fahrzeugpark/Typenblatt-Volvo-CNG-Ab.pdf> (besucht am 31.01.2017).
- (2017b). *Autobus Nr. 151 - 154*. URL: <https://www.bernmobil.ch/file/Unternehmen/Portrait/Fahrzeugpark/Typenblatt-MAN-Diesel-Ab.pdf> (besucht am 31.01.2017).
- (2017c). *Gelenk-Autobus 841 - 864*. Typenblatt. URL: <https://www.bernmobil.ch/file/Unternehmen/Portrait/Fahrzeugpark/Typenblatt-Mercedes-Citaro-GAB.pdf> (besucht am 31.01.2017).
- BFE (2016). *Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2015*. Ittigen: Bundesamt für Energie (BFE).
- Bösch, Stefan u. a. (2009). *Framtida kollektivtrafiksystem i Uppsala. förstudie. Rapport 2009:54*. Trivector.
- Bourbon, Gaston u. a. (2012). *Abschlussbericht: Begleitendes Prüfprogramm im Rahmen des Fördervorhabens „Hybridbusse für einen umweltfreundlichen ÖPNV“*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- Brandl, Peter G. (2014). «E-Mobilität mit Zukunftschancen? Öffentlicher Verkehr und E-Mobilität im Spannungsfeld». In: *Der Nahverkehr* 32 (5), S. 14–16.
- Budach, Dirk (2013). «Der Athener Trolleybusbetrieb im aktuellen Umfeld». In: *stadtverkehr* 58 (9), S. 12–19.
- Budach, Dirk und Jürgen Lehmann (2015). «Vorerst komplett: Der Trolleybus in Castellón». In: *stadtverkehr* 60 (6), S. 30–35.
- Bünnagel, Claus (2016). «Sileo 18: Ein revolutionäres Konzept». In: *Verkehr+Technik* 69 (6), S. 196–200.
- Chandler, Kevin und K. Walkowicz (2006). *King County Metro Transit Hybrid Articulated Buses: Final Evaluation Results*. NREL/TP-540-40585. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Chandler, Kevin, Kevin Walkowicz und Leslie Eudy (2002). *New York City Transit Diesel Hybrid-Electric Buses: Final Results*. NREL/BR-540-32427. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Coppex, Jean-Philippe (2008). *Die Schweizer Überlandtrolleybusse*. Genève: Verlag Endstation Ostring.
- Corbo, Pasquale, Fortunato Migliardini und Ottorino Veneri (2011). *Hydrogen Fuel Cells for Road Vehicles*. London: Springer.
- Deutsch, Volker, Hrsg. (2008). *Hinweise zu Systemkosten von Busbahn und Straßenbahn bei Neueinführung*. FGSV 150. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).
- Dubrowsky, Dietrich, Burkhard Eberwein und Ralph Pütz (2004). «Strategien zur Nullemission von dieselgetriebenen Bussen. Abgasnachbehandlung und synthetischer Dieselkraftstoff für die weitere Emissionsreduzierung». In: *Der Nahverkehr* 22 (1-2), S. 7–14.

