

Innovative und systematische Ansätze für mehr Energieeffizienz im kommunalen Öffentlichen Personennahverkehr

FoPS-Forschungsvorhaben Nr. 70.908/2015

Schlussbericht für das Bundesministerium für Verkehr
und digitale Infrastruktur

Darmstadt / Berlin /
Hamburg,
10.04.2019

Autorinnen und Autoren

Lukas Minnich
Moritz Mottschall
Öko-Institut e.V.

Miguel Wolf
Henning Palm
Lisa Baal
KCW GmbH

Thies Hinckeldeyn
BHP Unternehmensberatung

Öko-Institut
Büro Berlin
Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0
info@oeko.de
www.oeko.de

Anlagen

Kurzbericht der FE-Ergebnisse

Kurzfassung des Kurzberichts

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden in dieser Publikation Begriffe wie „Vertreter“ oder „Anwohner“ meist nur in der maskulinen Schreibweise verwendet. Grundsätzlich beziehen sich diese Begriffe aber immer auf beide Geschlechter. Wir wollen so den Lesefluss erleichtern und bitten um Verständnis für diese Verkürzung.

kcw GmbH
Büro Hamburg
Steindamm 94
20099 Hamburg
+49 40 325775-600
www.kcw-online.de

**BHP Unternehmensberatung –
Becker Hinckeldeyn Partner**
Neuer Kamp 30
20357 Hamburg
+49 175 7256864
www.bh-partner.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	8
1. Hintergrund	11
1.1. Energieeffizienz im ÖSPV – Relevanz, Definition, Erfassung	11
1.2. Aufgabenstellung und Ziel	14
1.3. Überblick über das Vorgehen	15
1.4. Vorstellung der Musterunternehmen	16
1.4.1. Berliner Verkehrsbetriebe	16
1.4.2. Dresdner Verkehrsbetriebe	18
1.4.3. Kreisverkehrsgesellschaft in Pinneberg	19
1.4.4. VB Bachstein	20
1.5. Stand der Energieeffizienz im ÖSPV in Deutschland	21
2. Förderungs- und Ausschreibungspraxis	26
2.1. Analyse der heutigen Förderung von Energieeffizienz im ÖSPV	26
2.1.1. Förderprogramme für Elektrobusse auf Bundesebene	26
2.1.2. Förderprogramme für Elektrobusse auf Länderebene	27
2.1.3. Förderprogramme in den Bereichen Energieeffizienz, Klimaschutz, Nachhaltige Mobilität	27
2.1.4. Schwachstellenanalyse der Förderpraxis	27
2.2. Analyse der heutigen Ausschreibungspraxis im ÖSPV in Hinblick auf Energieeffizienz	28
2.2.1. Schienengebundener ÖSPV (Straßenbahn, U-Bahn)	29
2.2.2. Straßengebundener ÖSPV	29
2.2.2.1. Bestellte Verkehre	29
2.2.2.2. Eigenwirtschaftliche Verkehre	31
2.2.3. Fahrzeugbeschaffung	31
3. Energieeffizienzmaßnahmen im ÖSPV	33
3.1. Methodik der Maßnahmenauswahl und -bewertung	33
3.1.1. Abgrenzung des Maßnahmenspektrums und Priorisierung	33
3.1.2. Betriebswirtschaftliche Bewertung	34
3.1.3. Ermittlung der Energieeinsparung	37
3.1.4. Gesamtwirtschaftliche Bewertung	38
3.1.5. Anwendbarkeit auf den gesamten ÖSPV in Deutschland	42
3.1.6. Synthese	42

3.2.	Maßnahmenkatalog	43
3.2.1.	Überblick	43
3.2.2.	Bus: Antriebstechnik und Fahrwiderstände	43
3.2.2.1.	Dieselhybridbus	43
3.2.2.2.	Batterieelektrischer Bus	48
3.2.2.3.	Chiptuning – Anpassung der Motor- und Getriebesteuerung	55
3.2.2.4.	Weitere Maßnahmen	57
3.2.2.5.	Exkurs: Minderung der NO _x -Emissionen	59
3.2.3.	Straßenbahn und U-Bahn: Antriebstechnik und Fahrwiderstände	61
3.2.3.1.	Nachrüstung Rückspeisefähigkeit bei Altfahrzeugen	61
3.2.3.2.	Weitere Maßnahmen	65
3.2.4.	Bus, Straßenbahn, U-Bahn: Nebenverbraucher und sonstige Fahrzeugtechnik	65
3.2.4.1.	Verbesserte Innenraumdämmung	65
3.2.4.2.	Verzicht auf Klimatisierung des Fahrgastraums	66
3.2.4.3.	Energieeffiziente Klimatisierung	69
3.2.4.4.	Leichtbaubusse	72
3.2.4.5.	Leichtbauschienenfahrzeuge	75
3.2.4.6.	Bedarfsgerechtes Kneeling	76
3.2.4.7.	Weitere Maßnahmen	78
3.2.5.	Straßenbahn und U-Bahn: Stromversorgungsinfrastruktur	79
3.2.5.1.	Optimierung der Fahrstromverteilung	79
3.2.5.2.	Erhöhung der Nennspannung	81
3.2.5.3.	Stationäre Energiespeicherung	85
3.2.5.4.	Weitere Maßnahmen	88
3.2.6.	Straßenbahn und U-Bahn: Sonstige Infrastruktur	88
3.2.6.1.	Fahrzeugabstellung in geschlossenen Hallen	88
3.2.6.2.	Wärmetauscher zur Nutzung von Tunnelabwärme	92
3.2.6.3.	Weitere Maßnahmen	96
3.2.7.	Bus, Straßenbahn, U-Bahn: Betrieb	96
3.2.7.1.	Buszüge zur Bewältigung von Lastspitzen	96
3.2.7.2.	Busbeschleunigung	99
3.2.7.3.	Anreizsystem / Wettbewerb energieeffizientes Fahrverhalten	102
3.2.7.4.	Systematischer Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung	105
3.2.7.5.	Weitere Maßnahmen	107
4.	Ergebnisse und Fazit aus der Betrachtung der Maßnahmen	110
4.1.	Ergebnisse	110

4.2.	Maßnahmenpriorisierung anhand der Bewertungskriterien	113
5.	Handlungsempfehlungen zur Steigerung der Energieeffizienz im kommunalen Öffentlichen Personennahverkehr	120
5.1.	Vorbemerkung	120
5.2.	Zentrale Handlungsempfehlung 1: Handlungspaket für mittelständische Betreiber und Aufgabenträger im ländlichen, suburbanen und kleinstädtischen Raum zum vereinfachten Einstieg in den batterieelektrischen Busverkehr	120
5.2.1.	Hintergrund	120
5.2.2.	Handlungsempfehlung	121
5.2.3.	Hinweise zur Implementierung	122
5.3.	Zentrale Handlungsempfehlung 2: Wertungsbonus für oder verbindliche Vorgabe von Energieeffizienzmaßnahmen bei Vergabekriterien	123
5.3.1.	Hintergrund	123
5.3.2.	Handlungsempfehlung	124
5.3.3.	Hinweise zur Implementierung	125
5.4.	Zentrale Handlungsempfehlung 3: Förderung von Energieeffizienz-„Add-ons“ bei Arbeiten an der Schienenverkehrsinfrastruktur sowie bei der Generalüberholung von Schienenfahrzeugen	126
5.4.1.	Hintergrund	126
5.4.2.	Handlungsempfehlung	126
5.4.3.	Hinweise zur Implementierung	127
5.5.	Weitere Handlungsansätze im Interesse einer verbesserten Energieeffizienz im ÖSPV	127
5.5.1.	Vorbemerkung	127
5.5.2.	Weitere Handlungsansätze für Verkehrsunternehmen	127
5.5.3.	Weitere Handlungsansätze für Fahrzeughersteller und Zulieferer	129
5.5.4.	Weitere Handlungsansätze für Aufgabenträger	129
5.5.5.	Handlungsansätze für Verwaltung und politische Entscheidungsträger auf der kommunalen Ebene	130
5.5.6.	Handlungsansätze für Verwaltung und politische Entscheidungsträger auf der Landesebene	130
5.5.7.	Handlungsansätze für Verwaltung und politische Entscheidungsträger auf der Bundesebene	131
5.5.8.	Handlungsansätze für politische Entscheidungsträger auf der europäischen Ebene	132
6.	Anhang	133
6.1.	Werkstattgespräche	133
6.1.1.	Werkstattgespräch zum Thema „Energieeffizienzmaßnahmen beim Omnibus“	133

6.1.2.	Werkstattgespräch zum Thema „Energieeffizienzmaßnahmen bei Straßenbahn, Stadtbahn und U-Bahn“	134
6.1.3.	Werkstattgespräch zum Thema „Finanzierung – Optionen für eine Unterstützung energieeffizienzsteigernder Investitionen“	135
6.1.4.	Werkstattgespräch zum Thema „Entwicklung eines Instrumentariums zur Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen“	135
6.2.	Datengrundlage der betriebswirtschaftlichen Berechnungen	135
6.3.	Datengrundlage der Umweltkostenabschätzung	135

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Sektorale Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland und Ziele bis 2050	11
Abbildung 1-2:	Vergleich des spezifischen End- bzw. Primärenergiebedarfs, Status Quo und erwartete Entwicklung bis 2025	13
Abbildung 1-3:	Ablauf des Projekts	16
Abbildung 1-4:	End- (links) und Primärenergieverbrauch (rechts) des ÖSPV in Deutschland im Jahr 2016 sowie Primärenergieverbrauch des innerstädtischen Verkehrs inkl. des MIV innerorts (unten)	21
Abbildung 1-5:	Entwicklung des spezifischen End- und Primärenergieverbrauch im ÖSPV und im MIV pro Personenkilometer	22
Abbildung 1-6:	Bestand an Kraftomnibussen mit Hybrid- und Elektroantrieb von 2009 bis 2018 in Deutschland	23
Abbildung 1-7:	Kraftstoffverbrauch eines Linienbusses (zGG. 15 - >18 t) auf einer Hauptverkehrsstraße in Abhängigkeit von Topografie und Verkehrssituation	24
Abbildung 3-1:	Vorgehen bei der betriebswirtschaftlichen Bewertung	37
Abbildung 3-2:	Vorgehen bei der Umweltkostenabschätzung	40
Abbildung 3-3:	Veränderung der Umweltkosten durch den Einsatz von Hybridbussen	47
Abbildung 3-4:	Veränderung der Umweltkosten durch den Einsatz batterieelektrischer Busse im Musterunternehmen unter Berücksichtigung des deutschen Strommix und Strom aus 100 % Windenergie.	53
Abbildung 3-5:	Reduktion der Umweltkosten eines Solobusses durch eine SCR-Nachrüstung in Abhängigkeit der Nutzungsdauer und des Abgasstandards	61
Abbildung 3-6:	Veränderung der Umweltkosten durch die Nachrüstung der Rückspeisefähigkeit von U-Bahnfahrzeugen im Bestand des Musterunternehmens	64
Abbildung 3-7:	Veränderung der Umweltkosten durch die Erhöhung der Fahrdrahtspannung	84
Abbildung 3-8:	Veränderung der Umweltkosten durch die geschlossene Abstellung	91
Abbildung 3-9:	Veränderung der Umweltkosten durch Nutzung von Tunnelabwärme	95
Abbildung 4-1:	Kosteneffizienz der Maßnahmen, Barwert normiert anhand der Energieeinsparung	114
Abbildung 4-2:	Abschätzung des Energieeinsparpotenzials der Maßnahmen in Deutschland	115
Abbildung 4-3:	Kosteneffizienz und Einsparpotenziale der Maßnahmen (Endenergieverbrauch)	117
Abbildung 4-4:	Umweltkostenminderung der Maßnahmen. Umweltkosten normiert anhand der Energieeinsparung.	118
Abbildung 6-1:	Kosteneffizienz und Einsparpotenziale der Maßnahmen (Primärenergieverbrauch)	140

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Steckbrief Maßnahme „Dieselhybridbus“	44
Tabelle 3-2:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Hybridbusse“	45
Tabelle 3-3:	Steckbrief Maßnahme „Batterieelektrischer Bus“	49
Tabelle 3-4:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Batterieelektrische Busse“	51
Tabelle 3-5:	Steckbrief Maßnahme „Chiptuning“	55
Tabelle 3-6:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Chiptuning“	56
Tabelle 3-7:	Bewertung „Nachrüstung SCR-System“	59
Tabelle 3-8:	Steckbrief Maßnahme „Nachrüstung Rückspeisefähigkeit“	62
Tabelle 3-9:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Nachrüstung Rückspeisefähigkeit“	63
Tabelle 3-10:	Steckbrief Maßnahme „Verzicht auf Klimatisierung“	67
Tabelle 3-11:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Verzicht auf Klimatisierung“	68
Tabelle 3-12:	Steckbrief Maßnahme „Energieeffiziente Klimatisierung“	70
Tabelle 3-13:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Energieeffiziente Klimatisierung“	71
Tabelle 3-14:	Steckbrief Maßnahme „Leichtbaubusse“	73
Tabelle 3-15:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Leichtbaubusse“	73
Tabelle 3-16:	Steckbrief Maßnahme „Bedarfsgerechtes Kneeling“	76
Tabelle 3-17:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Bedarfsgerechtes Kneeling“	77
Tabelle 3-18:	Steckbrief Maßnahme „Optimierung der Fahrstromverteilung“	80
Tabelle 3-19:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Optimierung der Fahrstromverteilung“	80
Tabelle 3-20:	Steckbrief Maßnahme „Erhöhung der Nennspannung“	82
Tabelle 3-21:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Erhöhung der Nennspannung“	82
Tabelle 3-22:	Steckbrief Maßnahme „Stationäre Energiespeicherung“	85
Tabelle 3-23:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Stationäre Energiespeicherung“	86
Tabelle 3-24:	Steckbrief Maßnahme „n“	89
Tabelle 3-25:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Fahrzeugabstellung in geschlossenen Hallen“	90
Tabelle 3-26:	Steckbrief Maßnahme „Nutzung von Tunnelabwärme“	92
Tabelle 3-27:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Nutzung von Tunnelabwärme“	93
Tabelle 3-28:	Steckbrief Maßnahme „Buszüge zur Bewältigung von Lastspitzen“	97
Tabelle 3-29:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Buszüge zur Bewältigung von Lastspitzen“	98
Tabelle 3-30:	Steckbrief Maßnahme „Busbeschleunigung“	100
Tabelle 3-31:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Busbeschleunigung“	101
Tabelle 3-32:	Steckbrief Maßnahme „Anreizsystem effizientes Fahrverhalten“	102
Tabelle 3-33:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Anreizsystem effizientes Fahrverhalten“	103
Tabelle 3-34:	Steckbrief Maßnahme „Systematischer Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung“	105

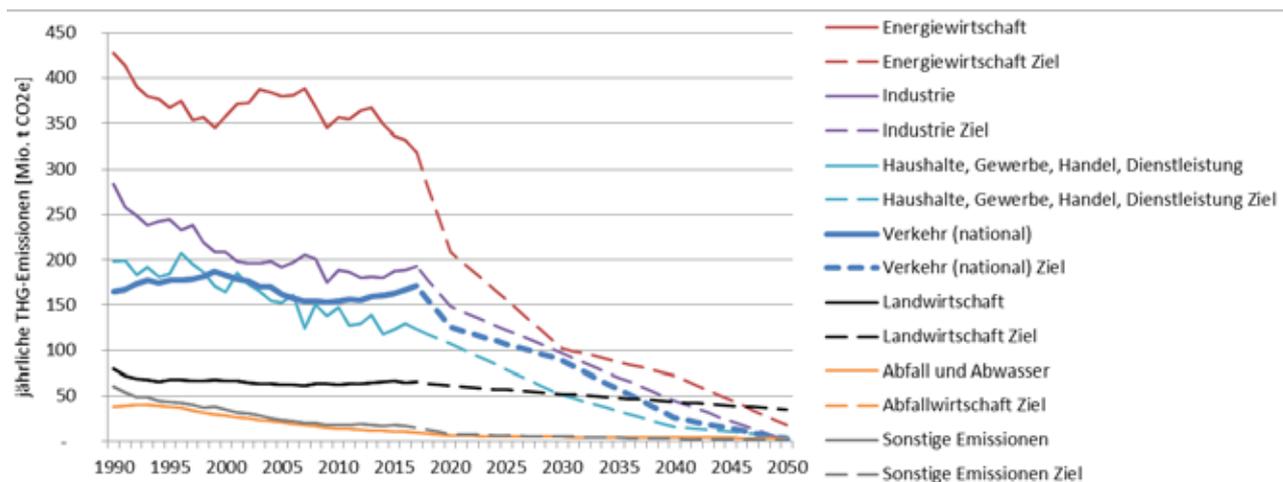
Tabelle 3-35:	Betriebswirtschaftliche Bewertung „Systematischer Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung“	106
Tabelle 4-1:	Übersicht über Energieeinsparung der Maßnahmen innerhalb der gesamten Wirkdauer	110
Tabelle 4-2:	Auswirkung der Maßnahmen auf das Betriebsergebnis der MU, Barwert der Maßnahmen, hypothetische Fahrpreiserhöhung und sich daraus ergebende Nachfrageerhöhung im MIV	112
Tabelle 4-3:	Abschätzung der Umweltkosteneinsparung von tendenziell nicht amortisationsfähigen Maßnahmen in Mio. € ₂₀₁₆	113
Tabelle 6-1:	Kreuzpreiselastizitäten der Musterunternehmen	135
Tabelle 6-2:	Kostensätze Luftschadstoffemissionen und Treibhausgasemissionen im Jahr 2016 in € ₂₀₁₆ /t	135
Tabelle 6-3:	Kostensätze Strom 2016-2045	136
Tabelle 6-4:	Beispielkostensätze für Bussen und Pkw im Jahr 2016	136
Tabelle 6-5:	Entwicklung der Umweltkostensätze im Pkw-Bestand	136
Tabelle 6-6:	Modal Split in den Bedienungsgebieten der Musterunternehmen	137
Tabelle 6-7:	Annahmen zu den Wegelängen in den Bedienungsgebieten der Musterunternehmen in km	137
Tabelle 6-8:	Umrechnungsfaktoren TTW und WTW	137
Tabelle 6-9:	Spezifischer End- und Primärenergieverbrauch im ÖSPV und MIV	138
Tabelle 6-10:	Abschätzung der Umweltkosteneinsparung von tendenziell nicht amortisationsfähigen Maßnahmen unter Berücksichtigung niedriger, mittlerer und hoher Umweltkostensätze für Treibhausgasemissionen in Mio. € ₂₀₁₆	139
Tabelle 6-11:	Abschätzung der Umweltkosteneinsparung von tendenziell nicht amortisationsfähigen Maßnahmen unter Berücksichtigung verschiedener Zinssätze in Mio. € ₂₀₁₆	139

1. Hintergrund

1.1. Energieeffizienz im ÖSPV – Relevanz, Definition, Erfassung

Der Verkehrssektor steht auf seinem Weg zu einer höheren Umweltverträglichkeit vor großen Herausforderungen. Der deutsche Beitrag zur Begrenzung der Erderwärmung auf unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter erfordert eine Senkung der Treibhausgasemissionen um ca. 95 % bis zum Jahr 2050. Abbildung 1-1 verdeutlicht, dass dies für den Verkehrsbereich eine weitgehende Dekarbonisierung bedeutet, also eine Loslösung von fossilen, kohlenstoffbasierten Energiequellen, bei deren Umwandlung CO₂ freigesetzt wird. Die Senkung der CO₂-Emissionen auf einen Wert nahe Null ist deswegen nötig, weil andere Sektoren, wie etwa die Landwirtschaft, einen unvermeidbaren Sockelbeitrag beisteuern werden. Bisher wurde durch den Verkehrssektor noch kein Beitrag zur Erreichung der Klimaziele geleistet. Wie in Abbildung 1-1 zu erkennen, sind die Emissionen von Treibhausgasen bis 2017 in wichtigen Sektoren wie Energiewirtschaft (-26 %), Industrie (-38 %) sowie Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (-32 %) gegenüber 1990 deutlich gesunken, während sie im Verkehr im gleichen Zeitraum um ca. 4 % gestiegen sind. Effizienzsteigernde Technologieentwicklungen wurden dadurch überlagert, dass Verkehrsleistung, Motorisierung und Fahrzeuggrößen anwuchsen und gleichzeitig die Verlagerung auf effiziente Verkehrsträger und emissionsarme Antriebe ausblieb.

Abbildung 1-1: Sektorale Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland und Ziele bis 2050



Quelle: Inventardaten: Umweltbundesamt (UBA) (2018a); Ziele: Öko-Institut: Klimaschutzszenario 2050, KS 95 (95 % THG-Minderung bis 2050)

Neben den Treibhausgasen verursacht der Verkehr weitere schädliche Umweltwirkungen. Im Jahr 2016 kam es zum Beispiel an 59 % der städtischen verkehrsnahen Luftmessstationen zu Überschreitungen des Jahreshgrenzwertes für Stickstoffdioxid (NO_x)¹. Der Straßenverkehr trägt dazu mit etwa 60 %², in Einzelfällen über 80 %³, den größten Anteil bei. Auch für die urbane Feinstaubbe-

¹ Umweltbundesamt (UBA) 2017

² Umweltbundesamt (UBA) 2018b

³ Universität Innsbruck 2017

lastung ist der Straßenverkehr wesentlich verantwortlich. Er belastet zudem Millionen Anwohner und deren Gesundheit durch Lärmemissionen.

Zur Reduktion der negativen Umweltwirkungen werden mehrere Strategien parallel angestrebt, bei denen jeweils unterschiedliche Akteure im Fokus stehen. Die **Vermeidung** von Wegen und die Verringerung von Weglängen etwa ist vorrangig Aufgabe der Stadtplanung und Raumordnung sowie der wirtschafts- und finanzpolitischen Steuerung. In Verkehrsplanung und -politik wird das zweite wichtige Ziel der **Verlagerung** auf emissionsärmere Verkehrsträger verfolgt. Dies sind der nicht-motorisierte (Fahrrad- und Fuß-) Verkehr und der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV). Die **Erhöhung der Energieeffizienz** stellt eine Maßnahme zur **Verbesserung** dar und repräsentiert damit einen dritten Ansatz hin zu verringerten Umweltwirkungen des Verkehrssektors. Die Energieeffizienz stand im Fokus des Projekts, dessen Ergebnisse in diesem Bericht präsentiert werden. Das Ziel der Bundesregierung ist es, den Endenergiebedarf des Verkehrs bis 2050 um 40 % gegenüber 2005 zu senken.

Gegenstand des Projekts, dessen Ergebnisse in diesem Bericht präsentiert werden, war der mit Straßen-, U-Bahnen⁴ und Omnibussen erbrachte öffentliche Straßenpersonenverkehr (ÖSPV)⁵. Es ist zu betonen, dass sich der Anteil an den Treibhausgas-(THG-)Emissionen des Verkehrssektors auf weniger als 2 % beläuft (Kappus et al. 2013). Hauptgründe sind der geringe Anteil von nur 6,4 % an den gesamten Personenkilometern im Jahr 2014 und die höhere Energieeffizienz im Vergleich zum Pkw. Zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele ist es dennoch notwendig, dass der ÖSPV einen hinreichenden Beitrag leistet und langfristig überhaupt keine Treibhausgase mehr emittiert. Energieeffizienzmaßnahmen können gleichzeitig zu Kostenersparnissen bei den Verkehrsunternehmen führen und somit zur Verbesserung des Kostendeckungsgrads oder zur Senkung der Fahrpreise eingesetzt werden.

Bei Energiegrößen⁶ wird grundsätzlich zwischen Primär- und Endenergie unterschieden. Endenergie ist die im verwendeten Energieträger (z. B. Dieselkraftstoff) direkt beinhalten Energiemenge, während in der Primärenergie auch die Herstellung (Prozesse z. B. in der Raffinerie) und Bereitstellung (z. B. Belieferung von Tankstellen durch Lkw) mit ihrem jeweiligen Wirkungsgrad enthalten sind. In diesem Bericht werden v. a. Vergleiche gezogen, bei denen derselbe Energieträger verwendet wird, beispielsweise verbrauchsmindernde Maßnahmen am Dieselmotor. So ist die prozentuale Einsparung dieselbe, egal ob Endenergie oder Primärenergie betrachtet wird. Wenn in diesen Fällen absolute Zahlen angegeben werden, stellt der Bedarf an Endenergie die leichter erfassbare Größe dar. Diese wird i. d. R. beim Dieselbus als Verbrauch an Kraftstoff in Litern angegeben, bei Schienenverkehrsmitteln als Bedarf an elektrischem Strom in Kilowattstunden (kWh). Auch in diesem Bericht wird daher die Energieeffizienz weitgehend über den spezifischen Endenergiebedarf definiert. Ausnahmen sind Vergleiche zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln und die Umstellung auf Elektromobilität im Busverkehr, da hier auf einen neuen Energieträger umgestellt wird.

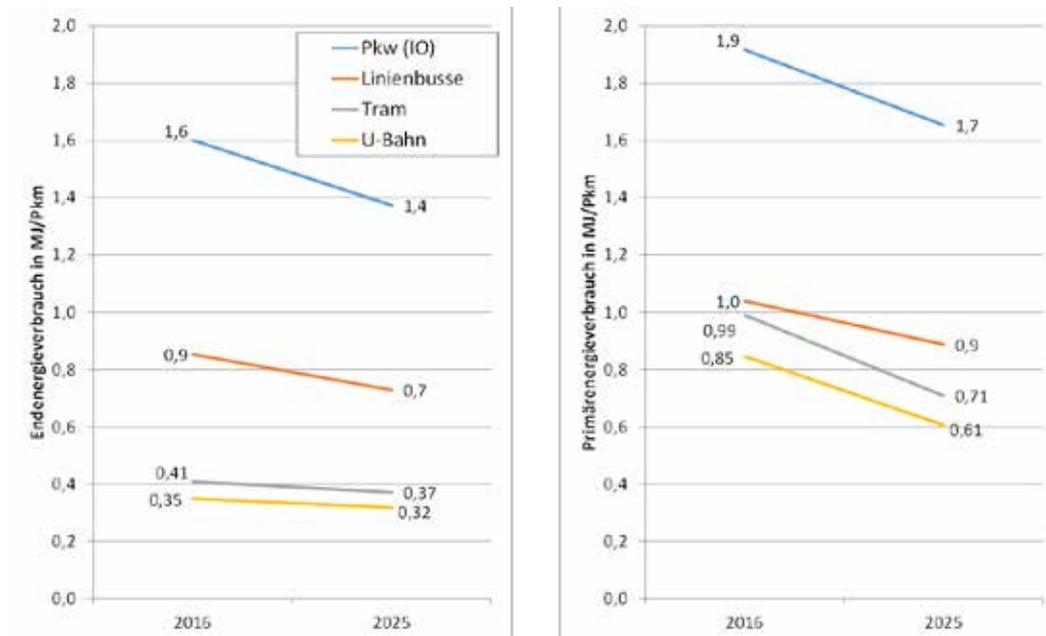
⁴ „Stadtbahnen“ stellen meist weiterentwickelte Straßenbahnsysteme dar, die über einen großen Anteil von Tunnelstrecken oder anderweitig von den sonstigen Verkehrsträgern, insbesondere dem MIV, getrennten Streckenabschnitten. Sie verfügen nicht wie U-Bahnen i. e. S. über ein vollständig unabhängiges Netz. Die Übertragbarkeit von Effizienzmaßnahmen und anderen Themen von der Straßen- oder U-Bahn auf Stadtbahnen wird in diesem Bericht nicht explizit thematisiert. Je nach Ausgestaltung des jeweiligen Stadtbahnsystems ist eher eine Übertragung von Straßenbahn- oder von U-Bahn-Themen gegeben.

⁵ Der ÖSPV beinhaltet nicht S-Bahnen und Regionalzüge (Schienenpersonennahverkehr, SPNV). Aufgrund der entsprechenden Abgrenzung des Betrachtungsrahmens wird in diesem Bericht meist diese Abkürzung verwendet und nicht die geläufigere Abkürzung „ÖPNV“.

⁶ Da dies allgemeinsprachlich weit verbreitet ist, wird in diesem Bericht teils der Begriff „Energieverbrauch“ synonym zu „Energiebedarf“ verwendet, obwohl Energie nicht verbraucht, sondern immer nur umgewandelt wird.

Der Vergleich des spezifischen Energiebedarfs pro Personenkilometer ist in Abbildung 1-2 dargestellt. Bei der Zusammenführung der Energiegrößen ist die Quantifizierung in der SI-Einheit Joule (J)⁷ üblich.

Abbildung 1-2: Vergleich des spezifischen End- bzw. Primärenergiebedarfs, Status Quo und erwartete Entwicklung bis 2025



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen auf Basis von TREMOD; IO = innerorts

Die Abbildung zeigt zum einen den Effizienzvorteil des ÖSPV gegenüber dem Pkw, der durch die Bündelung der Verkehrsnachfrage entsteht. Zum anderen wird deutlich, dass unter den ÖSPV-Verkehrsmitteln die Straßen- und U-Bahnen vor allem in Hinblick auf den Endenergieverbrauch einen Vorteil gegenüber dem Linienbus besitzen. Gründe dafür sind die gegenüber dem Bus noch gesteigerte Bündelung der Nachfrage, die geringeren Rollwiderstände und die noch stärker oder sogar vollständig von anderen Verkehrsmitteln getrennte Streckenführung. Bei der Betrachtung der Primärenergie ist der Verbrauchsunterschied jedoch wesentlich geringer. Grund ist die im heutigen Strommix, trotz des Anteils an Erneuerbaren Energien von mittlerweile über einem Drittel, noch dominierende Ineffizienz der Stromgewinnung aus fossilen Quellen.

Als geeignete Bezugsgröße für die Energieeffizienz kann durchgehend der Energiebedarf pro Personenkilometer verwendet werden, da die Auslastung der Fahrzeuge bei allen hier diskutierten Maßnahmen als konstant betrachtet werden kann. Eine Steigerung der Fahrgastzahlen bei gleichbleibendem Angebot, also eine erhöhte Auslastung der Fahrzeuge, möglicherweise auch durch verringerte Tarife verursacht, wäre zwar eine wirkmächtige Effizienzmaßnahme, steht jedoch hier nicht im Fokus. Auf Ebene der Einzelmaßnahmen kann in den meisten Fällen auch analog die aufgewendete Energie pro Fahrzeugkilometer verglichen werden. Eine Definition der Energieeffizienz über den Bedarf pro Platzkilometer würde die Wirksamkeit von Maßnahmen nicht ausreichend

⁷ Umrechnungsfaktor: 1 kWh = 3,6 MJ. Der Energiefaktor von Dieselkraftstoff (mit Beimischung von 5 % Biodiesel) beträgt laut DIN EN 16258 35,7 MJ/l (Endenergie) bzw. 44,0 MJ/l (Primärenergie).

würdigen, die in Schwachlastzeiten über eine Reduzierung der Fahrzeuggrößen Energie einsparen – so etwa bei den in Abschnitt 3.2.7.1 diskutierten Buszügen.

Basis für die bestmögliche Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen ist eine möglichst differenzierte Erfassung der Energiedaten und der Bezugsgrößen Fahrleistung und Auslastung – jeweils zeitlich hochaufgelöst, fahrzeug- bzw. linienspezifisch (oder sogar für einzelne Verbraucher im Fahrzeug) bzw. für möglichst kleine Einheiten der Infrastruktur, getrennt nach Brutto- bzw. Nutz-Kilometerleistung (ohne Leerfahrten) usw. I. d. R. liegen die Daten jedoch nur deutlich aggregierter vor, z. B. wenn Stromverbräuche im Straßenbahnnetz nur am Umspannwerk gemessen werden. Teils werden Daten zwar im Fahrzeug erhoben, aber nicht zur Auswertung übertragen, oder es bestehen keine geeigneten Auswertungs- und Analysewerkzeuge. Auf die diesbezüglichen Defizite und Ansätze für Verbesserungen wird in den Kapiteln 3 bis 5 eingegangen.

1.2. Aufgabenstellung und Ziel

Das Projekt „Innovative und systematische Ansätze für mehr Energieeffizienz im kommunalen Öffentlichen Personennahverkehr“ wurde durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen des Forschungsprogramms Stadtverkehr (FoPS) ausgeschrieben und finanziert. Ziel des Vorhabens war es, ein Instrumentarium zu entwickeln, mit dem Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz des Öffentlichen Straßenpersonenverkehrs und zur Senkung des damit verbundenen Ausstoßes von THG gefördert werden. Dieses wird in Kapitel 5 dieses Berichts präsentiert. Zuvor wurden die folgenden Teilziele erreicht:

- Analyse des Status Quo der Energieeffizienz im ÖSPV in Deutschland, geeigneter Energieeffizienzkriterien und Erfassungsgrößen, der Ausschreibungs-, Finanzierungs- und Förderungssituation sowie weiterer Anforderungen und Rahmenbedingungen in der ÖPNV-Branche
- Identifikation geeigneter Einzelmaßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz gemeinsam mit beteiligten Akteuren, v. a. in Zusammenarbeit mit vier näher betrachteten exemplarischen Verkehrsunternehmen; Betrachtung der Eignung der Maßnahmen im intramodalen Wettbewerb zwischen verschiedenen Anbietern im Rahmen von öffentlichen Ausschreibungen
- Quantifizierung der Energieeffizienzpotenziale sowie Ermittlung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen und Umweltkosten (unter Berücksichtigung möglicher Verlagerungseffekte) für die Einzelmaßnahmen
- Identifikation möglicher negativer Nebeneffekte und Diskussion von Ansätzen zur Vermeidung derselben; u. a. Betrachtung der Auswirkungen auf die Wahrnehmung des ÖSPV als effiziente und emissionsarme Art der Fortbewegung
- Identifikation geeigneter Instrumente zur Förderung der Effizienzmaßnahmen gemeinsam mit beteiligten Akteuren
- Abschätzung der Umsetzbarkeit und Wirksamkeit der vorgeschlagenen Instrumente unter Berücksichtigung der vorhandenen Landschaft von Ausschreibungs-, Förder- und Finanzierungspraxis
- Priorisierung der Instrumente, Untersuchung möglicher sinnvoller Kombinationen von Instrumenten; Hinweise zur Einführung des Förderinstrumentariums

Wie diese Teilziele in das Vorgehen des Projektteams umgesetzt wurden, ist in Abschnitt 1.3 erläutert.

1.3. Überblick über das Vorgehen

Das Projekt „Innovative und systematische Ansätze für mehr Energieeffizienz im kommunalen Öffentlichen Personennahverkehr“ wurde durch BMVI ausgeschrieben und durch ein Konsortium aus Öko-Institut, KCW und BHP durchgeführt.

Wie in Abbildung 1-3 dargestellt, stellte eine Status-Quo-Analyse zu Energieeffizienz sowie der damit verbundenen Förderung und Ausschreibungspraxis den ersten Baustein des Vorgehens, das Arbeitspaket (AP) 1, dar. Dabei wurde zum einen der ÖSPV in Deutschland im Allgemeinen betrachtet. Zum anderen wurden vier Musterunternehmen einbezogen, um der Bestandsaufnahme zur Energieeffizienz und der Betrachtung möglicher Maßnahmen eine große Praxisnähe zu geben. Die vier ausgewählten Praxispartner⁸ werden in Abschnitt 1.4 vorgestellt. Sie erfüllen die vorab definierten Kriterien zur Abdeckung einer großen Bandbreite von Rahmenbedingungen:

- Mit den Berliner (BVG) und Dresdner (DVB) Verkehrsbetrieben sind zwei Großunternehmen mit sowohl BOStrab⁹- als auch BOKraft¹⁰-Verkehren vertreten, sowie mit der Kreisverkehrsgesellschaft in Pinneberg (KViP) und den Verkehrsbetrieben (VB) Bachstein zwei Vertreter kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU).
- Es wurden sowohl direkt beauftragte und (weitgehend) in kommunalem Eigentum befindliche (BVG, DVB und KViP) Verkehrsunternehmen einbezogen als auch ein im Wettbewerb stehender privatwirtschaftlicher Busbetreiber (VB Bachstein).
- Es sind mit Berlin und Dresden zwei großstädtische Bedienungsgebiete vertreten und mit den KViP und VB Bachstein zwei Unternehmen mit Überlandverkehren im ländlichen und suburbanen Raum.
- Es werden sowohl bewegte Bedienungstopografien betrachtet (Randbezirke und Umland von Dresden, Fichtelgebirge, Harzvorland) als auch weitgehend ebene Gebiete (Berlin, Landkreis Pinneberg, Wolfsburg).

Für die Praxispartner fand die Informationserhebung v. a. im Rahmen von Vor-Ort-Terminen bei den Unternehmen statt. Ergebnisse dieses APs finden sich in diesem Bericht in den Abschnitten 1.5 und 2. Neben dem Status Quo der Energieeffizienz waren dabei stets auch schon Einsparpotenziale, d. h. konkrete Energieeffizienzmaßnahmen, Gegenstand der Gespräche (AP 2). Anhand der Erkenntnisse aus den Vor-Ort-Gesprächen sowie weiteren Analysen des Projektteams wurden daraus 19 konkrete Einzelmaßnahmen zur Effizienzsteigerung ausgewählt. Parallel begann an diesem Punkt der begleitende Prozess aus Werkstattgesprächen mit Vertretern weiterer Stakeholder (AP 6). Diskussionsergebnisse und Priorisierungen durch die an den ersten beiden Werkstattgesprächen zu den Themen „Busse“ sowie „Tram und U-Bahn“ teilnehmenden Experten flossen in die Maßnahmenauswahl ein.

Die ausgewählten Einzelmaßnahmen werden in diesem Bericht in Kapitel 3.2 erläutert und jeweils ergänzt durch eine kurze Vorstellung weiterer, nicht im Detail betrachteter, Ansätze zu mehr Energieeffizienz. An dieser Stelle werden auch Ergebnisse der AP 3 und 4 präsentiert, der betriebs- und gesamtwirtschaftlichen (Umweltkosten) Rechnungen zu den Einzelmaßnahmen. Die dabei zugrundeliegende Methodik ist in diesem Bericht in den Kapiteln 3.1.2 bis 3.1.5 erläutert. In Kapitel 4 werden die Ansätze zur Erhöhung der Energieeffizienz vergleichend dargestellt und auf Wechselwirkungen eingegangen. Die vergleichende Übersicht stellt das Ergebnis von AP 5 dar,

⁸ Die Begriffe „Musterunternehmen“ und „Praxispartner“ werden synonym verwendet.

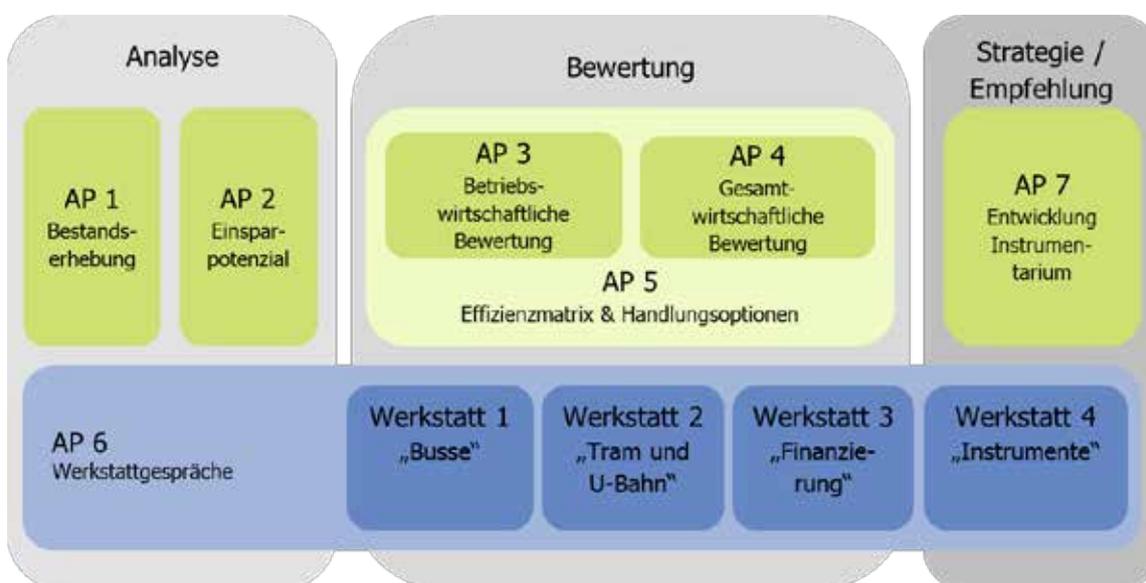
⁹ Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen – reguliert v. a. den Betrieb von Straßen- und U-Bahnen

¹⁰ Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr – reguliert v. a. den Betrieb von Bussen

den „Handlungsoptionenkatalog“. Auf die hier ursprünglich vorgesehene Energieeffizienzmatrix wurde hingegen aufgrund methodischer Bedenken verzichtet, die in Abschnitt 3.1.6 erläutert werden.

Der abschließende Strategie- und Empfehlungsbereich wurde begleitet von zwei weiteren Werkstattgesprächen, die sich mit der Finanzierung sowie mit möglichen Instrumenten zur verbesserten Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen befassen. Dabei wurde frühzeitig deutlich, dass die Identifikation von übergreifend anwendbaren Instrumenten den technischen und betrieblichen Differenzen zwischen den Sparten bzw. Verkehrsmitteln, der Verschiedenheit der behandelten Typen von Effizienzmaßnahmen (z. B. betriebliche oder fahrzeugtechnische Maßnahmen) und v. a. den diversen Arten von Verkehrsunternehmen (direkt betraute / im Wettbewerb stehende, Stadt / Land) nicht gerecht würde. In der Konsequenz wurde in AP 7 als zentrales Projektergebnis nicht ein in sich geschlossenes „Instrumentarium“ aufgestellt, sondern einzelne Handlungsempfehlungen ausgesprochen. Die drei „zentralen Handlungsempfehlungen“ werden in diesem Bericht in den Kapiteln 5.2 bis 5.4 behandelt. Im Abschnitt 5.5 werden weitere Handlungsempfehlungen formuliert.