- DVB (2017). *Umweltfreundliche Busflotte*. Hrsg. von Dresdner Verkehrsbetriebe AG. URL: <https://www.dvb.de/de-de/die-dvb/technik/fahrzeuge/bus/> (besucht am 01.02.2017).
- E-Control (2015). *Ökostrombericht 2015*. Wien: Energie-Control Austria.
- Edwards, Robert u. a. (2014). *Well-to-Tank Report Version 4.a – JEC Well-to-Wheels Analysis*. EUR 26237 EN. Luxembourg: European Commission, Joint Research Centre.
- Elbert, Philipp (2014). «Noncausal and causal optimization strategies for hybrid electric vehicles». Dissertation. Zürich: ETH Zürich.
- Eudy, L. und M. Post (2014). *BC Transit Fuel Cell Bus Project: Evaluation Results Report*. NREL/TP-5400-60603. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Eudy, Leslie und Christina Gikakis (2013). *Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Current Status 2013*. NREL/TP-5400-60490. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Europäisches Parlament, Hrsg. (2009). *Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 und der Richtlinie 2007/46/EG sowie zur Aufhebung der Richtlinien 80/1269/EWG, 2005/55/EG und 2005/78/EG*. Amtsblatt der Europäischen Union L 188. Brüssel.
- Faist Emmenegger, Mireille u. a. (2012). *Harmonisation and extension of the bioenergy inventories and assessment. End report*. EMPA. URL: https://www.empa.ch/documents/56164/266846/a592-2012-09-24+Schlussbericht-Harmonisierung_Oekoinventare-DEF2.pdf/387fef13-0c8f-4011-8e21-5e874426a659?version=1.0 (besucht am 15.02.2017).
- Faltenbacher, Michael und Julian Grafetstätter (2016). *Projektübersicht 2015/16 Hybrid- und Elektrobuss-Projekte in Deutschland*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- Faltenbacher, Michael, Annekristin Rock und Olga Vetter (2011). *Abschlussbericht Plattform Innovative Antriebe Bus*. FKZ 03KP5001. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).
- Faltenbacher, Michael und Olga Vetter (2015). *Hybrid- und Elektrobuss-Projekte in Deutschland. Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus – Statusbericht 2014*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- Faltenbacher, Michael, Olga Vetter u. a. (2016). *Statusbericht 2015/16 Hybrid- und Elektrobuss-Projekte in Deutschland*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- Fatio, M. (1938). «Les trolleybus à Lausanne». In: *Bulletin technique de la Suisse Romande* 64 (26), S. 357–359.
- Fischer, Karl-Friedrich, Hrsg. (1996). *Taschenbuch der technischen Formeln*. München, Wien: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.

- Frischknecht, Rolf, René Itten und Karin Flury (2012). *Treibhausgas-Emissionen der Schweizer Strommixe v1.4*. Uster: ESU-services Ltd.
- Fritsch, Reinhard (2016). «Viel Neues im Busbereich. Messevorberichterstattung zur 66. IAA Nutzfahrzeuge in Hannover». In: *Der Nahverkehr* 34 (9), S. 34–42.
- Geiling, Ralf E. (2012). «Alternative Antriebe: Eine unendliche Geschichte». In: *Verkehr+Technik* 65 (11), S. 424–426.
- Görgler, Jürgen (2013). «MAN Lion's City Hybrid: In die Zukunft investiert». In: *Verkehr+Technik* 66 (5), S. 162–166.
- Haan, Peter de und Rainer Zah (2013). *Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz*. Zürich: vdf Hochschulverlag.
- Hadorn, Gérald und Sébastien Jacobi (1988). «Le gyrobus d'Yverdon». In: Grandguillaume, Michel u. a. *Voies étroites du Jura vaudois*. Lausanne: BVA, S. 329–335.
- Hammer, Sabine u. a. (2017). *Stand und Entwicklungstendenzen bei elektrisch betriebenen Linienbussen. Systemstudie*. Koppl: trolley:motion.
- Hanke, Dieter (2015). «Busporträt MAN SL-E». In: *Omnibusspiegel* 37 (5), S. 34–37.
- Hass-Klau, Carmen u. a. (2003). *Bus or Light Rail: Making the Right Choice. A Financial, Operational and Demand Comparison of Light Rail, Guided Buses, Busways and Bus Lanes*. 2. Aufl. Brighton: Environmental und Transport Planning.
- Hille, Jürgen (2011). «VISEON LT - Trolleybus in neuer Dimension». In: *Verkehr+Technik* 64 (12), S. 475–478.
- Hondius, Harry (2003). «Die Entwicklung der Obusse und der elektrischen Busantriebe». In: *stadtverkehr* 48 (9), S. 18–34.
- (2010). «Neue Obusse für den Stadtbus Salzburg». In: *stadtverkehr* 55 (4), S. 15–19.
- (2012). «Transports Publics 2012». In: *stadtverkehr* 57 (7-8), S. 14–19.
- (2013a). «Elektrische Busse im Kommen?» In: *stadtverkehr* 58 (5), S. 6–20.
- (2013b). «Volvo setzt auf Hybridbusse». In: *stadtverkehr* 58 (7-8), S. 24–28.
- (2014). «Was sparen Elektrobusse wirklich? Wirkungsgrade von Elektrobussen im Vergleich zu Dieselnissen vor dem Hintergrund der Konsequenzen der Energiewende». In: *Der Nahverkehr* 32 (10), S. 38–42.
- (2015a). «Busworld Kortrijk: Eine Auswahl von Neuheiten unter den ÖPNV-Bussen». In: *stadtverkehr* 60 (12), S. 6–17.
- (2015b). «UREVO: Doppelgelenk-Hybridbusse bei Voyages Emile Weber in Luxemburg». In: *stadtverkehr* 60 (5), S. 18–21.
- (2015c). «VDL Citea SLF-120 Hybrid von De Lijn in Leuven vorgestellt». In: *stadtverkehr* 60 (7-8), S. 26–27.
- (2016). «Bombardier: PRIMOVE-Induktionsanlagen in Berlin und Brügge». In: *stadtverkehr* 61 (3), S. 11–15.
- Hua, Thanh u. a. (2014). «Status of hydrogen fuel cell electric buses worldwide». In: *Journal of Power Sources* 269, S. 975–993.