Abbildung 1-3: Ablauf des Projekts



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

1.4. Vorstellung der Musterunternehmen

1.4.1. Berliner Verkehrsbetriebe

Die Berliner Verkehrsbetriebe AöR (BVG) ist das landeseigene Verkehrsunternehmen, das den Bus-, Straßenbahn- und U-Bahn-Verkehr im Land Berlin betreibt. Zudem ist sie der Anbieter mehrerer Fährlinien, während die Berliner S-Bahn seit den 1990er-Jahren nicht mehr in der Hand der BVG liegt. Der Konzern, der neben der BVG AöR noch mehrere Tochterunternehmen umfasst, beschäftigt rund 14.600 Mitarbeitern¹¹ und erzielt einen Umsatz von ca. 1.200 Mio. € pro Jahr (Stand 2017). Das Bedienungsgebiet der BVG gehört vollständig zum Verkehrsverbund Berlin-

¹¹ Davon BVG AöR: 12.100

Brandenburg (VBB). Es ist fast ausschließlich städtisch geprägt und verfügt nicht über nennenswerte Höhenunterschiede. Der Fahrplankontakt beträgt bei Straßen-, U-Bahn und Bus auf den meisten Linien ganztägig max. 10 Minuten, zu Hauptverkehrszeiten teils bei unter 4 Minuten. Die Hauptlinien werden nachts durchgehend betrieben, jedoch an Wochentagen meist zwischen ca. 1:00 Uhr und 4:00 Uhr durch Nachtbusse ersetzt.

Das Netz der BVG-U-Bahn umfasst 152 km und wird mit 10 Linien bedient. Bei der Straßenbahn existieren 22 Linien, die ein Netz mit einer Gesamtlänge von 190 km befahren, fast ausschließlich in den bis 1990 zu Ost-Berlin gehörigen Stadtgebieten. In mehr als der Hälfte des Netzes fahren die Straßenbahnen getrennt von den übrigen Verkehren (besonderer oder unabhängiger Bahnkörper¹²). Es existieren 154 Buslinien mit einer Linienlänge von insges. ca. 1.700 km (Stand 2017). Seit der deutschen Wiedervereinigung kam es zu ersten (teils momentan laufenden) Neubauprojekten von Straßenbahn- und U-Bahnstrecken. Das prognostizierte weiter steigende Fahrgastaufkommen soll nach aktuellen Planungen v. a. durch den Neubau von Straßenbahnstrecken und möglicherweise auch durch neue U-Bahn-Linien bewältigt werden.

Bei der U-Bahn werden ca. 400 je 26 bzw. 32 m lange Doppeltriebwagen eingesetzt, die in den 1970er bis 1990er Jahren hergestellt wurden. Teils haben sie die projektierte Lebensdauer von 40 Jahren schon überschritten und mehrere Fahrzeuggenerationen wurden in den 2000er und 2010er Jahren ertüchtigt. Diese Fahrzeuge bieten je 140 bzw. 240 Fahrgästen Platz und können in Vierfachtraktion fahren. Hinzu kommen jüngere Fahrzeuggenerationen, die als (ungeteilter) 4- bzw. 6-Wagen-Zug mit Längen von 52 bzw. 99 m Länge ausgeführt sind und ca. 320 bzw. 750 Fahrgästen Platz bieten (Stand 2017). Die Fahrzeuge fahren in zwei unterschiedlichen Tunnelprofilen und werden mittels an der Profilsohle befindlicher Stromschiene mit Energie versorgt. Die Fahrleistung beträgt meist über 100.000 Zug-km pro Jahr. Der Fahrgastraum ist grundsätzlich unklimatisiert. Es handelt sich aufgrund der bei U-Bahnen üblichen individuellen Infrastrukturkonfiguration stets um spezielle Anfertigungen für die Berliner U-Bahn. Die älteren Fahrzeuggenerationen wurden meist durch Konsortien mehrerer Hersteller wie AEG und Siemens gefertigt, die neueren durch die Firmen Bombardier oder Stadler.

Die Straßenbahnsparte der BVG setzt insgesamt ca. 330 Fahrzeuge ein. Davon gehören über 40 % zur neusten Generation „Bombardier Flexity“ aus den 2000er und 2010er Jahren. Dabei handelt es sich um 30 bzw. 40 m lange nicht kuppelbare Fahrzeuge mit 180 bis 250 Fahrgastplätzen und Klimaanlage. Die älteren Fahrzeuge vom Typ Adtranz / Bombardier GT6 sind mit 100 bis 150 Plätzen kleiner und verfügen i. d. R. nicht über eine Klimatisierung. Etwa 40 aus DDR-Zeiten stammende Altfahrzeuge des Herstellers ČKD Tatra befinden sich nur noch als Reserve und für Verstärkerfahrten in der Flotte. Zum Zeitpunkt der Ausmusterung sind die Fahrzeuge der BVG-Straßenbahnflotte im Mittel ca. 32 Jahre alt. Die Fahrleistung einer durchschnittlichen Straßenbahn beträgt etwa 70 Tsd. km im Jahr.

Die Busflotte besteht aus etwa 1.400 Fahrzeugen, davon 40 % Gelenk- (je 90 Fahrgastplätze) und je 30 % Solo- (je 70 Plätze) und Doppelstockfahrzeuge (je 113 Plätze). Die aktuell eingesetzten Fahrzeuge sind im Durchschnitt 9, im Maximum 15 Jahre alt. Die jährliche Fahrleistung liegt bei etwa 80 Tsd. km. Alle Busse verfügen über Klimaanlage für Fahrgast- und Fahrerraum. Aufgrund des hohen Anteils an Doppelstock- und Gelenkfahrzeugen, der hohen Fahrgastauslastung, des dichten Stadtverkehrs, der geringen Haltestellenabstände und des Energiebedarfs durch die Kli-

¹² Straßenbündiger Bahnkörper: in Fahrbahnen oder Gehwege eingebettet,
Besonderer Bahnkörper: im Verkehrsraum öffentlicher Straßen, jedoch vom übrigen Verkehrsraum mindestens durch ortsfeste körperliche Hindernisse getrennt,
Unabhängiger Bahnkörper: außerhalb des Verkehrsraums öffentlicher Straßen

omatisierung summiert sich der mittlere Kraftstoffverbrauch der Dieselbusse der BVG auf einen vergleichsweise hohen Wert von etwa 48 l/100 km (Solobus) bzw. 58 l/100 km (Gelenkbus) (alles Stand 2017).

Laufende Energieeffizienzmaßnahmen der BVG im Busbereich beinhalten sowohl technische Aspekte (z. B. Motormanagement), Verhaltensaspekte (z. B. Fahrerschulung) als auch Umfeldmaßnahmen (z. B. Vorrangschaltung an Ampeln). Als Maßnahmen mit Relevanz für die Energieeffizienz wurden in den vergangenen Jahren z. B. wasserstoffbetriebene Fahrzeuge und überlange Fahrzeuge (Doppelgelenkbusse, Buszüge etc.) erprobt. Aktuell liegen Schwerpunkte der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen jedoch eher beim Einsatz von Leichtbaufahrzeugen, der Busbevorrechtigung (im Zusammenspiel mit der kommunalen Verwaltung) und der Schulung des Personals zum verbrauchsarmen Fahren. Aufgrund der Erfordernisse des Luftqualitäts- und Klimaschutzes wird momentan und für die Zukunft der Fokus auf der Elektrifizierung des Busverkehrs liegen, die die Energieeffizienz dieser Verkehre deutlich steigert.

Bei den Straßenbahnfahrzeugen spielen die energetische Optimierung der Fahrzeugklimatisierung und -Beleuchtung wichtige Rollen. In der Streckeninfrastruktur wurde und wird, wie auch beim Omnibus, die Bevorrechtigung der Bahnen an Ampelkreuzungen verbessert. Die Stromversorgung wird durch die zweiseitige Speisung der Oberleitungsabschnitte optimiert. Für neue und zu modernisierende Betriebshöfe werden geschlossene Abstellhallen diskutiert, die zur deutlichen Senkung von Heizkosten führen können.

Bei der U-Bahn wird als wirkmächtigste Maßnahme ein fortgeführter Verzicht auf eine Klimaanlage betrachtet. Als eine Energieeffizienzmaßnahme in der Streckeninfrastruktur wird beispielsweise die Abwärme aus Tunnelstrecken nutzbar gemacht.

1.4.2. Dresdner Verkehrsbetriebe

Die Dresdner Verkehrsbetriebe AG (DVB) betreibt als kommunales Verkehrsunternehmen den ÖSPV in der sächsischen Landeshauptstadt und einigen Nachbarkommunen. Das Unternehmen beschäftigt rund 2 Tsd. Mitarbeiter und erzielt einen Umsatz von ca. 145 Mio. € pro Jahr (Stand 2017). Neben Bussen und Straßenbahnen gehören zum DVB-Angebot auch Fähren und Bergbahnen. Die Stadt und ihr Umland verbindet daneben auch ein S-Bahn-Netz mit drei Linien, das nicht von der DVB betrieben wird. Das Bedienungsgebiet der DVB und die S-Bahnen gehören vollständig zum Verkehrsverbund Oberelbe (VVO). Aufgrund der Lage der Stadt mit dem Stadtzentrum im Elbtal und Vororten, die sich in das umliegende Hügelland erstrecken, haben Straßenbahnen (bis zu 8 % Steigung) und Busse deutliche Höhenunterschiede zu überwinden.

Das Rückgrat des ÖPNV in Dresden bildet die Straßenbahn. Nach Streckenstilllegungen in den Nachkriegsjahrzehnten gibt es mittlerweile wieder Aus- und Neubauten. Hinsichtlich der Streckenlänge der Stadt- und Straßenbahnnetze liegt Dresden heute nach Berlin, Köln, Düsseldorf und Leipzig deutschlandweit an fünfter Stelle. Es handelt sich um eine klassische Straßenbahn ohne Tunnelabschnitte, die weitgehend auf straßenbündigem Bahnkörper fährt. Es werden zwölf Straßenbahnlinien betrieben. Dabei kommen im Normalbetrieb ausschließlich die ca. 170 Niederflrigelenktriebwagen verschiedener Länge (30 bis 45 m) aus Produktion der heutigen Bombardier Transportation in Einfachtraktion zum Einsatz. Sie sind maximal ca. 20 Jahre alt und bieten Platz für ca. 140 bis 220 Fahrgäste. im Jahresmittel liegt bei diesen Fahrzeugen der Verbrauch bei ca. 3,7 kWh / km (30 m-Fahrzeuge) bzw. bei ca. 5,8 kWh / km (45 m-Fahrzeuge). Die Fahrzeuge le-

gen im jährlichen Mittel je ca. 80 Tsd. km zurück¹³. Es sind zudem noch sechs Züge aus älteren Hochbord-Triebfahrzeugen des Herstellers ČKD Tatra mit jeweils drei Wagen im Regelbetrieb. Weder die Straßenbahnen noch die Busse verfügen derzeit über eine Fahrgastraum-Klimaanlage. Eine weitere Besonderheit ist die CargoTram, zwei von der DVB betriebene Güterstraßenbahnzüge, die das innerstädtische Volkswagenwerk über die Straßenbahngleise mit Fahrzeugteilen beliefern.

Solobusse machen weniger als ein Fünftel der DVB-Busflotte aus. Die Hälfte der knapp 150 Fahrzeuge sind 18 m-Busse des Herstellers EvoBus. Hinzu kommen zwölf sogenannte „XXL-Gelenkbusse“ desselben Herstellers mit 21 m Länge und Platz für je 150 Fahrgäste¹⁴. Die übrigen Fahrzeuge stammen vorwiegend von den Herstellern Solaris und MAN, ebenfalls jeweils überwiegend Gelenkbusse. Unter ihnen befindet sich auch ein batterieelektrischer Solobus. Insgesamt nutzt die DVB 17 Hybridbusse der Hersteller EvoBus und Swisshybrid. Der Verbrauch eines Solobusses liegt im Einsatzgebiet der DVB um 40 l/100 km und der eines Gelenkbusses bei ca. 50 l/100 km. Die durchschnittliche Jahresfahrleistung eines Busses der DVB liegt bei ca. 55 Tsd. km (Stand 2017).

Eine Besonderheit ist, dass es für die meisten Bus- und Straßenbahnlinien keinen Betriebsschluss gibt und auch kein gesondertes Nachtnetz existiert. Es wird stattdessen die Nacht hindurch gefahren, wenn auch mit verringerter Taktfrequenz und teils verkürzter Linienführung. Pro Jahr werden ca. 160 Mio. Fahrgäste befördert (Stand 2017).

Wichtige Energieeffizienzmaßnahmen der DVB in den vergangenen Jahren waren der Einsatz von Bussen mit erhöhter Fahrgastkapazität, mit hybrid- und batterieelektrischem Antrieb sowie die Erprobung von Leichtbauteilen. Zudem stand die Optimierung der Nebenverbräuche durch Klimaanlage und Heizung im Fokus, insbesondere in Verbindung mit dem elektrischen Antrieb.

Bei der Straßenbahn ist im Fahrzeugbereich der Verzicht auf Klimatisierung zu nennen. In der Infrastruktur wurde die Fahrstromverteilung optimiert (Durchbindung von Speiseabschnitten), die Erhöhung der Fahrdrahtspannung von 600 auf 750 V vorangetrieben, die intelligente Steuerung der Lichtsignale in Verbindung mit einem Fahrerassistenzsystem zur energieoptimalen Fahrweise ausgebaut sowie ein Projekt zur Umrüstung der statischen Steuerung des Heizungs- und Lüftungssystems in vorhanden Stadtbahnwagen durch eine besetzungsgradabhängige Steuerung durchgeführt.

1.4.3. Kreisverkehrsgesellschaft in Pinneberg

Die Kreisverkehrsgesellschaft in Pinneberg mbH (KViP) ist ein mittelständisches Busunternehmen mit 105 Beschäftigten und einem Umsatz von ca. 7,3 Mio. € pro Jahr. Sie ging in den 1990er Jahren aus der Uetersener Eisenbahn hervor und befindet sich mehrheitlich in Hand des Landkreises Pinneberg. Die Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH (VHH), deren Haupteigentümer wiederum das Land Hamburg ist, verfügen über eine 24,9-prozentige Beteiligung.

Die KViP bedient den überwiegenden Teil des schleswig-holsteinischen Landkreises Pinneberg, der westlich an Hamburg angrenzt. Es handelt sich um ein teils dicht besiedeltes Bedienungsge-

¹³ Gesamt-Zugkilometer » Nutz-Zugkilometer: Die Fahrzeuge sind i. d. R. direkt nach der Ausfahrt vom Betriebshof im Fahrgastbetrieb.

¹⁴ Jeweils Sitzplätze plus Stehplätze (4 Stehplätze pro m²)

biet¹⁵ um die Mittel- und Kleinstädte Elmshorn, Pinneberg, Tornesch, Uetersen, Wedel und Barmstedt, die zwischen 20 und 40 km von Stadtzentrum Hamburgs entfernt liegen. Im Landkreis existieren keine relevanten Höhenunterschiede.

Das Gebiet liegt vollständig innerhalb des Hamburger Verkehrsverbunds (HVV). Entsprechend ist das Unternehmen zur Einhaltung der Qualitätsstandards des Verbunds verpflichtet. Diese wirken sich u. a. auf zulässige Abgasstandards aus sowie auf die Inneneinrichtung der Fahrzeuge inkl. Infotainment und Klimatisierung. Diese Standards sind jedoch in den Randbereichen des HVV weniger streng als in der Kernstadt. Es werden 23 Linien bedient, davon sechs im Auftrag der VHH in angrenzenden Gebieten in westlichen Stadtteilen und Vororten Hamburgs. Weitere vier Linien werden von der VHH im Auftrag der KViP bedient. Fast alle Linien verfügen über Verknüpfungspunkte mit S-Bahn- und Regionalzuglinien. Aufgrund ausgeprägter Pendlerverkehre, v. a. Zubringerwege zu den Bahnstationen mit Anschluss nach Hamburg, und der hohen Bedeutung des Schülerverkehrs sind die tageszeitlichen Fahrgastzahlschwankungen sehr ausgeprägt. Die Bedienungszeiten sind aufgrund der Nähe zur Großstadt und der Vorgaben durch den Aufgabenträger mit ca. 4:30-0:30 auf den Hauptlinien relativ ausgedehnt. Pro Jahr werden ca. 3 Mio. Fahrgäste befördert.

Zum Einsatz kommen ca. 50 Linienbusse, überwiegend der Hersteller EvoBus (Daimler) und MAN. Dabei handelt es sich um etwa 35 Solo- (12 m, ca. 70 Plätze) und ca. 15 Gelenkbusse (18 m, ca. 110 Plätze¹⁶). Die gesamte jährliche Fahrleistung liegt bei 3,0 Mio. km, also im Bereich von 60 Tsd. km pro Fahrzeug¹⁷. Die Fahrzeuge rücken größtenteils vom zentralen Betriebshof in Uetersen aus und werden hier teils auch in der Mittagszeit abgestellt. Ein weiterer, kleinerer Abstellplatz befindet sich in Elmshorn. Der Dieserverbrauch bei der KViP liegt durchschnittlich bei ca. 45 l (Gelenkbus) bzw. ca. 35 l (Solobus).

Die KViP erprobte als eines der ersten Verkehrsunternehmen in Deutschland einen batterieelektrischen Linienbus (des Herstellers Eurabus), der sich inzwischen nicht mehr im Fuhrpark befindet. Heute befinden sich vier Volvo-Hybridfahrzeuge im Fuhrpark. Zentrale Energieeffizienzmaßnahmen der KViP der vergangenen Jahre waren zudem optimierte Vorkonditionierung der Busse, Chiptuning, Fahrertraining, der Einsatz hybrid- und batterieelektrischer Fahrzeuge sowie von Anhängerzügen.

1.4.4. VB Bachstein

Die Verkehrsbetriebe Bachstein GmbH (VB Bachstein) beschäftigt ca. 120 Beschäftigte. Sie ging aus einem Traditionsunternehmen hervor, das im 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts deutschlandweit im Eisenbahnbau und -betrieb tätig war. Das privatwirtschaftliche Unternehmen bietet heute ausschließlich Busverkehre an. Die VB Bachstein arbeiten über Beteiligungen und Kooperationen eng mit weiteren Verkehrsunternehmen v. a. in Niedersachsen zusammen. Der gemeinsame Firmensitz der VB Bachstein und mehrerer Beteiligungsgesellschaften liegt in Celle.

Die momentan von den VB Bachstein selbst bedienten Gebiete liegen im südlichen Niedersachsen (Verkehrsverbund Region Braunschweig) sowie im Fichtelgebirge (Oberfranken). Es bestehen Niederlassungen in Hornburg (Harzvorland), Wolfsburg-Vorsfelde und Hof / Saale. Die betriebenen Buslinien befinden sich hauptsächlich in ländlich geprägten Gebieten, wenngleich Berührungs-

¹⁵ Der Landkreis Pinneberg verfügt, abgesehen von den kreisfreien Städten, über die höchste Bevölkerungsdichte in Schleswig-Holstein.

¹⁶ Jeweils Sitzplätze plus Stehplätze (4 Stehplätze pro m²).

¹⁷ Bruttowagenkilometer inkl. Bereitstellungs- und anderer Leerfahrten.

punkte zum Stadtverkehr, z. B. in Wolfsburg, bestehen. Somit nimmt die Schülerbeförderung einen hohen Anteil ein. Bedienungszeiten und Taktfrequenz sind ansonsten entsprechend dem ländlichen Kontext meist geringer als bei den anderen Praxispartnern und stärker auf Schülerverkehre zugeschnitten. Die Fahrleistung der Busse liegt im jährlichen Mittel bei ca. 60 Tsd. km.