- Janek, Jürgen und Philipp Adelhelm (2013). «Zukunftstechnologien». In: *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Hrsg. von Reiner Korthauer. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. Kap. 16, S. 199–217.
- Jonsson, Daniel K. (2005). *Indirekt energi för svenska väg- och järnvägstransporter. Ett nationellt perspektiv samt fallstudier av Botniabanan och Södra Länken*. FOIR-1557-SE (v.2). Totalförsvarets Forskningsinstitut.
- Juhrich, Kristina (2016). *CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe*. Climate Change 27/2016. Dessau: Umweltbundesamt.
- Kamm, Peter (2007). *Der Trolleybus in Zürich. Entstehung, Betrieb und Fahrzeuge seit 1939*. Zürich: Verein Tram-Museum Zürich.
- Kampker, Achim, Dirk Vallée und Armin Schnettler, Hrsg. (2013). *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Kaufmann, Urs (2016). *Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien. Ausgabe 2015*. Ittigen: Bundesamt für Energie (BFE).
- Kellaway, Mike J. (2007). «Hybrid buses - What their batteries really need to do». In: *Journal of Power Sources* 168 (1), S. 95–98.
- Keller, Mario, Matthias Lebküchner und Natascha Kljun (2006). *Diesel-, Gas- oder Trolleybus? Schlussbericht*. Bern, Zürich: INFRAS.
- Keller, Mario, Ernst Nef und Christian Bach (2008). *Systementscheid Antriebskonzept. Grundlagenbericht*. Bern, Zürich: INFRAS.
- Kießling, Friedrich, Rainer Puschmann und Axel Schmieder (2014). *Fahrleitungen elektrischer Bahnen. Planung, Berechnung, Ausführung, Betrieb*. 3. Aufl. Erlangen: Publicis Publishing.
- Klohr, Markus und Andreas Maroschik (2012). «Energiespeicher auf Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen - das erste Serienprojekt». In: *Elektrische Bahnen* 110 (8-9), S. 444–451.
- Koebel, Christian (2016). «Induktiv geladene elektrische Busse in Mannheim». In: *Elektrische Bahnen* 114 (1-2), S. 83–89.
- König, Herbert (2013). *Hybridbusse und Speichertechnologien im Praxistest – eine Zwischenbilanz*. Vortrag auf dem 6. ÖPNV-Innovationskongress Freiburg i. Br., 12.03.2013.
- Körner, Sven und Enrico Brandes (2014). «TransMilenio goes green. Ist eines der größten Bus Rapid Transit-Systeme der Welt elektrifizierbar?» In: *Internationales Verkehrswesen* 66 (3), S. 108–111.
- Kryeziu, Gzim und Michael Brack (2017). *Entwicklung eines Beratungstools für die E-Busbeschaffung*. Prix LITRA-Publikation Nr. 5. Bern: LITRA. URL: <http://www.litra.ch/de/index.php?section=Downloads&download=385> (besucht am 02.05.2017).
- Kulpa, John S. und Arthur D. Schwartz (1995). *Reducing the Visual Impact of Overhead Contact Systems*. TCRP Report 7. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Kurzweil, Peter (2013). *Brennstoffzellentechnik. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.