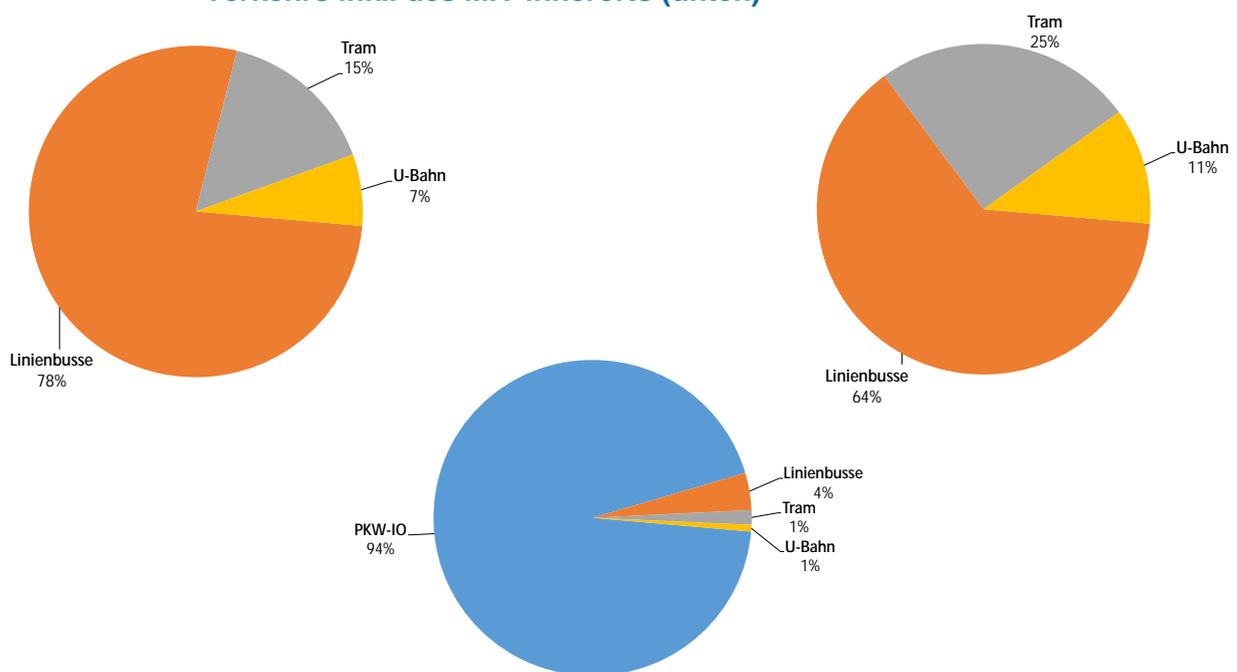
Die VB Bachstein selbst setzen ca. 85 Fahrzeuge ein, darunter mehr als 60 Solobusse. Der Rest des Fuhrparks besteht aus Gelenk- und Kleinbussen. Die gesamte Unternehmensgruppe, innerhalb derer Austausch und gemeinsame Nutzung des Fuhrparks stattfinden, verfügt über fast 600 Fahrzeuge. Die eigenen Busse stammen von vier verschiedenen Herstellern. Das durchschnittliche Alter der Fahrzeuge ist im Vergleich zu den Flotten der anderen Praxispartner höher.

Die drei Bedienungsgebiete unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer Topografie – vom Flachland (Wolfsburg) bis zu einem ausgeprägten Mittelgebirge (Fichtelgebirge). Es lassen sich jedoch keine Mehrverbräuche aufgrund der vielen Steigungsstrecken nachweisen. Ein Grund liegt darin, dass das Unternehmen Wert auf den Einsatz von für das jeweilige Bedienungsgebiet geeigneten Fahrzeugen sowie die Anpassung von Motor- und Getriebesteuerung legt (Chiptuning). Weitere zentrale Energieeffizienzmaßnahmen der VB Bachstein in den vergangenen Jahren waren der Verzicht auf Klimatisierung (soweit durch den jeweiligen Aufgabenträger ermöglicht) und an einem Standort ein wettbewerbliches Anreizsystem unter dem Fahrpersonal zum Kraftstoffsparen. Zudem wurden Hybrid- und Leichtbaufahrzeuge erprobt.

1.5. Stand der Energieeffizienz im ÖSPV in Deutschland

Wie Abbildung 1-4 zeigt, nimmt der Energiebedarf des ÖSPV nur einen geringen Anteil am Bedarf des gesamten innerörtlichen Verkehrs ein. Innerhalb des ÖSPV wiederum überwiegt der Busverkehr.

Abbildung 1-4: End- (links) und Primärenergieverbrauch (rechts) des ÖSPV in Deutschland im Jahr 2016 sowie Primärenergieverbrauch des innerstädtischen Verkehrs inkl. des MIV innerorts (unten)



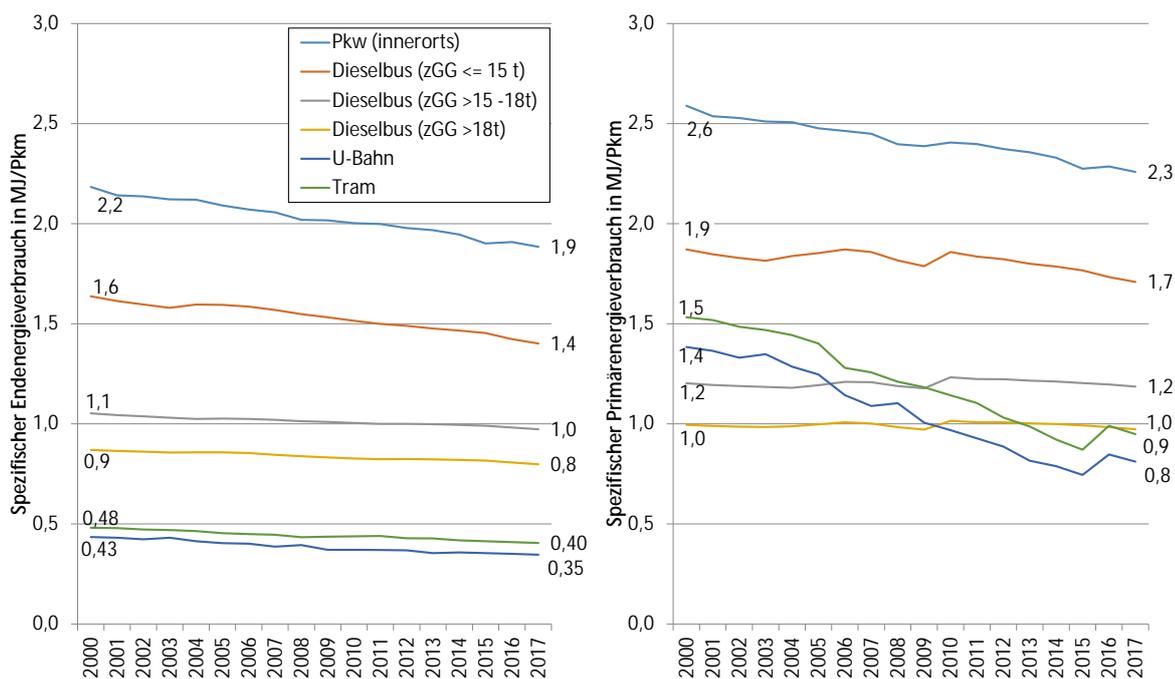
Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung auf Basis von TREMOD v5.6

Abbildung 1-5 zeigt den Energieeffizienzvorteil des ÖSPV gegenüber dem motorisierten Individualverkehr (MIV). Links ist die Entwicklung des mittleren spezifischen Endenergieverbrauches (im Fahrzeugbestand) seit dem Jahr 2000 dargestellt. Der Verbrauch pro Personenkilometer (Pkm) liegt bei ca. 0,4 MJ (Tram und U-Bahn). Unter Berücksichtigung einer leichten Veränderung in der mittleren Auslastung (Pkw -0,3 %; Busse +0,3 %, Tram und U-Bahn +1,1 %) hat sich der Verbrauch seit dem Jahr 2000 um 14 % (Pkw), 16 % (Tram) und 20 % (U-Bahn) reduziert. Bei den Linienbussen sank der spezifische Verbrauch um 8 % (Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 18 t) bzw. um 14 % bei zGG¹⁸ <15 t. Es wird deutlich, dass selbst das „ineffizienteste“ Verkehrsmittel im ÖSPV, der Linienbus, im Mittel über alle Busgrößen (0,84 MJ/Pkm im Jahr 2017) nur etwa die Hälfte des spezifischen Endenergieverbrauchs des MIV aufweist.

Für den Vergleich zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren und elektrisch betriebenen Fahrzeugen ist es sinnvoll, statt des Endenergieverbrauchs den Primärenergieverbrauch einschließlich der Kraftstoffvorketten zu betrachten (Abbildung 1-5 rechts). Dadurch werden die Wirkungsgradverluste an den fossilen Erzeugungsanlagen mitberücksichtigt. Weiterhin wird berücksichtigt, dass Höhe der Biokraftstoffbeimischung in diesem Zeitraum angestiegen ist.

Betrachtet man den Primärenergieverbrauch, besteht heute nur ein geringer Unterschied bezüglich der Energieeffizienz der großen Linienbusse (zGG >18 t) und dem schienengebundenem ÖSPV.

Abbildung 1-5: Entwicklung des spezifischen End- und Primärenergieverbrauch im ÖSPV und im MIV pro Personenkilometer



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen auf Basis von TREMOD v5.64

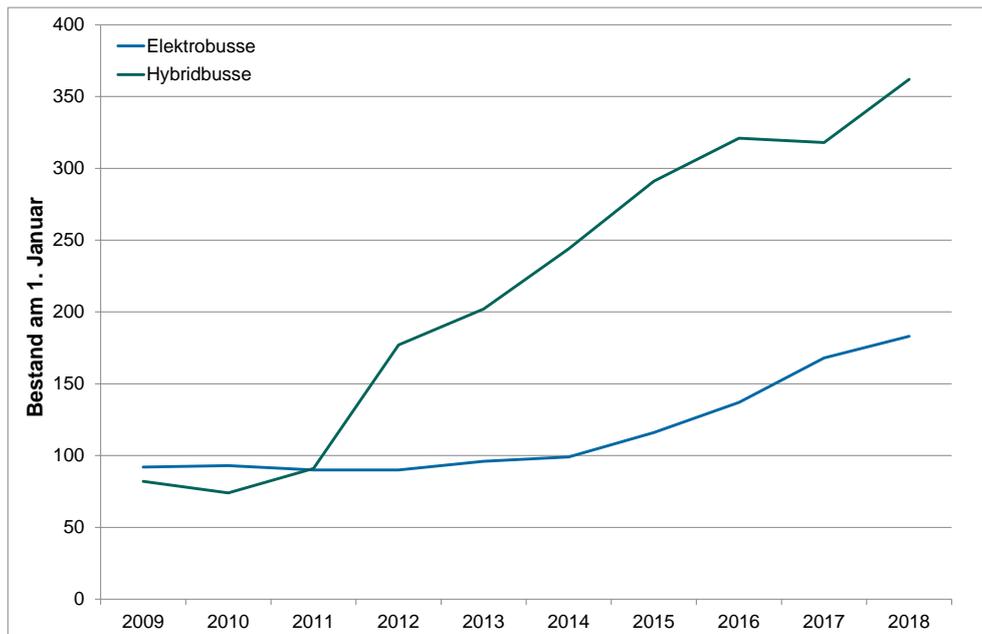
Bei den Linienbussen nahm seit dem Jahr 2000 die Anzahl größerer Busse im Bestand zu, sodass der mittlere Endenergieverbrauch über alle Busgrößen von 1,1 MJ/Pkm bis zum Jahr 2017 um

¹⁸ Zulässiges Gesamtgewicht

22 % auf 0,84 MJ/Pkm zurückgegangen ist. Weitere Ergebnisse können Tabelle 6-9 im Anhang entnommen werden.

Bei den Linienbussen überwiegt nach wie vor der Einsatz von Dieseln. Daneben wird noch eine Reihe an Erdgasbussen betrieben, deren Bestand in den letzten Jahren jedoch rückläufig war. Der Bestand an Kraftomnibussen mit Hybrid- und Elektroantrieb (einschließlich Oberleitungsbusse) ist mit 362 (Hybrid) bzw. 183 (Elektrobusse) noch überschaubar.

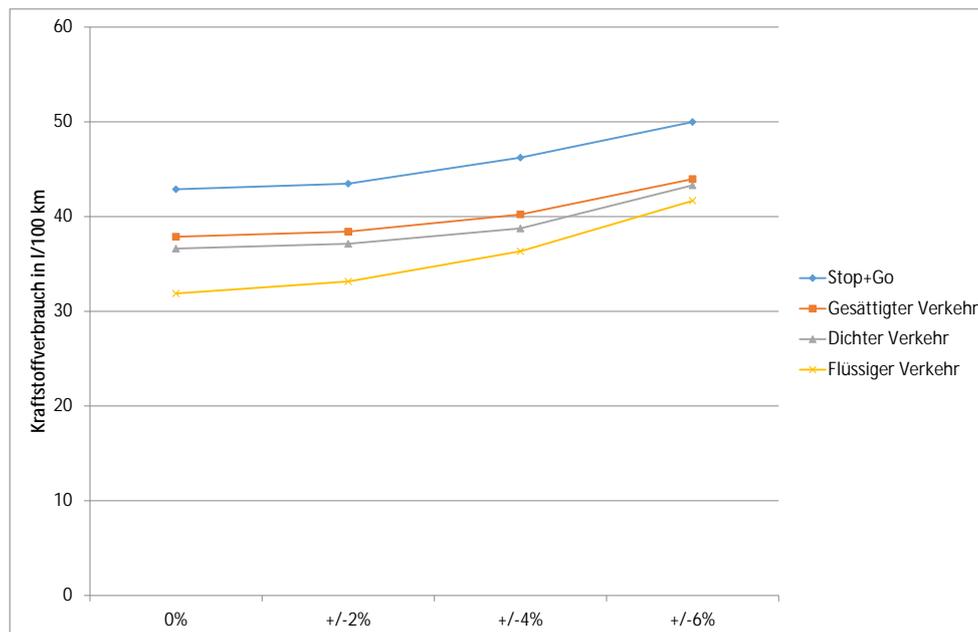
Abbildung 1-6: Bestand an Kraftomnibussen mit Hybrid- und Elektroantrieb von 2009 bis 2018 in Deutschland



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung auf Basis von Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2018)

Der Kraftstoffverbrauch der Dieseln hängt neben der Art der eingesetzten Fahrzeuge von einer Reihe von Faktoren wie z. B. der Topografie und der Verkehrssituation ab. Je flüssiger der Verkehr und je flacher die Topografie ist, desto niedriger ist der Verbrauch der Dieseln (siehe Abbildung 1-7). Bei flacher Topografie liegt der Verbrauch mit rund 43 l/100 km bei „Stop and Go“ etwa 35 % über dem Verbrauch bei flüssigem Verkehr. Mit 31 % liegt der durch eine bewegte Topografie bedingte Mehrverbrauch ähnlich hoch. Beide Mehrverbräuche bieten Ansatzpunkte für Energieeinsparungen mit Dieselhybrid- und batterieelektrischen Bussen (siehe Absätze 3.2.2.1 und 3.2.2.2), die bei Gefälle oder häufigen Stopps die Bremsenergie zurückgewinnen können. Die Klimatisierung der Fahrzeuge im Sommer und das Heizen im Winter erhöhen den Verbrauch zusätzlich.

Abbildung 1-7: Kraftstoffverbrauch eines Linienbusses (zGG. 15 - >18 t) auf einer Hauptverkehrsstraße in Abhängigkeit von Topografie und Verkehrssituation



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung Auf Basis von HBEFA 3.3

Zusammenfassend lässt sich sagen:

- Ein deutlicher Energieeffizienzvorteil des ÖSPV zum MIV ist gegeben. Der Endenergiebedarf pro Personenkilometer im Vergleich zum Pkw beträgt bei U-Bahn und Straßenbahn etwa ein Fünftel, beim Linienbus die Hälfte.
- Bei Betrachtung der Primärenergie ist der Effizienzvorteil des Schienenverkehrs gegenüber MIV und Linienbus aufgrund der heutzutage noch fossil geprägten Stromerzeugung deutlich geringer. Aufgrund der Energiewende sinkt der Primärenergiebedarf des Schienenverkehrs jedoch kontinuierlich.
- Standortbedingungen wie Topografie und Verkehrssituation lassen den Verbrauch von Omnibussen um bis zu ein Drittel steigen.

Gleichzeitig verändern sich energieeffizienzrelevante Rahmenbedingungen. Die Bevölkerung der meisten Großstädte in Deutschland wächst. Aufgrund des dichteren Verkehrs sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit des ÖSPV im Straßenraum tendenziell, während seine Auslastung steigt. Ausstattungsmerkmale wie Barrierefreiheit, Klimatisierung, Echtzeit-Fahrgastinformation, W-LAN und USB-Lademöglichkeiten werden vermehrt erwartet und steigern die Attraktivität des Verkehrsträgers. Der ÖSPV muss also bei weitem nicht nur Energieeffizienz und Klimaschutz gewährleisten, sondern auch viele weitere Ansprüche und Ziele erfüllen, um Fahrgäste zu binden. Im zukünftigen Energiesystem spielt die Kopplung von Stromangebot und -nachfrage sowie verschiedener Verbrauchssektoren eine größere Rolle, was Energiespeicherung und -rückspeisung eine höhere Bedeutung zukommen lässt. Auch der Einfluss der Technologieentwicklungen wie Automatisierung, Digitalisierung und Vernetzung von Verkehrsträgern kann nur schwer vorhergesagt werden.

Die Frage ist also, wie der ÖSPV angesichts dieser herausfordernden Rahmenbedingungen und gleichzeitig wachsender Energieeffizienz des Pkw aufgrund eines höheren Anteils von batterieelektrischen und Hybridfahrzeugen den Energieeffizienzvorteil erhalten und ausbauen kann.

2. Förderungs- und Ausschreibungspraxis

2.1. Analyse der heutigen Förderung von Energieeffizienz im ÖSPV

Die Förderpraxis ist durch eine Vielzahl von Förderprogrammen auf EU-, Bundes- und Landesebene gekennzeichnet. Für eine Recherche möglicher Förderprogramme bietet sich das Portal www.foerderdatenbank.de des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) an. Das BMWi bietet darüber hinaus auch eine telefonische Förderberatung (Finanzierungshotline) mit Informationen zu Förderprogrammen, Antragsverfahren, Anlaufstellen und Konditionen an. Unterstützung bei der Einordnung kommunaler Vorhaben zu Fördermöglichkeiten des Bundes, die Bezug zu schadstoffreduzierenden Maßnahmen im kommunalen Raum haben, bietet ferner die beim BMVI angesiedelte „Lotsenstelle Fonds Nachhaltige Mobilität“.

Ob und inwieweit die einzelnen Fördermöglichkeiten nebeneinanderstehen oder ergänzend zueinander in Anspruch genommen werden können, ist im Einzelfall zu ermitteln.

2.1.1. Förderprogramme für Elektrobusse auf Bundesebene

Mit der am 05.03.2018 in Kraft getretenen **Richtlinie zur Anschaffung von Elektrobusen im öffentlichen Personennahverkehr** fördert das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (**BMU**) die Beschaffung von Elektrobusen für den ÖPNV mit bis zu 80 % der Investitionsmehrkosten. Ladeinfrastruktur im Zusammenhang mit der Anschaffung von Bussen sowie die Investitionsmehrkosten für Plug-In-Hybridbusse können mit maximal 40 % der Investitionsmehrkosten gefördert werden. Förderfähig sind zudem weitere Maßnahmen, die zur Inbetriebnahme von Elektrobusen nötig sind (zum Beispiel Schulungen und Werkstatteinrichtungen). Elektrobusse, die in Gebieten mit hoher Schadstoffbelastung zum Einsatz kommen, werden bevorzugt gefördert. Gleiches gilt für Gebiete mit einer hohen Lärmbelastung. Das BMU stellt für die Förderung vorerst kurzfristig 35 Mio. € zur Verfügung, eine weitere Aufstockung ist zeitnah vorgesehen (Stand Februar 2018). Die Förderung ist als zweistufiges Antragsverfahren ausgestaltet; Vorhaben müssen mindestens sechs Elektrobusse umfassen. Antragsberechtigt sind Verkehrsunternehmen. Die Richtlinie ist bis zum 31.12.2021 befristet.

Die Richtlinie zur Anschaffung von Elektrobusen im öffentlichen Personennahverkehr des BMU ist Teil des **Sofortprogramms Saubere Luft 2017-2020**, welches der Bund auf dem zweiten Kommunalgipfel am 28.11.2017 aufgelegt hat. Gegenstand des Programms sind u. a. Maßnahmen für die Elektrifizierung des urbanen Verkehrs und die Errichtung von Ladeinfrastruktur. Das Sofortprogramm wird soweit möglich auf Grundlage der bestehenden Förderrichtlinien des Bundes umgesetzt werden, bestehende Förderprogramme werden finanziell aufgestockt.