- Kutzner, Mandy (2013). *Der O-Bus als intelligente und nachhaltige Lösung für Europa. Arbeitsergebnisse der Barnimer Busgesellschaft mbH aus dem Projekt "Trolley - Promoting Electric Public Transport"*. Eberswalde: Barnimer Busgesellschaft mbH.
- Lajunen, Antti (2014). «Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses». In: *Transportation Research Part C* 38, S. 1–15.
- Lammert, Mike (2008). *Long Beach Transit: Two-Year Evaluation of Gasoline-Electric Hybrid Transit Buses*. NREL/TP-540-42226. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Lampmann, Volker und Christine Wüst-Rocktäschel (2012). «Premiere in Offenbach: 100-Prozent-Elektrobus im Test. Erfahrungsbericht der Offenbacher Verkehrs-Betriebe zum Einsatz des deutschlandweit ersten rein elektrischen Standardlinienbusses». In: *Der Nahverkehr* 30 (9), S. 47–51.
- Lange, Jürgen und Thomas Otto (2015). «BeSystO: Entscheidungsmodell für den ÖPNV mit Elektrobussen. Werkzeug zur Prüfung und Bewertung eines praktikablen und wirtschaftlichen Einsatzes von E-Bussen im ÖPNV». In: *Der Nahverkehr* 33 (6), S. 16–21.
- Lebküchner, Matthias und Mario Keller (2008). *Zukünftige Zusammensetzung der VBSh-Busflotte. Vertiefte Analyse verschiedener Antriebsarten*. Zürich, Bern: INFRAS.
- LINZ AG LINIEN (2015). «20 neue Obusse für Linz». In: *stadtverkehr* 60 (12), S. 17–18.
- Lockwood, Stephen (2011). *Trackless to Trolleybus. Trolleybuses in Britain*. Brora: Adam Gordon.
- Mahmoud, Moataz u. a. (2016). «Electric buses: A review of alternative power-trains». In: *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 62, S. 673–684.
- Maibach, Markus, Daniel Peter und Benno Seiler (1999). *Ökoinventar Transporte. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen und den Einbezug von Transportsystemen in Ökobilanzen*. Technischer Schlussbericht. Version 2. korrigierte Auflage. Zürich: INFRAS.
- Marquardt, Christian (2013). «Emil in Braunschweig». In: *Verkehr+Technik* 66 (2), S. 56–58.
- (2014). «Hybrid-Busse tanken Wasserstoff. Die Regionalverkehr Köln stellt zwei Van Hool New A 330 FC in Dienst». In: *Verkehr+Technik* 67 (9), S. 368–370.
- Memmler, Michael u. a. (2014). *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013*. Climate Change 29/2014. Dessau: Umweltbundesamt.
- Merker, Günter P. und Rüdiger Teichmann, Hrsg. (2014). *Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise – Simulation – Messtechnik*. 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- MeteoSchweiz (2017). *Zürich / Affoltern (REH, 443 m ü.M.) Stundenwerte von 2016*. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz.