Auch die **Förderrichtlinie Elektromobilität** des **BMVI** ist Teil des Sofortprogramms Saubere Luft 2017-2020. Gefördert wird die Beschaffung von elektrisch betriebenen ÖPNV-Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur in Höhe von in der Regel 40 % (in bestimmten Fällen 50 %) der Investitionsmehrkosten gemäß der bis Ende 2020 laufenden Förderrichtlinie Elektromobilität vom 05.12.2017. Pro Antrag sollen in der Regel nicht weniger als fünf Fahrzeuge beschafft werden. Im Beihilfefall ist eine Förderquote bis zu 40 % möglich, für KMU kann ein zusätzlicher Bonus von 10 % bzw. 20 % gewährt werden. Bei Zuwendungen, die keine Beihilfe darstellen beträgt die Förderquote 75 %, für finanzschwache Kommunen bis zu 90 %. Die maximale Zuwendung pro Vorhaben und Antragsteller ist grundsätzlich auf 2 Mio. € begrenzt. Das Antragsverfahren ist einstufig. Zur Umsetzung des Programms werden Bekanntmachungen zu einzelnen Schwerpunkten veröffentlicht. Die Antragsteller werden im Rahmen separater Aufrufe zur Einreichung von Förderanträgen mit Vorhabenbeschreibung zum jeweiligen Stichtag aufgefordert. Die Aufrufe werden jährlich veröffentlicht. An-

tragsberechtigt sind Städte, Gemeinden, Landkreise, Zweckverbände, Landesbehörden, kommunale und Landesunternehmen, sonstige Betriebe und Einrichtungen, die in kommunaler Trägerschaft stehen oder gemeinnützigen Zwecken dienen. Die Richtlinie ist bis zum 31.12.2020 gültig.

2.1.2. Förderprogramme für Elektrobusse auf Länderebene

Neben der Bundesförderung haben viele Bundesländer Förderprogramme für Elektrobusse aufgelegt, die sich erheblich unterscheiden, insbesondere hinsichtlich der Höhe der Förderung als auch der förderfähigen Investitionen. Förderquoten von ca. 50 % der Mehrkosten sind üblich, z. T. werden aber auch 80 % bezuschusst. Förderfähige Investition kann neben der Fahrzeugbeschaffung je nach Förderprogramm auch die Ladeinfrastrukturrichtung oder die Werkstatteinrichtung sein. Eine weitergehende Darstellung aller Förderprogramme auf Bundesländerebene würde den Rahmen dieses Schlussberichts sprengen.

2.1.3. Förderprogramme in den Bereichen Energieeffizienz, Klimaschutz, Nachhaltige Mobilität

Neben den Programmen zur reinen Förderung von Elektrobussen gibt es sowohl auf Bundes- als auch auf Landesebene zahlreiche Förderprogramme in den Bereichen Energieeffizienz, Klimaschutz, Nachhaltige Mobilität u. ä.

Gegenstand der Förderung sind gegenwärtig oftmals Pilot- und Demonstrationsvorhaben, Maßnahmen mit hohem Innovationscharakter oder auch Forschung und Entwicklung. Inwiefern sich diese Förderprogramme für spezielle Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz im ÖSPV eignen und ob sie möglicherweise andere Fördermaßnahmen ergänzen können, ist im Einzelfall zu prüfen.

Auf Bundesländerebene können in diesem Themenkomplex Förderungen über Mittel des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) zur Anwendung kommen, bzw. viele Förderprogramme der Bundesländer basieren auf EFRE-Mittel. Aufgabe des EFRE ist es, durch die Beseitigung von Ungleichheiten zwischen den verschiedenen Regionen den wirtschaftlichen, sozialen und territorialen Zusammenhalt in der Europäischen Union zu stärken. Schwerpunkte der Förderung in der aktuellen Förderperiode sind u. a. Verringerung der CO₂-Emissionen in allen Bereichen der Wirtschaft sowie Förderung von Nachhaltigkeit im Verkehr. Über EFRE sind je nach individuellem Entwicklungsgrad einer Region Förderungen i. H. v. 50, 60 oder 85 % der zuschussfähigen Ausgaben möglich.

Voraussetzung für die Förderung ist eine Partnerschaftvereinbarung des Mitgliedstaats mit der EU-Kommission, die alle Unterstützungsleistungen aus den Struktur- und Investitionsfonds im betreffenden Mitgliedstaat umfassen. Die Mitgliedstaaten erstellen die Partnerschaftvereinbarung gemeinsam mit den zuständigen regionalen und lokalen Stellen vor Ort. Die Maßnahmen des EFRE werden in den Mitgliedstaaten in Form von operationellen Programmen durchgeführt. Jedes operationelle Programm gilt für einen Zeitraum zwischen dem 01.01.2014 und dem 31.12.2020.

2.1.4. Schwachstellenanalyse der Förderpraxis

Einen Schwerpunkt der Diskussion um Energieeffizienzmaßnahmen im ÖSPV bildet derzeit (Stand 2018) die Förderung batterieelektrischer Busse, deren Anschaffungsmehrkosten mit unterschiedlichen Prozentsätzen gefördert werden. Hierbei zeigt sich, dass eine reine Fahrzeugförderung nicht ausreicht, um die durch die Umstellung auf elektrischen Betrieb verursachten Mehrkosten auszugleichen. Denn Mehrkosten entstehen nicht nur für die Fahrzeuge, sondern auch für (Lade-)

Infrastruktur, Betriebshofanpassung, Personalschulung etc. Für die Verkehrsunternehmen bedeutet dies einen erheblichen Umstellungsaufwand vom Dieselbetrieb auf den batterieelektrischen Betrieb. Dieser ist zu bewältigen, bevor ein Quervergleich hinsichtlich der eigentlichen Fahrzeugmehrkosten bei Anschaffung und Betrieb gezogen werden kann.

Die Analyse der Förderlandschaft für den Bereich Energieeffizienz und Elektromobilität im ÖSPV lässt jedoch noch weitere Schwachstellen erkennen:

- Die Höhe der Förderquoten ist häufig nicht ausreichend, um die Mehrkosten der Investitionen und Maßnahmen abzudecken.
- Wegen dem Verbot des vorzeitigen Maßnahmenbeginns ist die Verzahnung mit wettbewerblichen Vergaben schwierig.
- Die Bagatellgrenzen sind häufig nicht sehr KMU-freundlich, so z.B. die Vorgabe mindestens 5 bzw. sechs Elektrobusse zu beschaffen. Auch werden die Fördermittel oft nach dem „Windhundverfahren“ vergeben und nach Eingang der Anträge verteilt. Auch dies benachteiligt tendenziell kleinere Antragssteller mit geringen Verwaltungskapazitäten. Außerdem benachteiligt es Betriebe, die geförderte Fahrzeuge werterhaltend pflegen und somit sinnvollerweise auf kommende „Windhundrennen“ verzichten, während andere VU wiederkehrend an Förderungen partizipieren und die Bestandsfahrzeuge vernachlässigen.
- Skalierungsnachteile entstehen bei KMU, die bereits für den ersten Elektrobus eine komplett neue Infrastruktur benötigen und die Fahrzeuge gegebenenfalls fremdwarten lassen müssen.
- Der Verwaltungsaufwand insbesondere bei EU-Anträgen ist sehr hoch, zudem wirkt die Vorgabe der Zusammenarbeit über Ländergrenzen hinweg komplexitätssteigernd.
- Die Förderlandschaft auf Bundesebene ist insgesamt betrachtet, sehr zersplittert und verteilt sich über mehrere Ministerien („Förderdschungel“). Auch auf Länderebene sind eine Vielzahl divergierender Regelungen bzw. das vollständige Fehlen von Fördermöglichkeiten zu beobachten, betrachtet man beispielsweise die Förderung von Hybrid- und E-Bussen.
- Das Thema Energieeffizienz im ÖSPV ist ein Querschnittsthema, das nur vergleichsweise geringe Schnittmengen mit den Fördertatbeständen der etablierten Förderprogramme im Bereich Energieeffizienz besitzt. Insbesondere betriebliche Maßnahmen und weiche Maßnahmen wie z.B. Fahrerschulungen etc. finden sich oft nicht in den Fördertatbeständen der analysierten Programme wieder. Die Förderlandschaft im Bereich Energieeffizienz ist vielmehr stark orientiert an F&E und Technologieförderung.

Für Fördervorhaben mit Wege- und Infrastrukturbezug (Busbeschleunigung, Ausbau der Fahrwege von Straßenbahn und U-Bahn) ist zu beachten, dass nach dem Koalitionsvertrag der die aktuelle Bundesregierung bildenden Parteien die Mittel für das Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) bis 2021 auf jährlich 1 Mrd. € erhöht und danach jährlich dynamisiert für Neu- und Ausbaurvorhaben zur Verfügung stehen sollen. Der Koalitionsvertrag sieht unter anderem vor, dass E-Busse zur Verbesserung ihrer Wirtschaftlichkeit ebenso wie Schienenfahrzeuge von der EEG-Umlage weitgehend freigestellt werden sollen.

2.2. Analyse der heutigen Ausschreibungspraxis im ÖSPV in Hinblick auf Energieeffizienz

Die veröffentlichten Vergabebekanntmachungen und Vorabbekanntmachungen gem. § 8a Abs. 2 PBefG / Art. 7 Abs. 2 VO (EG) Nr. 1370/2007 aus den Jahren 2014, 2015 und 2016 (1.825 im straßengebundenen und 15 im schienengebundenen ÖSPV) wurden auf die Frage hin untersucht,

inwieweit Energieeffizienzkriterien Gegenstand der Vergabeunterlagen waren. Untersuchungsgegenstand waren damit die wettbewerblichen und direkten Vergaben von ÖSPV-Leistungen mit Bussen, Straßenbahnen und U-Bahnen.

2.2.1. Schienengebundener ÖSPV (Straßenbahn, U-Bahn)

Schienengebundener kommunaler ÖSPV (Straßenbahn, U-Bahn) wird bislang regelmäßig im Rahmen kommunaler Direktvergaben beauftragt. Soweit Energieeffizienzanforderungen an die Fahrzeuge oder Infrastruktur(-bestandteile) Gegenstand der Direktvergabe sind, sind diese im öffentlichen Dienstleistungsauftrag (öDA) als gemeinwirtschaftliche Verpflichtungen abzubilden, um durch die Anforderungen entstehende Mehrkosten auch ausgleichen zu können.

In der untersuchten Ausschreibungspraxis fanden sich in den veröffentlichten Vorabbekanntmachungen regelmäßig keine Energieeffizienzanforderungen. Allerdings verweisen die Vorabbekanntmachungen hinsichtlich detaillierter technischer Anforderungen auf sog. ergänzende Dokumente, die größtenteils zum Untersuchungszeitpunkt nicht mehr zugänglich waren. In einem Fall (Freiburg), in dem die ergänzenden Anforderungen noch zugänglich waren, fanden sich Anforderungen zu Vorrichtungen zur Bremsenergieerückgewinnung bei Straßenbahnen sowie der optionalen Verwendung eines Schwungradspeichers.

2.2.2. Straßengebundener ÖSPV

2.2.2.1. Bestellte Verkehre

In der Gruppe bestellter Verkehre ist zwischen verschiedenen Formen der Beauftragung zu unterscheiden. Gemeinsam ist ihnen, dass der Auftraggeber in der Vorabbekanntmachung gem. § 8a Abs. 2 PBefG beschreiben muss, welche Mindestanforderungen im Hinblick auf Energieeffizienz und / oder Emissionen der Bestellte Verkehr erfüllen soll. Nur dann kann sichergestellt werden, dass das vom Aufgabenträger gewünschte Energieeffizienzniveau nicht durch einen eigenwirtschaftlichen Genehmigungsantrag mit geringeren Standards unterschritten und die verfolgten Energieeffizienzziele damit konterkariert werden.

Kommunale Direktvergaben

Der überwiegende Teil der Busverkehrsleistungen wird auf Grundlage kommunaler Direktvergaben erbracht. Hier sind die Energieeffizienzanforderungen im öDA als gemeinwirtschaftliche Pflichten und bei den Ausgleichsparametern abzubilden, um durch die Anforderungen ausgelöste Mehrkosten ausgleichen zu können. Fahrzeugbeschaffungen durch das kommunale Verkehrsunternehmen unterliegen bei Überschreiten des Schwellenwerts dem Sektorenvergaberecht und sind nach den Regeln der Sektorenverordnung zu vergeben.

Wettbewerbliche Vergaben

Wettbewerbliche Vergaben von Dienstleistungsaufträgen im ÖSPV stellen im Hinblick auf Energieeffizienzkriterien besondere Herausforderungen gleichermaßen an den Auftraggeber als Vergabestelle und die Verkehrsunternehmen als Bieter im Vergabeverfahren. Dies gilt insbesondere dann, wenn der Aufgabenträger eine Leistung bestellen will, die mit Elektrobussen erbracht werden soll. Hierbei sind zu berücksichtigen:

- höherer Zeitbedarf für Vorbereitung als auch die Durchführung der Vergabe
- Erforderlichkeit einer Machbarkeitsstudie für Eignung der Linien und Antriebskonzept

- Vergabekonzept: soll Einsatz von E-Bussen (oder anderer Energieeffizienzmaßnahmen) zwingend vorgegeben werden oder lediglich im Rahmen der Wertung der Angebote beanreizt und belohnt werden?
- längere Rüstzeit (Zeitraum zwischen Zuschlagserteilung und Betriebsaufnahme) für Ausschreibungsgewinner erforderlich für Fahrzeug- und Infrastrukturbeschaffung

Der Aufgabenträger hat die Wahl zwischen verpflichtenden und fakultativen Energieeffizienzvorgaben: Entscheidet er sich für den verpflichtenden Einsatz von E-Bussen (oder anderer Energieeffizienzmaßnahmen) für die Leistung oder einen definierten Teil davon, haben die Bieter entsprechend ihre Angebote abzugeben und die Wertung kann allein nach dem Preis erfolgen.

Soll hingegen nur ein Anreiz dadurch gesetzt werden, dass das Energieeffizienzniveau der angebotenen Leistung im Rahmen der Wertung der Angebote berücksichtigt wird, bestehen dafür mehrere Möglichkeiten, z. B.:

- Im Rahmen der Wertung wird ein rechnerischer Bonus auf den wettbewerblichen Angebotspreis gewährt, der sich an den voraussichtlichen Mehrkosten des Bieters für den Einsatz einer bestimmten Technik bemisst.
- neben dem Angebotspreis können die durch ein Angebot verursachten oder eingesparten Umweltkosten Eingang in die Wertungsentscheidung finden.
- Der Aufgabenträger nimmt eine so genannte Budgetvergabe vor, d. h. er definiert die von ihm gewünschte Leistung und die Vergütung, die er bezahlen wird. Die Bieter können dann mit diesem Budget ein Angebot abgeben. Den Zuschlag erhält das Angebot mit der größten Energieeffizienz oder den geringsten Emissionen.

Schließlich bedarf es wirksamer vertraglicher Kontroll- und ggf. Sanktionsmechanismen, um sicherzustellen, dass das angebotene und bezuschlagte Energieeffizienzniveau tatsächlich erfüllt wird.

Direktvergaben nach Art. 5 Abs. 4 VO (EG) Nr. 1370/2007 (Bagatellvergaben)

Unterhalb bestimmter Schwellenwerte (300.000 / 600.000 km Fahrleistung oder 1.000.000 / 2.000.000 € Auftragswert pro Jahr¹⁹) können öffentliche Dienstleistungsaufträge in Form von Dienstleistungskonzessionen direkt an ein Verkehrsunternehmen vergeben werden. Bei dieser sogenannten Bagatellvergabe dürfte es sich um die Bestellart handeln, die gemessen an der Zahl der vergebenen Kilometerleistungen die geringste Bedeutung hat.

Der Aufgabenträger hat hier, wie auch bei den anderen Vergabearten, die Energieeffizianzorderungen im öffentlichen Dienstleistungsauftrag als gemeinwirtschaftliche Verpflichtungen abzubilden.

Ausschreibungs- und Vergabepaxis für bestellte Verkehre

In der bisherigen Ausschreibungs- und Vergabepaxis von ÖSPV-Dienstleistungen spielen Energieeffizienzkriterien bislang eine marginale Rolle.

Bei den untersuchten – weit über 1.000 – Bekanntmachungen im EU-Amtsblatt (Vorinformationen, Auftragsbekanntmachungen und Bekanntmachungen vergebener Aufträge) fanden sich lediglich in

¹⁹ Der jeweils höhere Wert bezieht sich auf die Vergabe an KMU, die nicht mehr als 23 Fahrzeuge betreiben.

zwölf Bekanntmachungen zwingende oder fakultative Vorgaben zum Einsatz von Elektro- oder Hybridfahrzeugen.

Soweit in sieben Fällen die Verwendung von Hybrid- oder Elektrobussen zwingend vorgeschrieben war, handelte es sich hierbei in der Mehrzahl um die Vorgabe von Dieselhybridfahrzeugen. In einem weiteren Fall war der Einsatz eines Elektrobusses vorgesehen, der vom Auftraggeber – den Stadtwerken als Liniengenehmigungsinhaber – bereitgestellt wurde.

Lediglich in einer wettbewerblichen Vergabe (MVV-Regionalbuslinie 232) war vorgesehen, dass die Leistung zwingend und ausschließlich durch drei vom Bieter zu beschaffende Elektrofahrzeuge zu erbringen sei. Die dafür erforderliche Ladeinfrastruktur solle den Bietern beigestellt und ebenfalls im Wege einer wettbewerblichen Vergabe beschafft werden.²⁰

In den restlichen fünf Ausschreibungen führte der Einsatz mindestens eines Elektro- (oder Hybrid- oder Erdgasfahrzeuges) zu einem Wertungsbonus bei der Auswahl des wirtschaftlichsten Angebotes. Die Höhe des Wertungsbonus war je nach Ausschreibung sehr unterschiedlich und lag zwischen einem vierstelligen Betrag für die gesamte Vertragslaufzeit und bis zu 3.000 € pro Fahrzeug und Einsatzjahr. Eine Übernahme von Infrastrukturleistungen oder (Wiedereinsatz-)Risiken durch den Aufgabenträger war nicht vorgesehen.

Soweit sich dies durch die Verfasser ermitteln ließ, haben die Bieter von der Möglichkeit, durch ein den Einsatz von Elektrofahrzeugen beinhaltendes Angebot einen Wertungsbonus zu erhalten, keinen Gebrauch gemacht. Angebote mit entsprechenden Fahrzeugen wurden nicht unterbreitet. Dies kann seine Erklärung darin haben, dass die Wertungsboni von den Bietern nicht als ausreichend angesehen wurden, um die Mehrkosten des Einsatzes von Elektrobussen gegenüber einem Angebot mit konventionellen Fahrzeugen auszugleichen.

Insbesondere aufgrund staatlicher Klimazielverpflichtungen sowie der zunehmenden Verbreitung und Marktreife von E-Bussen ist allerdings zu erwarten, dass Energieeffizienzanforderungen zukünftig eine immer größere Rolle bei der Vergabe von ÖSPV-Dienstleistungen spielen werden.

2.2.2.2. Eigenwirtschaftliche Verkehre

Diese Verkehre werden vom Verkehrsunternehmen allein durch erzielte Beförderungserlöse, Ausgleichsleistungen auf der Grundlage von allgemeiner Vorschriften nach Artikel 3 Absatz 2 und 3 der Verordnung (EG) Nr. 1370/2007 und sonstige Unternehmenserträge im handelsrechtlichen Sinne finanziert. Soweit der Aufgabenträger sicherstellen will, dass das Verkehrsunternehmen Energieeffizienzinvestitionen tätigt, die sich betriebswirtschaftlich nicht amortisieren, ist dies nur möglich, indem der Aufgabenträger entsprechende Anforderungen in seinen Nahverkehrsplan aufnimmt. Dies kann allerdings zur Folge haben, dass sich kein eigenwirtschaftlicher Genehmigungsantragsteller mehr findet, wenn aufgrund der Höhe der zu tätigen Investitionen eine eigenwirtschaftliche Verkehrserbringung nicht mehr möglich ist. Der Aufgabenträger müsste dann gegebenenfalls zunächst auf dem Wege einer Dringlichkeitsvergabe den gewünschten Verkehr bestellen.

2.2.3. Fahrzeugbeschaffung

Nachgelagert zur direkten oder wettbewerblichen Vergabe erfolgt – wenn die Leistung nicht mit Bestandsfahrzeugen erbracht werden kann und darf – die Beschaffung der zur Erbringung der Leistung erforderlichen Fahrzeuge durch den Auftragnehmer. Diese hat in den in Ziff. 2.2.2.1 ge-

²⁰ Zusätzlich wurden Leistungen eines Projektsteuerers für das Gesamtvorhaben wettbewerblich vergeben.

nannten Fällen der Direktvergaben ebenfalls wettbewerblich nach den Regeln des Sektorenvergaberechts zu erfolgen, soweit deren Schwellenwert überschritten wird. Die Energieeffizienzanforderungen sind entsprechend in die Lastenhefte für die Fahrzeugbeschaffung zu übersetzen. Die Gestaltung der Lastenhefte spielt daher eine entscheidende Rolle bei der Umsetzung der Energieeffizienzanforderungen.