- Müller-Hellmann, Adolf (2012). «ÖPNV: Vom Aschenbrödel zum Rückgrat moderner E-Mobilität. Infrastrukturen kommunaler Gleichstrombahnen beflügeln den Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität». In: *Der Nahverkehr* 30 (12), S. 15–20.
- (2017). «Überlegungen zu Batteriebus-Systemen. Vor- und Nachteile verschiedener Ladesysteme». In: *Der Nahverkehr* 35 (Sonderheft Elektrobusse).
- Müller-Hellmann, Adolf u. a. (2007). *Linienbus-Verkehrssysteme mit elektrischem Fahrantrieb. Potenzial für eine emissionsfreie Mobilität*. Hrsg. von Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV). Hamburg: Eurailpress.
- Muntz, Sabine und York Störmer (2010). «Was bei Angaben zur Einsparung von Kraftstoff zu beachten ist. Kraftstoffverbrauch und Kraftstoffeinsparung im Linienbusbereich - Beurteilung und Interpretation in Bezug auf den Fahrzeugeneinsatz». In: *Der Nahverkehr* 28 (10), S. 11–15.
- N. N. (2002). *Systemvergleich Trolley-, Diesel- und (Bio-)Gasbus. Studie für die Buslinie 4 in Winterthur*. Zollikon: Ernst Basler + Partner AG.
- (2011). *King County Trolley Bus Evaluation*. Parametrix, LTK Engineering Services.
- (2013a). *Transnational Manual on Advanced Energy Storage Systems. Part 1 – On-board energy storage systems for trolleybus systems*. TROLLEY Project Output 3.1.4. TEP S.p.A., Barnim Bus Company mbH.
- (2013b). *Transnational Manual on Advanced Energy Storage Systems. Part 2 – Stationary energy storage systems for trolleybus systems*. TROLLEY Project Output 3.3.11. Barnim Bus Company mbH, City of Gdynia.
- Niemann, Klaus und Markus Balke (2011). «Was können Hybridantriebe im Stadtbus wirklich leisten? Grundlegende physikalische Zusammenhänge». In: *Der Nahverkehr* 29 (9), S. 7–13.
- (2012). «Tatsächliche Einspareffekte von Hybridantrieben im Stadtbus. Konzept- und einsatzabhängige Einflüsse auf die Kraftstoffersparnis in einem seriellen Hybrid-Gelenkbus». In: *Der Nahverkehr* 30 (1-2), S. 51–55.
- Niemann, Klaus und Hans Bezler (2000). «Wohin geht die Energie des Kraftstoffs im Linienbus? Einfluss der Nebenverbraucher viel größer als erwartet». In: *Der Nahverkehr* 18 (11), S. 52–55.
- Nuhn, Helmut und Markus Hesse (2006). *Verkehrsgeographie*. UTB 2687. Paderborn: Ferdinand Schöningh.
- Oelhafen, Peter (2017). *Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im Öffentlichen Verkehr. Berichte Oktober 2015*. Bern: swisselectric research. URL: https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/themen/umwelt/energiestrategie-projekte/schlussbericht_001.pdf.download.pdf/Schlussbericht%20Projekt%20P-001.pdf (besucht am 08.06.2017).
- Oertel, Dagmar (2008). *Energiespeicher - Stand und Perspektiven*. Arbeitsbericht 123. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag.
- Pütz, Ralph (2010). «Die andere Art der Rückgewinnung von Energie im Busbereich. Der Prozesswärme auf der Spur». In: *Der Nahverkehr* 28 (5), S. 48–52.
- (2011). *Einführung in die Linienbustechnik*. Düsseldorf: Alba Fachverlag.

- Rieck, Gerhard und Robert Zelinka (1994). «Konzeption eines dieselelektrischen Busses mit Einzelradantrieb». In: *Der Nahverkehr* 12 (6), S. 43–47.
- Robert Bosch GmbH, Hrsg. (2014). *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. 24. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Ropohl, Günter (1979). *Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der Allgemeinen Technologie*. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Ruhl, Martin u. a. (2012). «Wann wird der Hybridbus-Einsatz ohne Förderung wirtschaftlich? Bedingungen zur Schließung der Wirtschaftlichkeitslücke». In: *Der Nahverkehr* 30 (10), S. 34–39.
- Saxe, M., A. Folkesson und P. Alvfors (2008). «Energy system analysis of the fuel cell buses operated in the project: Clean Urban Transport for Europe». In: *Energy* 33 (5), S. 689–711.
- Scherer, Milena (2012). «Differences in cognition of public transport systems: Image and behavior towards urban public transport». Dissertation. Zürich: ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT).
- Schmidt, Peter (1975). *VEM Handbuch Energieversorgung elektrischer Bahnen*. Hrsg. von Institut für Elektroanlagen (IEA). Berlin: VEB Verlag Technik.
- Schmidt, Thilo (2014). «Malatyas Trambüs – Meilenstein für ein besseres Image und eine umweltfreundliche Energiebilanz». In: *Verkehr+Technik* 67 (7), S. 267–270.
- Schmitz, Martin und Martin Böhm (2011). «Trolleybusse in Mailand - völlig emissionsfrei durch die Stadt». In: *Elektrische Bahnen* 109 (6), S. 291–298.
- Schröter, Reinhold und Thomas Siefer (2009). «Bus- und Straßenbahnsysteme im Kostenvergleich. Wie aussagefähig ist die neue FGSV-Empfehlung?» In: *Der Nahverkehr* 27 (4), S. 12–19.
- Schuckert, Manfred (2006). *CUTE – Clean Urban Transport for Europe – Detailed Summary of Achievements. A Hydrogen Fuel Cell Bus Project in Europe 2001 – 2006*. The CUTE Project Consortium.
- Schwertner, Michael und Ulrich Weidmann (2014). «Elektrobusse im Linienverkehr – Standortbestimmung und Ausblick». In: *Verkehr+Technik* 67 (12), S. 463–486.
- (2015). «Stand und Perspektiven elektrischer Busantriebe». In: *Schweizer Eisenbahn-Revue* 38 (7), S. 330–335.
- (2016). «Comparison of Well-to-Wheel Efficiencies for Different Drivetrain Configurations of Transit Buses». In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2539), S. 55–64.
- Siegwart, Hans (1940). «Die diesel-elektrischen Autobusse der städtischen Tram-bahn Luzern». In: *Schweizerische Bauzeitung* 116 (24), S. 275–280.
- Simonsen, Morten (2012). *Energibruk til produksjon og vedlikehald av buss*. Vestlandsforsking rapport nr. 11/2012. Sogndal: Vestlandsforsking. URL: <http://www.vestforsk.no/filearchive/vf-rapport-11-2012-energibruk-til-produksjon-og-vedlikehald-av-buss.pdf> (besucht am 30.01.2017).
- Skiker, Sabine u. a. (2016). *Clean Hydrogen in European Cities 2010 - 2016. Key Facts, Results, Recommendations*. CHIC Project Partners. URL: [210](http://chic-</p></div><div data-bbox=)

- project.eu/wp-content/uploads/2016/11/CHIC_publication_final.pdf (besucht am 23.01.2017).
- Škoda (2017a). *Elektrobus Škoda Perun HE*. Hrsg. von Škoda Electric a.s. URL: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/elektricke-a-hybridni-autobusy/elektrobus-skoda-perun-he/> (besucht am 01.02.2017).
- (2017b). *Škoda 26Tr Trolleybus*. Hrsg. von Škoda Electric a.s. Produktinformation. URL: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/trolejbusy/trolejbusy-skoda/trolejbus-26-tr-solaris/> (besucht am 01.02.2017).
- Stadt Zürich, Hrsg. (2015). *Fahrzeiten 2015 der VBZ im SOLL-IST-Vergleich. Fahrzeiten_SOLL_IST_20151108_20151114.csv*. URL: <https://data.stadt-zuerich.ch/dataset/vbz-fahrzeiten-ogd-2015> (besucht am 22.08.2016).
- Hrsg. (2016). *Fahrgastzahlen VBZ, Zeitraum 2015*. URL: <https://data.stadt-zuerich.ch/dataset/vbz-fahrgastzahlen-ogd> (besucht am 05.07.2016).
- Statistik Austria (2016). *Energiedaten Österreich 2014. Änderung wichtiger Kennzahlen und Einflussfaktoren im Vergleich zum Vorjahr*. Wien: Statistik Austria.
- Stephan, Arnd (2017). *Persönliches Gespräch*. Dresden.
- Storsand, B. (1951). «Der Elektrogyro, ein kinetischer Energiespeicher für Fahrzeugbetrieb». In: *Schweizerische Bauzeitung* 69 (15), S. 199–203.
- Streissler, Christoph (2010). *Agrotreibstoffe – Lösung oder Problem? Potenziale, Umweltauswirkungen und soziale Aspekte*. Informationen zur Umweltpolitik 183. Wien: Kammer für Arbeiter und Angestellte für Wien.
- Stubbe, Björn, Wolfgang Sievers und Marc Herkenrath (2010). «Hybridbus: Moderscheinung oder Wegbereiter in die Elektromobilität. Unter welchen Voraussetzungen sind Hybridfahrzeuge sinnvoll?» In: *Der Nahverkehr* 28 (9), S. 40–47.
- swisstopo (2008). *Formeln und Konstanten für die Berechnung der Schweizerischen schiefachsigen Zylinderprojektion und der Transformation zwischen Koordinatensystemen*. Bundesamt für Landestopografie swisstopo.
- Hrsg. (2010). *DHM25 / 200m. Digitales Höhenmodell DHM25*. URL: https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/height_models/dhm25200 (besucht am 19.08.2016).
- tpg (2017a). *Autobus à double articulation VanHool AGG 300 New*. Hrsg. von transports publics genevois. URL: http://www.tpg.ch/documents/10162/6739608/tpg_Maxi-VanHool-AGG300.pdf (besucht am 31.01.2017).
- (2017b). *EVOBUS O530*. Hrsg. von transports publics genevois. URL: http://www.tpg.ch/documents/10162/290788/tpg_EVOBUS-0530.pdf (besucht am 31.01.2017).
- (2017c). *EVOBUS O530G*. Hrsg. von transports publics genevois. URL: http://www.tpg.ch/documents/10162/290788/tpg_EVOBUS_0530G.pdf (besucht am 31.01.2017).
- (2017d). *Trolleybus articulé VanHool Exqui.City 18T/AG300-TRL-T*. Hrsg. von transports publics genevois. URL: http://www.tpg.ch/documents/10162/6739608/tpg_TB_ExquiCity.pdf (besucht am 31.01.2017).