3. Energieeffizienzmaßnahmen im ÖSPV

3.1. Methodik der Maßnahmenauswahl und -bewertung

3.1.1. Abgrenzung des Maßnahmenspektrums und Priorisierung

Das Spektrum der zu betrachtenden Energieeffizienzmaßnahmen wurde maßgeblich in Vor-Ort-Gesprächen mit Fachexperten entwickelt. Als Vorbereitung wurden jeweils Informationen und Fragen zu den behandelten Themen erarbeitet, z. B. aus Übersichtspublikationen wie von Kappus et al. (2013), des VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (2013) und des Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) (2010) sowie Dokumentationen zu abgeschlossenen Projekten wie „EcoRailS“²¹.

Bei der BVG fanden insgesamt vier thematisch differenzierte Vor-Ort-Gespräche mit insgesamt 20 Unternehmensvertretern statt. Bei der DVB wurde ein zweitägiges Vor-Ort-Gespräch mit insgesamt sechs Unternehmensvertretern durchgeführt. Bei der KViP fand ein Vor-Ort-Gespräch mit zwei Unternehmensvertretern statt und bei den VB Bachstein ein Vor-Ort-Gespräch mit vier Unternehmensvertretern. Darüber hinaus wurden weitere, meist telefonische, Hintergrundgespräche und schriftlicher Austausch mit vier weiteren Vertretern der Musterunternehmen, vier Vertretern weiterer Verkehrsunternehmen sowie zwei Vertretern von Fahrzeugherstellern durchgeführt.

In zwei Werkstattgesprächen wurden die Erkenntnisse zu konkreten Energieeffizienzmaßnahmen aus den Musterunternehmen mit weiteren Stakeholdern diskutiert:

- Werkstattgespräch zum Themenkomplex „Energieeffizienzmaßnahmen beim Omnibus“ am 22.09.2017
- Werkstattgespräch zum Themenkomplex „Energieeffizienzmaßnahmen bei Straßenbahn, Stadtbahn und U-Bahn“ am 25.10.2017

Eines der Ergebnisse der Diskussion war jeweils die Identifikation und Priorisierung vertiefungswürdiger Energieeffizienzmaßnahmen beim Omnibus. Diese findet sich im Anhang im Abschnitt 6.1.

Seitens des Projektteams wurde aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen eine Liste von 19 konkreten Energieeffizienzmaßnahmen für die engere Betrachtung definiert. Ein Auswahlkriterium war dabei die Prioritätensetzung der beteiligten Experten. Gleichzeitig wurde bei der Auswahl auch das Ziel verfolgt, Maßnahmen für alle Verkehrsmittel und Kategorien (Antrieb, Nebenverbraucher, Betrieb, Infrastruktur) auszuwählen und verschiedene Typen von Verkehrsunternehmen zu adressieren. Zudem sollte hinsichtlich der Kriterien

- Energieeinsparpotenzial,
- Anwendbarkeit,
- technischer Reifegrad
- und Wirtschaftlichkeit

ein breites Spektrum dargestellt werden. Es war also beispielsweise weder Anspruch, nur die betriebswirtschaftlich besonders vorteilhaften Maßnahmen auszuwählen, noch diejenigen mit dem höchsten Förderbedarf, sondern eine ausgewogene Mischung. Dadurch sollten Maßnahmen in die

²¹ S. z. B. Pippert (2011)

engere Betrachtung genommen werden, an denen sich der Einfluss von Rahmenbedingungen (Förderungs- und Ausschreibungspraxis etc.) gut darstellen lässt. Im Kapitel 4 wird gezeigt, dass die betrachteten Maßnahmen das angestrebte breite Spektrum abdecken.

Auch die weiteren Arbeitsschritte wurden durch die Einbindung von Experten und Stakeholdern mittels zweier weiterer Werkstattgespräche begleitet:

- Werkstattgespräch zum Themenkomplex „Finanzierung – Optionen für eine Unterstützung energieeffizienzsteigernder Investitionen“ am 14.12.2017
- Werkstattgespräch zum Themenkomplex „Entwicklung eines Instrumentariums zur Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen“ am 19.02.2018

3.1.2. Betriebswirtschaftliche Bewertung

Für 17 der 19 in die detaillierte Analyse aufgenommenen Energieeffizienzmaßnahmen wurde unter Beteiligung der Musterunternehmen eine Abgrenzung der jeweiligen Maßnahmen aufgrund der heute verfügbaren Technik vorgenommen. Betrachtet wurde also eine sofortige Umsetzung für den Teil des Fuhrparks / der Infrastruktur etc., für den die heute angebotenen Lösungen einsetzbar sind. Fuhrparkerneuerungszyklen wurden hingegen nicht berücksichtigt. So wurde beispielsweise bei der Maßnahme „Batterieelektrischer Bus“ die Umstellung all derer Linien im Bedienungsgebiet des Musterunternehmens betrachtet, auf denen Fahrzeuggrößen eingesetzt werden, die am Markt heute schon auch mit batterieelektrischem Antrieb verfügbar sind und deren Umläufe mit den heute angebotenen Batteriegrößen und der angenommenen Ladeinfrastrukturkonfiguration darstellbar sind. Die auf diesen Linien bisher eingesetzten konventionellen Fahrzeuge werden in dieser Betrachtung unabhängig von ihrem Alter ersetzt. Diese Maßnahmenabgrenzung war auch Grundlage für die im Folgenden erläuterten Bewertungsschritte (3.1.3 und 3.1.4). Abschließend wurde jedoch auch die Anwendbarkeit auf den gesamten ÖSPV in Deutschland abgeschätzt (3.1.5).

Soweit möglich wurden die benötigten Informationen von den Musterunternehmen eingeholt. Im Kern handelte es sich dabei um

- Investitionsvolumen,
- Betriebskosten,
- Energie- bzw. sonstige mit der Maßnahme verbundenen Einsparungen,
- Nutzungsdauer
- und ggf. Restwert am Ende der Nutzungsdauer.

Aus den Rückläufen ergaben sich einige Einschränkungen wegen mangelnder Datenverfügbarkeit bei den Musterunternehmen, aber auch aufgrund von Daten, die aus Wettbewerbsgründen, nicht zur Verfügung gestellt werden konnten. Solche Informationslücken wurden teilweise dadurch gefüllt, dass öffentlich zugängliche Informationen oder auch Herstellerangaben für eine Berechnung herangezogen wurden bzw. auf plausible Annahmen zurückgegriffen wurde. In einigen Fällen konnte auf öffentlich dokumentierte Energieeffizienzprojekte anderer Unternehmen zurückgegriffen werden. Aufgrund der vielfältigen Quellen basieren die Berechnungen auf Werten mit unterschiedlicher Aktualität.

Für die Bewertung ihres betriebswirtschaftlichen Nutzens wurden zunächst für jede Maßnahme die Auswirkungen auf das **Betriebsergebnis** der Musterunternehmen berechnet, indem zunächst die Kosten- und Einsparungseffekte einer heutigen Umsetzung der Einzelmaßnahme kalkuliert und

diese dann, soweit sinnvoll, auf eine Umsetzung im gesamten Unternehmen hochgerechnet wurden.

Die Maßnahmen fallen dabei grundsätzlich in zwei Kategorien:

- Maßnahmen, die vorhandene Lösungen **ersetzen** (etwa Ersatz herkömmlicher Dieselfahrzeuge durch Dieselhybridfahrzeuge)
- Maßnahmen, die vorhandene Lösungen **ergänzen** (etwa Nachrüstung von U-Bahn-Fahrzeugen mit Systemen zur Rückspeisung von rekuperierter Fahrerenergie)

Im letztgenannten Fall wurde geprüft, inwieweit eine Umsetzung der fraglichen Maßnahme für sich genommen als vorteilhaft gelten kann. Im erstgenannten Fall erfolgte eine vergleichende Betrachtung, die die Frage beantwortet, welcher Lösung aus betriebswirtschaftlicher Sicht der Vorzug zu geben ist. Dabei konzentrierte sich die Untersuchung auf die relevanten Unterschiede zwischen den Lösungen. Das heißt, wenn beispielsweise davon ausgegangen werden kann, dass zwei unterschiedliche Fahrzeugkonzepte einen vergleichbaren Reifenverschleiß aufweisen, wurde der Reifenverschleiß im Weiteren nicht mehr betrachtet.

Die Auswirkungen auf das Betriebsergebnis wurden für jede Maßnahme einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, um festzustellen, wie es sich bei Variationen der Energiekosten und der Investitionskosten verändert.

In einem zweiten Schritt wurde eine Berechnung des **Nettobarwertes** vorgenommen. Dabei wurden neben den Kosten und Einsparungen auch die notwendigen Investitionen und die Restwerte der Investitionsgüter berücksichtigt. Die Betrachtung der Nettobarwerte wurde gegenüber einer Betrachtung der Amortisationsdauern vorgezogen, weil die Deckung einer Eingangsinvestition durch laufende Erträge in einer Branche, deren Betriebe vielfach auf öffentliche Zuschüsse angewiesen sind, nicht als gegeben angesehen werden kann. Bei der Berechnung wurde auf die Nutzungsdauer des jeweiligen Investitionsgutes abgestellt. Auch hier wurde wiederum bei Maßnahmen, die vorhandene Lösungen ersetzen, eine vergleichende Betrachtung vorgenommen, also beispielsweise den Investitionen und Restwerten der Maßnahme die Investitionen und Restwerte der herkömmlichen Anlagegüter gegengerechnet. Wiesen zu vergleichende Lösungen unterschiedliche Nutzungsdauern auf, erfolgte zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit dennoch eine Betrachtung über identische Zeiträume (über die Nutzungsdauer der Investitionen der Maßnahme), wobei für die langlebigeren Lösungen ein positiver Restwert einbezogen wird.

Eine dritte Kategorie bildeten solche Maßnahmen, die ohne Anlageninvestition in Anlagegüter durchführbar sind (z. B. Schulungen für energieeffizientes Fahrverhalten). Der Effekt wurde in diesen Fällen auf die Laufzeit eines üblichen Verkehrsvertrags hochgerechnet und ebenfalls mittels Nettobarwert quantifiziert.

Für die Berechnung der Nettobarwerte wurden die Kosten bzw. Einsparungen je nach Kostenart und Nutzungsdauer mit einem entsprechenden Index über die Laufzeit fortgeschrieben und mit einem einheitlichen Kalkulationszinsfuß²² abgezinst, der die allgemeine Kostensteigerung wider-

²² Der Kalkulationszinsfuß wurde auf Basis einer typischen Gewichtung der Kostenarten Personal, Material und Kraftstoff bzw. Fahrerenergie in Verkehrsunternehmen anhand der prognostizierten Entwicklung der Verbraucherpreise für 2017 und 2018 (Sachverständigenrat) ergänzt um die mittlere Preisentwicklung der Jahre 2014-2016 der im folgenden aufgeführten Indizes des Statistischen Bundesamtes ermittelt:

Personalkosten: Statistisches Bundesamt, Fachserie 16 Reihe 2.2, Verdienste und Arbeitskosten, Index der durchschnittlichen Bruttonomatsverdienste der vollzeitbeschäftigten Arbeitnehmer nach Wirtschaftszweigen und Jahren, H49 Landverkehr und Transport in Rohrfernleitungen

spiegelt. Die Restwerte wurden ebenfalls mit dem Kalkulationszinsfuß auf das Ausgangsjahr abgezinst. Die Entwicklung der Energiepreise wurde dem Projektionsbericht 2017 entnommen (Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (BReg) 2017).

Die Einführung innovativer Technologien ist mit Risiken verbunden. So haben sich zum Beispiel Flüssiggas-Busse im Praxiseinsatz als äußerst reparaturanfällig erwiesen. Sofern die Einführung einer neuen Technologie oder auch die Fortführung vorhandener Lösungen aus praktischer Sicht mit besonderen Risiken verbunden ist, wurden diese über angemessene Aufschläge auf die Betriebskosten berücksichtigt.

Betriebswirtschaftlich positiv sind diejenigen Maßnahmen, deren Nettobarwert positiv ist. Die ermittelten Nettobarwerte wurden einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, um festzustellen, wie sie sich verändern bei Variation von

- Energiekosten,
- Kalkulationszins,
- Eingangsinvestition
- und voraussichtlichen Restwerten.

Diejenigen Maßnahmen, deren Nettobarwert negativ ist, sind betriebswirtschaftlich (noch) nicht vorteilhaft. Für diese wurde anschließend geprüft, in welcher Weise die Erlöse steigen müssten, um ein gegenüber dem Status quo unverändertes Betriebsergebnis zu erreichen. Die potenzielle Auswirkung auf das Fahrpreinsniveau wurde dazu am Maßstab der durchschnittlichen Erlöse je Fahrt des jeweiligen Musterunternehmens bewertet, wobei von einer vollständigen Finanzierung der Mehrkosten über Fahrgelderlöse ausgegangen wurde.

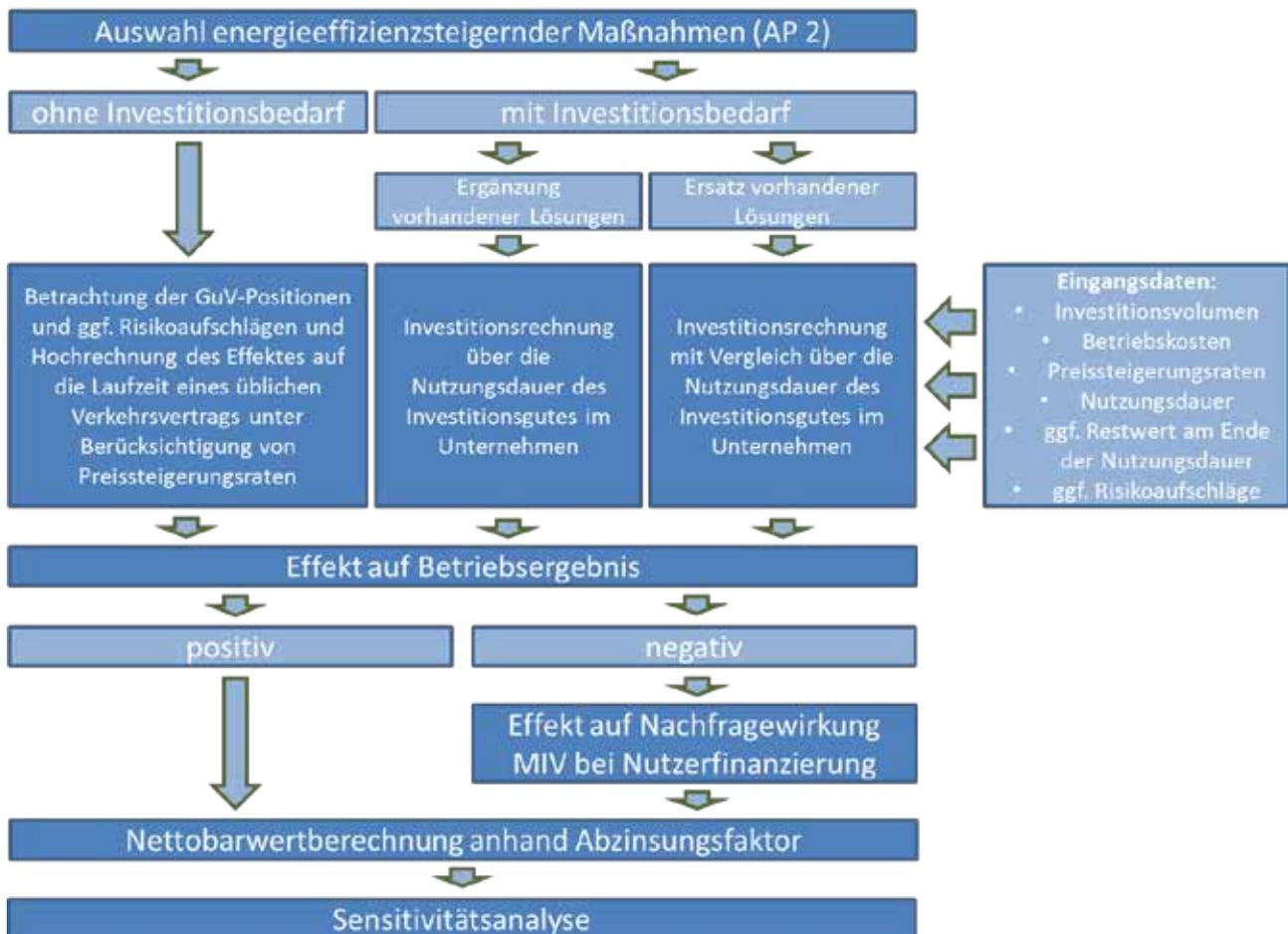
Die sich ergebenden Auswirkungen der erforderlichen Änderungen der Erlössätze je Fahrt auf die Fahrgastnachfrage im lokalen Verkehrsmarkt einschließlich möglicher Abwanderungsbewegungen vom ÖSPV wurden auf Grundlage von Kreuzpreiselastizitäten abgeschätzt. Kreuzpreiselastizitäten geben das Maß an, in dem eine prozentuale Preisveränderung bei einem Verkehrsträger eine prozentual erhöhte Nutzung eines anderen Verkehrsträgers auslöst. Durch ihre Anwendung auf verkehrsträgerspezifische Nachfragedaten erfolgt eine Abschätzung, inwieweit Fahrpreiserhöhungen im ÖSPV eine Steigerung des Verkehrsaufkommens im MIV nach sich ziehen. Elastizitäten haben keine Allgemeingültigkeit, sondern sind von den Rahmenbedingungen vor Ort abhängig. Für die Märkte, auf denen die Musterunternehmen tätig sind, wurden daher Elastizitäten gewählt, die von der Verkehrswissenschaft in möglichst ähnlichen Vergleichsmärkten erhoben wurden. Das Vorgehen ist in Abbildung 3-1 schematisch dargestellt.

Materialkosten Bus: Statistisches Bundesamt, Fachserie 17, Reihe 2, Preise und Preisindizes für gewerbliche Produkte (Erzeugerpreise), GP 29 10 4, [...] Omnibusse [...]

Materialkosten Schiene: Statistisches Bundesamt, Fachserie 17, Reihe 2, Preise und Preisindizes für gewerbliche Produkte (Erzeugerpreise), GP 30 Sonstige Fahrzeuge

Fahrenergie: Statistisches Bundesamt, Fachserie 17, Reihe 2, Preise und Preisindizes für gewerbliche Produkte (Erzeugerpreise), GP 35 11 14/15 Elektrischer Strom, bei Abgabe an Sondervertragskunden

Kraftstoff: Statistisches Bundesamt, Fachserie 17, Reihe 2, Preise und Preisindizes für gewerbliche Produkte (Erzeugerpreise), GP 19 20 26 005 2 Dieselkraftstoff bei Abgabe an Großverbraucher

Abbildung 3-1: Vorgehen bei der betriebswirtschaftlichen Bewertung

Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

3.1.3. Ermittlung der Energieeinsparung

Zur Quantifizierung der durch die Effizienzmaßnahmen erzielten Einsparungen werden die eingesparten Mengen an Diesel, Heizöl und Strom mit Faktoren verknüpft und in MJ ungerechnet. Dabei wird zwischen dem Endenergieverbrauch, welcher auch als Tank-to-Wheel (TTW) bezeichnet wird, und dem Primärenergieverbrauch (Well-to-Wheel, WTW) unterschieden. Der Endenergieverbrauch stellt also ausschließlich die Umwandlung von elektrischer Energie oder Flüssigkraftstoff in die Arbeit von Antrieb und Nebenverbrauchern sowie Verluste im Fahrzeug dar, während der Primärenergieverbrauch auch die Energieverluste in der Kraftstoffvorkette und der Stromerzeugung beinhaltet.

Für die Berechnung des Energieverbrauches werden überwiegend Faktoren aus dem Leitfaden „Berechnung des Energieverbrauches und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV“ (Schmied und Mottschall 2014) und der Norm DIN EN 16258 herangezogen (s. Tabelle 6-5 bis Tabelle 6-8). Diese Norm lässt zwar zu, anstelle des versorgungsgebietsspezifischen Strommixes auch den individuellen Strommix des Energieversorgers heranzuziehen, diese Vorgehensweise ist jedoch im Rahmen dieser Studie nicht sinnvoll. Würde der Norm gefolgt, könnten die Musterunternehmen den Primärenergieverbrauch durch den vollumfänglichen Bezug regenerativer Energien bei gleich-

bleibendem Endendenergieverbrauch deutlich senken. Die Ursache liegt darin, dass bei erneuerbaren Erzeugungsanlagen aus Sonnen- und Windenergie im Gegensatz zu fossilen Erzeugungsanlagen (Kohle, Gas) keine hohen Wirkungsgradverluste durch die Verbrennungsprozesse auftreten.

Für die einzelnen Maßnahmen werden in Abschnitt 3.2 jeweils im Unterkapitel „Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV“ Potenziale zur Energieeffizienzsteigerung quantifiziert. Die diesen Werten zugrundeliegenden Eingangsdaten wurden mit den Musterunternehmen umfassend abgestimmt. Sie können jedoch nur im in diesem Bericht jeweils gewählten Umfang offengelegt werden, da andernfalls Rückschlüsse auf nicht freigegebene Informationen über die Musterunternehmen möglich wären.