- tpg (2017e). *Trolleybus Hess / Kiepe - LighTram 3*. Hrsg. von transports publics genevois. URL: http://www.tpg.ch/documents/10162/290788/tpg_Trolleybus-HESS-KIEPE-lighTram.pdf (besucht am 31.01.2017).
- trolley:motion, Hrsg. (2015). *Liste der Städte mit aktivem Trolleybussystem*. URL: <http://www.trolleymotion.eu/www/index.php?L=0&id=36&land=all> (besucht am 15.05.2015).
- UBA (2017a). *ProBas. MetallKupfer-DE-primär-2010*. Dessau: Umweltbundesamt. URL: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B909DBFCC-4EB1-4E9F-9B11-EEF3F55BEEB8%7D> (besucht am 25.04.2017).
- (2017b). *ProBas. MetallAluminium-DE-2010*. Dessau: Umweltbundesamt. URL: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B58A77C5F-D54B-473E-BF6B-AF7A1147BDBC%7D> (besucht am 25.04.2017).
- (2017c). *ProBas. MetallStahl-Blech-DE-2010*. Dessau: Umweltbundesamt. URL: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B99B09AFF-E842-4411-AAD2-3A1B3EDE2D64%7D> (besucht am 25.04.2017).
- (2017d). *ProBas. Steine-ErdenBeton-DE-2010*. Dessau: Umweltbundesamt. URL: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B02984BC5-E58A-47FD-8572-99ECB24A0777%7D> (besucht am 25.04.2017).
- (2017e). *ProBas. FabrikSilizium-EG-mono-DE-2010*. Dessau: Umweltbundesamt. URL: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7BA8B38761-55F1-421F-86DA-6B3ACBD118D7%7D> (besucht am 25.04.2017).
- (2017f). *ProBas. U-KW-DWR-DE-2010*. Dessau: Umweltbundesamt. URL: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B291B5861-86E4-4A77-A238-34272510BDB5%7D> (besucht am 17.03.2017).
- (2017g). *ProBas. TankstelleBenzin-DE-2020 (o. Bio)*. Dessau: Umweltbundesamt. URL: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7BAE092CF9-BB5B-4593-81B9-069240DF1880%7D> (besucht am 15.03.2017).
- (2017h). *ProBas. TankstelleDiesel-DE-2020 (o. Bio)*. Dessau: Umweltbundesamt. URL: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B89ABC415-83F6-48E8-BBA3-6114990AC529%7D> (besucht am 15.03.2017).
- (2017i). *ProBas. TankstelleErdgas-CNG-DE-2020*. Dessau: Umweltbundesamt. URL: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7BAB8A02B4-2951-422B-BD25-F3D95E744FD5%7D> (besucht am 15.03.2017).
- Uhlenhut, Achim (2010). «Untersuchung ergibt: Hannoverscher Hybridbus ist sparsam und beliebt». In: *Verkehr+Technik* 63 (5), S. 169–172.
- (2014). «53 Hybridbusse in Hannover. Brückentechnologie zum kommenden Elektrobus». In: *Verkehr+Technik* 67 (7), S. 279–281.

- UITP (2009). *UITP-Projekt „SORT“*. *Standardisierte Zyklen für Straßentests (Standardised On-Road Test cycles)*. D/2009/0105/31. Brüssel: Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen (UITP).
- üstra (2017). *Die Hybridbusse*. Hrsg. von üstra Hannoversche Verkehrsbetriebe AG. URL: <https://www.uestra.de/unternehmen/betrieb-technik/stadtbus/hybridbusse/> (besucht am 01.02.2017).
- VBZ (2016). *VBZ Geschäftsbericht 2015*. Verkehrsbetriebe Zürich.
- (2017a). *Hess Swisstrolley4 BGT-N2D*. Hrsg. von Verkehrsbetriebe Zürich. URL: https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die_vbz/fahrzeuge/trolleybusse/hess_swisstrolley4.html (besucht am 01.02.2017).
- (2017b). *Midibus MAN A35*. Hrsg. von Verkehrsbetriebe Zürich. URL: https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die_vbz/fahrzeuge/midibusse_kleinbusse/midibus_man_a35.html (besucht am 01.02.2017).
- Vogel, Adrian (2017). *Flottenverbrauchswerte der VBZ-Busse. E-Mail-Kommunikation*. Hrsg. von Verkehrsbetriebe Zürich.
- Vogel, Benedikt (2014). «Wenn aus der Bushaltestelle eine Stromtankstelle wird». In: *Erneuerbare Energien* (1), S. 24–25.
- Volvo Buses, Hrsg. (2016). *Hybridbus Volvo 7900 H*. Produktinformation. URL: <http://www.volvobuses.de/content/dam/volvo/volvo-buses/markets/germany/Brochure-Volvo-7900-Hybrid-DE-2016.pdf> (besucht am 31.01.2017).
- Wipke, Keith B., Matthew R. Cuddy und Steven D. Burch (1999). «ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Approach». In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 48 (6), S. 1751–1761.
- Wüthrich, Philipp und Mirjam Strahm (2016). *Bus der Zukunft II. Marktübersicht*. Bern: INFRAS.
- ZeEUS eBus Report* (2016). *An overview of electric buses in Europe*. Brüssel: International Association of Public Transport (UITP).
- Zilch, Konrad u. a., Hrsg. (2012). *Handbuch für Bauingenieure. Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit*. 2. Aufl. Heidelberg: Springer.
- Zoll, Patrick (2017). «Lithium statt Erdöl, Kobalt statt Platin. Der Elektroauto-Boom macht sich zunehmend auch an den Rohwarenmärkten bemerkbar». In: *Neue Zürcher Zeitung* 238 (144), S. 35.

Biographische Notiz

Angaben zur Person

Name	Michael Schwertner
Geburtsdatum	26.04.1979
Geburtsort	Karl-Marx-Stadt (jetzt Chemnitz)
Staatsbürgerschaft	Deutschland

Berufliche Laufbahn

11.2010 – 08.2017	Wissenschaftlicher Assistent ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), Lehrstuhl Verkehrssysteme
09.2008 – 08.2010	Sachbearbeiter Zugsicherungsanlagen Hamburger Hochbahn AG, Bereich U-Bahn-Betrieb, Sachgebiet Fahrplan- und Betriebsgrundlagen
09.2004 – 08.2008	Technologe Vattenfall Europe Mining AG, Spremberg-Schwarze Pumpe, Zentraler Eisenbahnbetrieb, Abteilung Technische Vorbereitung
05.2002 – 12.2002	Studentischer Mitarbeiter DE-Consult GmbH Dresden, Abteilung Oberleitungsanlagen
08.1999 – 02.2001	Studentischer Mitarbeiter Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften «Friedrich List», Projekt «Verkehrsunfallforschung»

Ausbildung

- 07.2014 – 08.2017 Doktorat
ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), Lehrstuhl Verkehrssysteme
- 10.1998 – 04.2004 Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)
Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften «Friedrich List», Studiengang Verkehrswesen, Studienrichtung «Planung und Betrieb elektrischer Verkehrssysteme»
- 08.1992 – 07.1997 Abitur (mathematisch-naturwissenschaftliches Profil)
Werner-Heisenberg-Gymnasium, Chemnitz
- 09.1985 – 07.1992 Grund- und Mittelschule, Karl-Marx-Stadt/Chemnitz