Bei der Maßnahme „Batterieelektrischer Bus“ (Kapitel 3.2.2.2) wird zur Verdeutlichung des Effektes ergänzend auch die Primärenergieeinsparung unter vollumfänglichem Einsatz von Windenergie dargestellt.

3.1.4. Gesamtwirtschaftliche Bewertung

In diesem Arbeitsschritt werden Maßnahmen, die aus betriebswirtschaftlicher Perspektive tendenziell nicht amortisationsfähig sind und einen negativen Barwert aufweisen, um eine gesamtwirtschaftliche Bewertung im Sinne einer **Umweltkostenabschätzung** (Verringerung der Umweltkosten durch die jeweilige Maßnahme) ergänzt.

Die Umweltkostenabschätzung ermöglicht einen monetären Ausdruck (eines Teils der) sozialen und ökologischen Folgen für einzelne und die Gesellschaft als Ganzes, die weder von Verkehrsunternehmen noch von den Fahrgästen getragen werden, wie z. B. Gesundheitsschäden, Biodiversitätsverluste, Ernteschäden oder Materialschäden. Die Angabe von Umweltkosten soll dabei helfen, bei Wirtschaft und Gesellschaft das Bewusstsein für Umweltprobleme zu schärfen und diese für politische Entscheidungsprozesse sichtbar zu machen. Unternehmen sollen Risiken besser erkennen, Politikerinnen und Politiker versteckte Kosten und langfristige Folgen ihres Handelns wahrnehmen (Unmüßig et al.).

Weiterhin sollen Umweltkostenabschätzungen die Durchsetzung des Verursacherprinzips durch Bewertung der induzierten Schäden ermöglichen, wenn die Verursacher von negativen Umweltauswirkungen identifiziert werden können. Steuern und Subventionen sind Instrumente für die Internalisierung von Umweltkosten mit dem Ansatz relative Preise zu ändern und Verhaltensänderungen der Wirtschaftssubjekte zu bewirken. Diese marktförmigen Instrumente sollen durch eine (pareto-)effiziente Allokation von Ressourcen zu einem (pareto-)effizienten Management bzw. Governance von Umweltschäden beitragen (Gsell und Wolff in Veröffentlichung).

Bei der Bewertung der Ergebnisse einer Umweltkostenabschätzung sollten jedoch folgende **Einschränkungen** berücksichtigt werden:

- Die Bewertung von Umwelt(-schäden) in Geldeinheiten kann jedoch dazu führen, dass der (scheinbar) eindeutige Geldmaßstab andere gesellschaftliche Wertmaßstäbe (z. B. politische Anliegen von Anwohnerinnen und Anwohnern, Ansprüche zukünftiger Generationen, Forderungen einkommensschwacher Schichten usw.) in politischen Entscheidungsprozessen in den Hintergrund drängt, bzw. alternativlos erscheinen lässt. Indem Wachstums-, Arbeitsplatzeffekte etc. mit dem Verlust von Arten oder Ökosystemleistungen verrechnet werden, werden außerdem nicht-vergleichbare (inkommensurable) Dinge gegeneinander aufgewogen und gegeneinander ausgespielt (Porsch et al. 2015).

- Die Monetarisierung von Umweltkosten stößt immer dann an Grenzen, wenn Entscheidungen unter großen Unsicherheiten und Schadenswahrscheinlichkeiten gefällt werden oder wenn irreversible Naturzerstörungen drohen. Alternativ sollen Obergrenzen (z. B. für Emissionen) dafür sorgen, dass kritische Werte bzw. ökologische Kipp-Punkte nicht überschritten werden.
- Auch kann die Tatsache als problematisch erachtet werden, dass die ökonomische Bewertung in Geldeinheiten grundsätzlich nur am Nutzen für den Menschen interessiert ist (anthropozentrisch, instrumentell), nicht an Eigenwerten der Natur oder an soziokulturellen Aspekten. Weiterhin besteht bei Schadpotenzialen, die erst in der Zukunft wirksam werden, das Problem, wie die zukünftigen Schäden für die Gegenwart bewertet werden sollen (Diskontierungsproblem).

Neben diesen grundsätzlichen Einschränkungen bestehen einige methodische Herausforderungen, die bei der Interpretation der Ergebnisse einer Umweltkostenabschätzung nicht außen vor gelassen werden sollten:

- Aufgrund von getroffenen Annahmen und Vereinfachungen geben die Schätzungen oft nur einen Ausschnitt der tatsächlichen Umweltschäden wieder. Werden Umweltkosten im Rahmen von Nutzen-Kosten-Analysen herangezogen (wie z.B. in Gesetzesfolgenabschätzungen (GFA) vorgeschrieben, oder auch im Bundesverkehrswegeplan vorgesehen) besteht die Gefahr einer systematischen Überbewertung der Kosten, weil sich Nutzen schlechter in Geldeinheiten messen/ bewerten lässt. Dies ist insbesondere für die Umweltpolitik von Nachteil, deren kurzfristige Kosten ihren langfristigen Nutzen (auch in Form vermiedener Folgekosten, z. B. für Sanierungsmaßnahmen) in den Schatten stellen mögen.
- Zudem hat die Wahl der Bewertungsmethodik einen hohen Einfluss auf die Höhe der Kostensätze, aber auch für ihren Anwendungs- und Gültigkeitsbereich. Die zugrundeliegende Methode sollte transparent und nachvollziehbar beschrieben sein, damit die methodischen Herausforderungen bei ihrer Interpretation auch berücksichtigt werden können. Zum Teil sind in dieser Studie zugrunde gelegten Methodenkonvention (s. u.) weder die den Kostensätzen zugrundeliegenden Methoden beschrieben, noch die Art der Umweltkostensätze (z. B. Vermeidungskosten (z.B. Kosten für Filteranlagen usw.) oder Schadenskosten (z. B. für Verringerung, Beseitigung, Ausweichkosten, Verringerung des Ausmaßes usw.) im Detail aufgeführt.
- Es besteht eine hohe Varianz in unterschiedlichen Studien (unterschiedliche Schadensarten, unterschiedliche Annahmen über Dosis-Wirkungsbeziehungen bei der Wirkungsanalyse; teilweise werden Schäden, teilweise Kosten zur Minderung der Umwelteinwirkungen bewertet).
- Weiterhin bestehen hohe methodische Unsicherheiten bei der Bestimmung von Umweltkosten, wenn z. B. Zahlungsbereitschaften mittels sogenannter Proxys (Hilfsvariablen) abgeleitet werden müssen (z. B. Travel Cost Methode für die Bewertung naturräumlicher Funktionen, die durch Verkehrswege zerschnitten werden).
- Durch das Aggregieren einzelner Kostenkomponenten (z. B. Kosten von Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe plus Kosten von Biodiversitätsverlusten durch Umgehungsstraßen) können politische Zielkonflikte ausgeblendet und Entscheidungsprozesse somit behindert werden.
- Internationale Unterschiede in den Umweltkostensätzen durch unterschiedliche Einkommensniveaus können eine Verlagerung der Umweltkosten in Länder mit niedrigeren Einkommen begünstigen sowie dabei gleichzeitig zu einer Verringerung der Umweltkosten und Erhöhung der Schadwirkung und damit zur Verzerrung des Aussagegehalts führen.

Um diesen Einschränkungen im Folgenden gerecht zu werden, wird auf eine direkte **Verrechnung von Kosten aus der betriebswirtschaftlichen Bewertung und der Umweltkostenabschätzung in Form von Salden verzichtet**. Dennoch kann es sinnvoll sein, die Änderung der Umweltkosten

als ein **Bewertungskriterium in einem Vergleich zwischen den Maßnahmen** heranzuziehen. Dies scheint in Anbetracht der Tatsache, dass die Maßnahmen stets ähnliche Schadwirkungen adressieren, vertretbar. Zudem setzt die Umweltkostenabschätzung auf die Methodenkonvention 2.0 (Schwermer 2012) des Umweltbundesamtes (UBA) und damit auf ein anerkanntes und konsistentes Set an Kostensätzen auf, welches Best-Practice-Kostensätze für Luftschadstoffe, Verkehr, Strom- und Wärmeenerzeugung enthält. Die enthaltenen verkehrsbezogenen Kostensätze sind auf die Fahrleistung bezogen und nach Ursache (z. B. Luftschadstoffe, Lärm, Treibhausgasemissionen) und Ortslage (Innerorts, Außerorts, Autobahn) differenziert aufgeführt. Ein Vorteil der Anwendung der Best-Practice-Kostensätze des UBA stellt die große Bandbreite bereitgestellter Kostensätze dar. Die zur Herleitung der Kostensätze verwendete Methodik des UBA ist jedoch nicht immer transparent dargestellt, so dass teilweise unklar bleibt, ob es sich z. B. um Schadenskosten oder Vermeidungskosten handelt. Weiterhin beziehen sich die bereitgestellten Kostensätze auf das Bezugsjahr 2010 und damit nicht auf den aktuellen Fahrzeugbestand und Kraftwerkspark. Dennoch stellt die Methodenkonvention 2.0 (Schwermer 2012) aktuell die umfassendste Grundlage zu Abschätzung dar, weshalb im Rahmen dieses Vorhabens darauf zurückgegriffen wird.

Das Vorgehen zur Abschätzung der Auswirkungen der Maßnahmenumsetzung auf die Umweltkosten im Rahmen dieses Projekts ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

Abbildung 3-2: Vorgehen bei der Umweltkostenabschätzung



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

In einem **ersten Schritt** ist eine Aktualisierung der Best-Practice-Kostensätze für Busse und Pkw erforderlich. Als Datengrundlage für aktuelle Emissionsfaktoren kann auf das TREMOD-Modell des UBA (aktuell in der Version 5.6) zurückgegriffen werden. Aus TREMOD lassen sich die direkten und indirekten spezifischen Treibhausgas- (CH₄, N₂O, CH₄) und Luftschadstoffemissionen errechnen. Diese werden dann mit den Kostensätzen für Luftschadstoffe (s. Anhang, Tabelle 6-2) multipliziert. Die Umweltkostensätze für Abrieb, Lärm, Natur- und Landschaftszerstörung sowie für Bau, Wartung und Entsorgung der Fahrzeuge werden direkt aus der Methodenkonvention übernommen. Unter Berücksichtigung der Preissteigerung²³ ergeben sich so die aktualisierten Kostensätze für

²³ Insgesamt 7,7 % zwischen 2010 (dem Bezugsjahr der Methodenkonvention) und 2016 gemäß Harmonisiertem Verbraucherpreisindex (HVPI)

Busse (s. Tabelle 6-4 im Anhang) und Pkw. Die Aktualisierung der Kostensätze für die Stromerzeugung wird anhand der erzeugungsanlagenspezifischen Bruttostromerzeugung im Jahr 2016 durchgeführt (Kiesel 2017).

In einem **zweiten Schritt** werden die Kostensätze für Pkw und Strom bis zum Jahr 2045 fortgeschrieben. Dabei wird berücksichtigt, dass aufgrund der aktuellen Gesetzgebung und Zielsetzung der Bundesregierung der Anteil von Strom aus erneuerbaren Erzeugungsanlagen im Strommix und der elektrische Fahrleistungsanteil bei den Pkw ansteigen werden, wodurch sich dessen Umweltkosten pro kWh und Fahrzeug-km mit der Zeit verringern. Dafür wird bis zum Jahr 2035 auf die Entwicklung des Kraftwerksparks und elektrische Fahrleistungsanteile aus dem Projektionsbericht 2017 (BReg 2017) im „Mit Maßnahmen-Szenario“ (MMS) zurückgegriffen und bis zum Jahr 2045 extrapoliert (s. Tabelle 6-3 und Tabelle 6-5 im Anhang).

Für die Bewertung des Einsatzes von Bussen mit alternativen Antrieben (Hybrid- und Elektrobusse) ist in einem **dritten Schritt** die Abschätzung von geänderten Kostensätzen erforderlich: Beim Einsatz alternativer Antriebe ergeben sich gegenüber den in der Methodenkonvention angegebenen Kostensätzen Abweichungen durch geringere direkte Emissionen (CO₂, beim Elektrobus auch Luftschadstoffe), veränderte Emissionen in der Kraftstoffvorkette (unter Berücksichtigung eines steigenden Anteils von EE-Strom im Strommix), geringere Lärmemissionen und größere Aufwände bei der Fahrzeugherstellung durch die Fahrzeugbatterieproduktion. Die Abschätzung der zusätzlichen Umweltkosten durch die Herstellung der Traktionsbatterien berücksichtigt nur die damit verbundenen Treibhausgasemissionen, da für weitere Umweltwirkungen keine geeignete Datengrundlage für Kostensätze vorliegt. Die in Ökobilanzen angegebene Spanne für die mit der Batterieproduktion für leichte Nutzfahrzeuge verbundenen Treibhausgasemissionen schwankt zwischen 150 und 200 kg CO₂-Äquivalente pro kWh Batteriekapazität (Romare und Dahllöf 2017). Einem konservativen Ansatz folgend werden im Weiteren 200 kg CO_{2e} / kWh unterstellt.

Im **vierten Schritt** erfolgt die eigentliche Abschätzung der Umweltkostenwirkung der Maßnahmen. Dafür werden die betrieblichen Kennzahlen wie Fahrzeugbestände, Fahrleistungen, Endenergieverbräuche und Nutzungs- bzw. Abschreibungszeiträume aus der betriebswirtschaftlichen Berechnung mit den jeweiligen Umweltkostensätzen verknüpft.

In **einem weiteren Schritt** wird betrachtet, welche Auswirkungen eine vollständige Nutzerfinanzierung der Mehrkosten (Fahrgäste finanzieren die Umsetzung über eine Fahrpreiserhöhung) durch eine Nachfrageänderung und Abwanderungen auf den MIV besitzen würde. Die Herleitung der Nachfrageänderung auf den jeweiligen Linien erfolgt auf Basis von Kreuzpreiselastizitäten (Tabelle 6-1 im Anhang). Die Anzahl der durch die Nachfragewanderungsbewegung aus dem ÖSPV hinzukommenden Pkw-Fahrten wird auf den ÖSPV-Relationen auf Basis des Modal Split der Städte / Regionen, in denen die Musterunternehmen tätig sind (Tabelle 6-6), und der Anzahl an Fahrgästen des jeweiligen Musterunternehmens abgeschätzt. Diese Anzahl an zusätzlichen MIV-Fahrten wird mit der durchschnittlichen Fahrtenlänge in den jeweiligen Musterunternehmen (Tabelle 6-7) und den Pkw-Kostensätzen multipliziert, um die zusätzlichen Umweltkosten im MIV abzuschätzen.

In einem **letzten Schritt** werden diese unterschiedlichen Änderungen der Umweltkosten aufsummiert, um den gesamten Einfluss der Maßnahmenumsetzung abzuschätzen. In diesem Schritt erfolgt eine Abzinsung zukünftiger Umweltkosten(-einsparungen). Dabei wird abweichend von der UBA-Methodenkonvention einheitlich für alle Maßnahmen, also Maßnahmen mit einer Wirkdauer von unter 20 Jahren und darüber (generationenübergreifende Maßnahmen) mit einem einheitlichen Zinssatz von 1,5 % p. a. gerechnet. Diese Abweichung wurde aufgrund des aktuellen niedrigen Zinssatzes auf den Kapitalmärkten getroffen. Zur Verdeutlichung des Einflusses der Abweichung wird eine Sensitivität anhand verschiedener Zinssätze durchgeführt (vgl. Tabelle 6-11).

Das Aufsummieren dient der Veranschaulichung. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist es ggf. erforderlich, die Herkunft der Umweltkostenänderung mit einzubeziehen, insbesondere, wenn inkommensurable Kostenbestandteile gegeneinander aufgerechnet werden (s. o.).

3.1.5. Anwendbarkeit auf den gesamten ÖSPV in Deutschland

In den bisher erläuterten Bewertungsschritten wurde jeweils die Umsetzung der Maßnahme in einem einzelnen Musterunternehmen betrachtet. Ein Kriterium zur Bewertung der Maßnahmen ist jedoch auch, welche Relevanz diese für den gesamten ÖSPV in Deutschland besitzt. Daher wurde abgeschätzt, auf welchen Teil der Verkehrsleistung aller ÖSPV-Unternehmen die jeweilige Maßnahme angewendet werden und die ermittelte Energieeinsparung erzielen kann. Dabei gilt es v. a. die zwei Fragen zu beantworten:

1. Wie ist die Ausgangssituation? Z. B. Maßnahme „Erhöhung der Nennspannung“: In welchem Teil der Verkehrsunternehmen (gewichtet nach geleisteten Personenkilometern) beträgt die Fahrdrachtspannung bisher 600 V, sodass theoretisch eine Erhöhung der Nennspannung auf 750 V in Frage kommt?
2. Welche Rahmenbedingungen erhöhen oder senken das Einsparpotenzial im jeweiligen Bedienungsgebiet und wie sind diese in Deutschland verteilt? Z. B. Maßnahme „Optimierung der Fahrstromverteilung“: Die erzielbare prozentuale Einsparung steigt mit abnehmender Taktfrequenz. Diese Bedingung ist bei kleineren Straßenbahnbetrieben eher gegeben als im großstädtischen Bereich.

Daher wurden bei der Abschätzung der Anwendbarkeit als Zwischenschritt die Anwendbarkeit differenziert für verschiedene Räume abgeschätzt – beim Omnibus für die Innerorts- und Außerorts-Fahrleistung und beim Schienenverkehr für die Größenklassen „Kleinstadt / Mittelstadt“ (unter 100.000 Einwohner), „Großstadt“ sowie „Großstadt >500.000 Einwohner“.

Einige der für diese Abschätzung erforderlichen Informationen sind z. B. in TREMOD, der VDV-Statistik, beim KBA oder in frei im Internet verfügbaren Daten zu finden, z. B. die Anteile bestimmter Größen- und Schadstoffklassen bei Bussen oder die Anzahl unterirdischer Haltestellen bei U- und Stadtbahnen. Andere Zahlen, so etwa der Anteil von Bussen ohne klimatisierten Fahrgastraum oder der Anteil der Straßenbahnfahrzeuge, die bisher auf Freiflächen abgestellt werden und für die die Errichtung einer Abstellhalle in Frage kommen, mussten abgeschätzt werden. Diskutiert wurden die Abschätzungen mit Vertretern der Musterunternehmen, des VDV-Unterausschusses Nachhaltigkeit und Teilnehmern der Werkstattgespräche. Ergänzt wird das Bewertungskriterium „Anwendbarkeit“ um eine Aussage zur Tendenz: Ist eher eine zunehmende oder eine abnehmende Bedeutung der Maßnahme zu erwarten? Eine abnehmende Tendenz ist etwa dann festzustellen, wenn eine Maßnahme explizit die Nachrüstung von Altfahrzeugen betrachtet und bei Neufahrzeugen Stand der Technik ist (s. Maßnahme „Nachrüstung Rückspeisefähigkeit bei Altfahrzeugen“). Eine zunehmende Anwendbarkeit wird z. B. dann erreicht, wenn durch neue Kommunikations- und Datenverarbeitungstechnologien (s. Maßnahme „Systematischer Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung“) zusätzliche Potenziale erschlossen werden können.

3.1.6. Synthese

Eine wichtige Erkenntnis aus der Betrachtung der Einzelmaßnahmen ist, dass Ergebnisse in einzelnen Bewertungsdimensionen, etwa Energieeinsparpotenzial oder betriebswirtschaftliche Bewertung, stark von Charakteristika des jeweiligen Verkehrsunternehmens bzw. Bedienungsgebietes abhängig sind. Eine Zusammenführung von Bewertungskriterien in eine Gesamtbewertung würde

vor diesem Hintergrund zu kurz greifen: Sie würde mögliche, aufgrund bestimmter Rahmenbedingungen besonders positive oder negative Bewertungen in Einzeldimensionen verdecken.

Aus den in Abschnitt 3.1.4 genannten Gründen ist auch eine Verrechnung des betriebswirtschaftlichen Ergebnisses mit der Änderung der Umweltkosten durch die jeweilige Maßnahme nicht zielführend. Auch die Kriterien „Einsparpotenzial“ und „Anwendbarkeit“ für sich sind nicht in der Hinsicht zu verstehen, dass sie ein abgeschlossenes Ranking der Maßnahmen erlauben. Dies würde i. Ü. auch voraussetzen, dass hinsichtlich der möglichen Energieeinsparung die wirksamsten Optionen aus der Gesamtheit möglicher Maßnahmen ausgewählt wurden. Wie in Abschnitt 3.1.1 erläutert, war ein möglichst hohes Einsparpotenzial der einzelnen Maßnahmen aber nicht das alleinige Auswahlkriterium, sodass die hier behandelten Maßnahmen nicht per se als „die wirkmächtigsten Energieeffizienzmaßnahmen“ zu verstehen sind.

Aufgrund dieser Einschränkungen werden in Abschnitt 4 vergleichende Abbildungen und eine Übersichtstabelle der einzelnen Maßnahmen und Bewertungskriterien präsentiert. Sie sollen die Maßnahmenpriorisierung von Beteiligten wie Verkehrsunternehmen, Aufgabenträgern, Fahrzeuganbietern und politischen Entscheidungsträgern unterstützen. Zudem wurden beim Betrachten der einzelnen Maßnahmen auch übergreifende Defizite und Handlungsansätze hinsichtlich der Finanzierung, Förderung und rechtlichen Rahmenbedingungen von Energieeffizienz identifiziert. Diese Erkenntnisse sind in das Kapitel 5 eingeflossen.

3.2. Maßnahmenkatalog

3.2.1. Überblick

In diesem Kapitel werden einzelne Energieeffizienzmaßnahmen erläutert, Ergebnisse der Berechnung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen und der Auswirkungen auf die Umweltkosten dargestellt sowie Vor- und Nachteile diskutiert. Der Prozess der Maßnahmenauswahl und die Bewertungsmethodik sind in Kapitel 3.1 erläutert.

Die Abschnitte 3.2.2 bis 3.2.7 gliedern das Kapitel nach Verkehrsmitteln und Oberthemen. Es werden jeweils zuerst die im Detail betrachteten Maßnahmen dargestellt und als letztes Unterkapitel weitere nicht eingehend untersuchte Energieeffizienzstrategien.

Die Inhalte der jeweiligen Unterabschnitte „Perspektiven und Diskussion“ und „Fazit“ stellen nicht die Bewertung durch die Praxispartner dar. Es handelt sich vielmehr um eine Synthese aus der Betrachtung für das jeweilige Unternehmen, Diskussionen im Rahmen der Vor-Ort-Termine bei allen Praxispartnern, der Werkstattgespräche und weiterer Hintergrundgespräche sowie aus der Literatur.

Basierend auf den in diesem Kapitel behandelten Einzelmaßnahmen werden die Erkenntnisse in Kapitel 4 zusammengefasst und in Kapitel 5 Handlungsempfehlungen ausgearbeitet.

3.2.2. Bus: Antriebstechnik und Fahrwiderstände

3.2.2.1. Dieselhybridbus

Beschreibung der Maßnahme

Beim Hybridantrieb wird der Verbrennungsmotor mit elektrischen Antriebskomponenten kombiniert und kann so im Vergleich zum reinen Verbrennungsmotor vermehrt in leistungseffizienten Lastbe-

reichen arbeiten. Zudem kann durch Rekuperation kinetische Energie bei Bremsvorgängen und im Gefälle zurückgewonnen und als Antriebsenergie wiederverwendet werden. Hierzu wird das Wirkprinzip des Antriebs-Elektromotors in das eines elektrischen Generators umgekehrt. Beide Effekte dämpfen den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs.

Die Betrachtung erfolgte für das Musterunternehmen KViP, das bereits über mehrjährige Praxiserfahrung mit der Technologie verfügt. Rechnerisch wurde dabei nur die Umstellung eines Viertels der Flotte angenommen. Hauptgrund hierfür ist, dass nach Erfahrung des Praxispartners die aktuell am Markt verfügbaren Fahrzeuge die im folgenden Abschnitt genannte Kraftstoffeinsparung nur im Stadtverkehr mit häufigen Anfahr- und Bremsvorgängen erzielen. Zudem beeinträchtigt die bisher geringe Bandbreite der angebotenen Fahrzeugmodelle besonders die Auswahlmöglichkeiten kleinerer Verkehrsunternehmen, die meist auf einen oder wenige Fahrzeughersteller festgelegt sind.

Tabelle 3-1: Steckbrief Maßnahme „Dieselhybridbus“

Kategorie	Antrieb	
Musterunternehmen	KViP	
Verkehrsmittel	Bus	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	5-6 % bis zu 20 %	bezogen auf Gesamtparte; pro Fzg.
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	80 %	bezogen auf die Gesamtfahrleistung der ÖSPV-Busse in Deutschland; steigend wg. kontinuierlicher technischer Weiterentwicklung
Technische Reife / Marktreife	Angebotsdefizite: Serienfahrzeuge bislang nur von wenigen Anbietern	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	-240.000 €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung
Abschätzung Umweltsparung	86.000 €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KWC und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Ähnlich wie die im Pkw-Bereich mittlerweile etablierten (Benzin-)Hybride erzielen (Diesel-)Hybridbusse bei richtiger Konfiguration und Nutzung deutliche Verbrauchsvorteile. Vertreter des Musterunternehmens berichteten von Kraftstoffeinsparungen im Bereich von 15 bis 20 %. Dies entspricht bis zu 10 l/100 km bei einem Solobus im Stadtverkehr. Diese Größenordnung wurde durch Auswertungen eines weiteren Musterunternehmens sowie durch Vertreter von Fahrzeugherstellern und -anwendern in den Expertengesprächen bestätigt. Die Begleitforschung zur Dieselförderung im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (Faltenbacher et al. 2015) identifizierte in manchen Einsatzgebieten Einsparungen von bis zu 25 %, in anderen Verkehrsunternehmen lagen diese jedoch nur im geringen einstelligen Prozentbereich. Ein weiteres beteiligtes Musterunternehmen gab an, in Testeinsätzen keinen messbaren Kraftstoffminderverbrauch gegenüber einem vergleichbaren Dieselfahrzeug erzielt zu haben.

In jedem Fall sind die Einsparungen vom Nutzungs- bzw. Fahrprofil abhängig: Aufgrund der bei einer hohen Zahl von Bremsvorgängen verstärkten Rekuperation sind die Einsparungen innerstädt-

tisch tendenziell höher. Die Musterunternehmen bestätigen zudem die in der Literatur belegte Bedeutung eines auf Verbrauchsoptimierung geschulten Fahrpersonals beim Hybridbus (s. z. B. Harberl et al. 2015). Darüber hinaus sind starke Unterschiede in der Geländehöhe, wegen der möglichen Rekuperation im Gefälle, für den Hybridbus theoretisch vorteilhaft. Jedoch vermeiden Nutzer im Gegenteil eine Nutzung auf solchen Strecken. Die verfügbaren Fahrzeuge seien aufgrund einer nicht adäquat auf das erhöhte Gewicht ausgelegten Motorleistung weniger geeignet für das Anfahren auf Anstiegen und das Bremsen auf Gefällestrrecken.

Durch die Umsetzung der Maßnahmen **im betrachteten Musterunternehmen** ließen sich über die gesamte Nutzungszeit der Hybridbusse rund 423 Tsd. l Dieselkraftstoff einsparen. Dem gegenüber steht ein zusätzlicher Heizölverbrauch von rund 41 Tsd. l aufgrund der geringeren Motorabwärme. Insgesamt ergibt sich eine Einsparung in Höhe von 13,8 TJ (Endenergie) bzw. 17,1 TJ (Primärenergie). Die jährliche Einsparung entspricht rund 5 % des Endenergieverbrauchs im Musterunternehmen.

Da der Anteil der innerstädtisch absolvierten Fahrleistung aber für den **gesamten ÖSPV in Deutschland** deutlich höher liegt als im betrachteten Musterunternehmen, wurde insgesamt eine Anwendbarkeit der Hybridisierung von 80 % angenommen. Unter dieser Annahme ergibt sich ein Gesamtpotenzial in Deutschland von rund 3.600 TJ / a (Endenergieverbrauch) bzw. 4.400 TJ / a (Primärenergieverbrauch). Dies entspricht etwa 16 % des gesamten Energieverbrauchs der Busse im ÖSPV.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Tabelle 3-2 zeigt, dass aktuell mit rund 30 % Anschaffungs-Mehrkosten des Hybridbusses gegenüber einem konventionellen Dieselbus gerechnet werden muss. Eine Amortisation dieser Kosten über die Kraftstoffeinsparung war im hier betrachteten Fall ohne Förderung nicht möglich.

Anschaffungs- und Herstellungskosten (AHK), Restwert nach Nutzungsdauer und Kraftstoffverbrauch wurden auf Basis von Herstellerangaben ermittelt und mit den Erfahrungen der Musterunternehmen abgeglichen. Die Nutzungsdauer der Hybridbusse beträgt 10 Jahre. Über diese Laufzeit wurde ein einmaliger Akkutausch zzgl. Einbau mit 22.000 € einkalkuliert.

Tabelle 3-2: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Hybridbusse“

Ausgaben	Solo- / Gelenkbus		Hinweis
AHK Hybridbus	300.000 / 405.000	€	
AHK Akkutausch	22.000	€	Inkl. Einbau
AHK konv. Fzg.	235.000 / 320.000	€	
Zusätzl. Heizölbedarf	1.670	€/a	1 l/100 km
Anzahl Fahrzeuge	4 / 3	Anzahl	
Restwert Hybridbus	17 %	der AHK	
Restwert konv. Fzg.	14 %	der AHK	
Nutzungsdauer	10	Jahre	
Einnahmen			
Kraftstoffeinsparung	6.000 / 4.000	€/a pro Fahrzeug	Insg. 35.800 €/a

Umfang

Ersatz von 25 % der Busse des MU

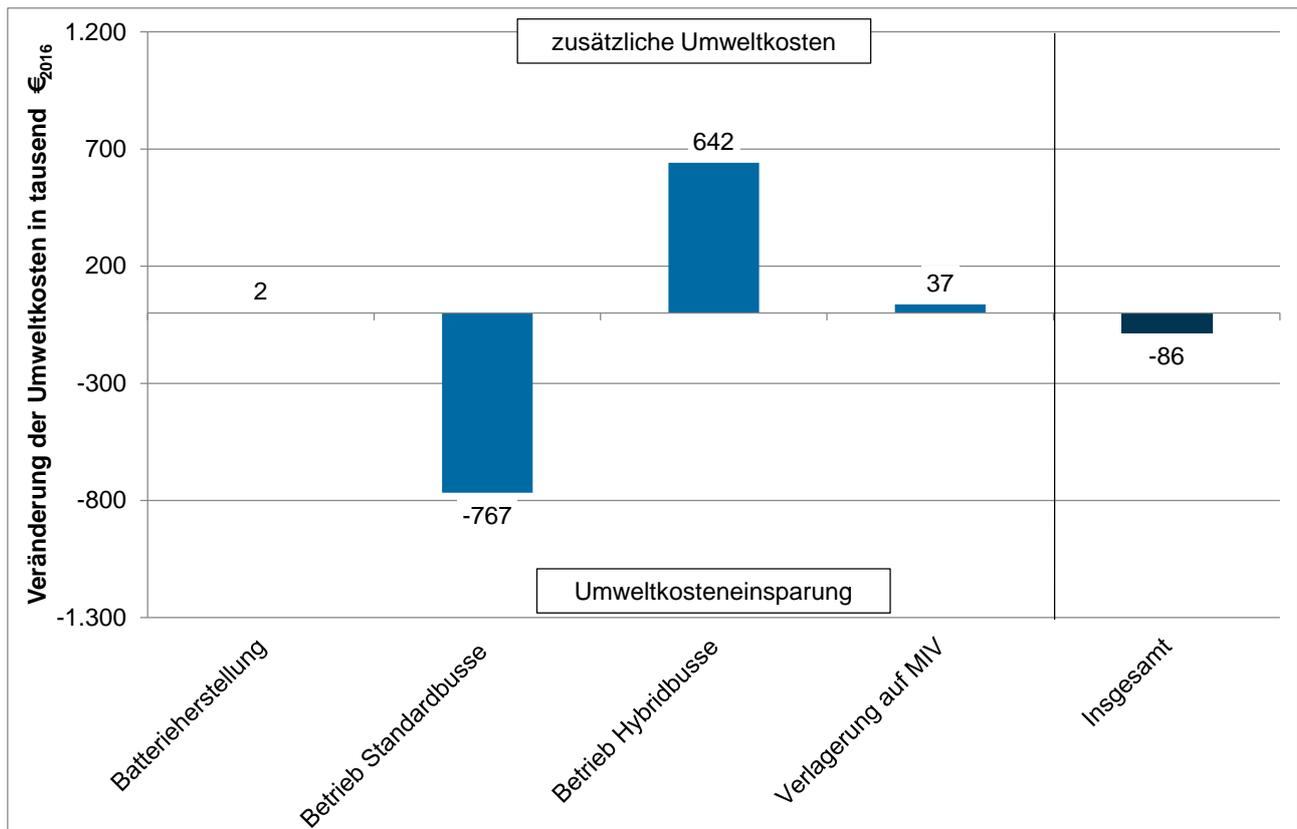
Ergebnis

Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	-87.000	€/a	Im Jahr 2016. Entspricht - 5 %
Barwert über die Nutzungsdauer	-240.000	€	
Hypothetischer Anstieg des Fahrkartenpreises	3,4 %		Bei 100 % Nutzerfinanzierung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Einfluss auf die Umweltkosten

Der Einsatz von Hybridbussen führt im Musterunternehmen zu veränderten Umweltkosten. Insgesamt ergibt die Abschätzung über die gesamte Nutzungszeit eine deutliche Einsparung in Höhe von 86 Tsd. € (s. Abbildung 3-3). Der gegenüber der Nutzung von konventionellen Dieselfahrzeugen verbrauchsärmere Busantrieb führt in der Differenz zu einer Einsparung von 125 Tsd. € an Umweltkosten. Diese Einsparung ist hauptsächlich auf die geringeren Treibhausgasemissionen im Betrieb und die Einsparung von Emissionen aus der Kraftstoffvorkette und nur am Rande auf die abnehmende Lärmbelastung zurückzuführen. Ausgehend von einer vollständigen Nutzerfinanzierung (Erhöhung der Fahrscheinpreise) und einer damit einhergehenden Verlagerung auf den MIV entstehen dort zusätzliche Umweltkosten in Höhe von rund 37 Tsd. €. Die zusätzlichen Umweltkosten der Batterieherstellung der Hybridfahrzeuge fallen lediglich mit rund 2 Tsd. € ins Gewicht.

Abbildung 3-3: Veränderung der Umweltkosten durch den Einsatz von Hybridbussen

Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Durch den Einsatz von Hybridbussen lassen sich im Vergleich zu den anderen betrachteten Maßnahmen bezogen auf die Mehrkosten (negativer Barwert) die größten Umweltkosteneinsparungen erzielen. Den Mehrkosten im Musterunternehmen in Höhe von rund 240 Tsd. € stehen Umweltkosteneinsparungen in Höhe von rund 86 Tsd. € gegenüber.

Perspektiven und Diskussion

In Bussen mit Dieselhybridantrieb kommt, anders als in Fahrzeugen mit Plug-In-Hybridantrieb oder in batterieelektrischen Bussen, als Energieträger rein ein konventioneller Flüssigkraftstoff zum Einsatz. Die Hybridfahrzeuge können nicht extern mit Strom geladen werden. Der Dieselhybrid stellt somit keinen alternativen Antrieb i. e. S. dar, sondern eine Effizienztechnologie am konventionellen Antrieb.

Anders als beim batterieelektrischen Antrieb stellt der Hybrid keine technische Vereinfachung des Antriebsstrangs dar. Daher ergibt sich bei den sonstigen laufenden Kosten nicht automatisch ein Vorteil. Aktuell wird aus der Praxis eher von Mehraufwand und ggf. höheren Pauschalen bei der Wartung sowie einem steigenden Motorölverbrauch berichtet. Hinzu kommt in der Praxis teils ein Heizölmehrbedarf aufgrund der geringeren Motorabwärme. In der betriebswirtschaftlichen Bewertung kann damit gerechnet werden, dass Nutzungsdauer und Fahrzeugrestwerte vergleichbar sind, wenngleich die Wiederverkaufswerte aufgrund der fehlenden Langzeiterfahrungen mit vergleichsweise hohen Unsicherheiten behaftet sind. In jedem Fall ist etwa zur Hälfte der Nutzungsdauer ein Akkutausch einzuplanen. Der Hybridantrieb erfordert in den Werkstätten zum Teil vergleichbare

Kompetenzen (z. B. Hochvolttechnik) und Equipment (z. B. Dacharbeitsplätze) wie der batterieelektrische Antrieb.

Damit bietet er jedoch einen Einstieg in die mit der Elektrifizierung verbundenen Umstellungen und kann so eine Brückentechnologie darstellen.

Angesichts der Kritik an den Fahrzeugen der ersten „Seriengeneration“, so etwa fehlende Eignung für bewegte Topografie aufgrund hohen Fahrzeuggewichts bei gleichzeitig unzureichender Motorisierung, gibt es Signale, dass Fahrzeughersteller künftig eher auf eine kompakte Auslegung des elektrischen Antriebsstrangs setzen – d. h. auf eine möglichst leichte Batterie und eine untergeordnete Rolle der elektrischen Antriebsleistung²⁴. Dadurch ist auch eine Preissenkung zu erwarten.

Fazit

Deutliche Mehrkosten in der Fahrzeuganschaffung gegenüber einem konventionellen Dieselfahrzeug bei in manchen Anwendungsfällen nur geringer Kraftstoffeinsparung, technische Komplexität und eine begrenzte Modellauswahl können für die Verkehrsunternehmen Argumente sein, diesen Antriebstyp zu „überspringen“ und stattdessen konsequent die Umstellung auf eine batterieelektrische Busflotte voranzutreiben. Ein technisch gereifter Hybridantrieb mit gesunkenen Anschaffungskosten dürfte aber durchaus einen berechtigten Platz in der Flotte einnehmen. Insbesondere gilt dies während der Übergangszeit zum rein emissionsfreien Antrieb, solange aus Kostengründen oder aufgrund von nicht realisierbaren Einsatzprofilen noch nicht vollständig auf batterieelektrischen Antrieb umgestellt werden kann. Im Vergleich mit anderen Maßnahmen beim Dieselantrieb, wie etwa Chiptuning, handelt es sich hier um die wohl wirkmächtigste Maßnahme.

3.2.2.2. Batterieelektrischer Bus

Beschreibung der Maßnahme

Die Maßnahme beschreibt den Ersatz eines Teils der konventionellen Linienbusse eines Musterunternehmens durch Fahrzeuge mit rein elektrischem Antrieb, dem die Antriebsenergie vollständig aus einem im Fahrzeug mitgeführten Batteriespeicher zugeführt wird.

Treiber für die momentan auch in Deutschland beschleunigt anlaufende Umstellung der Busflotten auf elektrischen Antrieb ist in vielen Fällen primär die lokale Luftreinhaltung, denn aus dem Antriebsstrang batterieelektrischer Fahrzeuge entstehen keine Luftschadstoffe wie z. B. Stickoxide. Zweites zentrales Argument für die Elektromobilität ist der Klimaschutz. Aber es handelt sich auch um eine Energieeffizienzmaßnahme: Im betrachteten Anwendungsfall ergibt sich hinsichtlich der Endenergie rechnerisch ein Einsparpotenzial von knapp über 50 % gegenüber dem Dieselantrieb. Weil nach wie vor der überwiegende Teil des Stroms im deutschen Netz mit geringem Wirkungsgrad aus fossilen Energieträgern gewonnen wird, ist bisher jedoch hinsichtlich der Primärenergie nur eine geringe Energieeinsparung gegenüber dem Dieselbus festzustellen.

Im betrachteten Anwendungsfall ersetzt das Verkehrsunternehmen zunächst 10 % der konventionellen Solo- und Gelenkbusse auf innerstädtischen Linien mit mittleren täglichen Fahrleistungen und hinreichenden Ladezeitfenstern (kurze Umlaufdauern und nicht zu kurze nächtliche Abstell-dauern). Bei diesen Randbedingungen ist die Eignung batterieelektrischer Fahrzeuge unter den Gesichtspunkten Handlungsbedarf (Luftreinhaltung), Praxistauglichkeit (Reichweite, Ladedauer) und Wirtschaftlichkeit (Auslastung) am höchsten. Da seitens der Fahrzeughersteller hinreichend qualifizierte E-Bus-Angebote derzeit erst entstehen bzw. batterieelektrische Doppelstockbusse für

²⁴ Beispiele sind neue Modelle von EvoBus (Daimler) und Scania, die im Jahr 2018 vorgestellt wurden.

den deutschen Markt bisher noch nicht angeboten werden²⁵, beträgt der ersetzte Anteil in Bezug auf die Gesamtflotte nur 6 %.

Die entscheidende Frage in der Einsatzpraxis ist momentan, ob die in den Fahrzeugen eingesetzten Batterien über ausreichende Reichweiten verfügen, um die Fahrzeugumläufe der bisherigen Dieselmotoren zu realisieren– bzw. ob dies stattdessen mittels Ladeinfrastruktur innerhalb des Bedienungsgebiets oder mittels Umbau des Umlaufplans gewährleistet werden kann. In der Bewertung im Rahmen dieses Projekts wurde ein Konzept mit Depotladen und induktiven Nachladestationen an den Linienendpunkten angenommen. Bei der ebenfalls möglichen Nutzung von Schnellladestationen an Unterwegshaltestellen bestehen bei den verwendeten hohen Ladeleistungen Unsicherheiten bzgl. der Umsetzbarkeit im Straßenraum und der Zyklenfestigkeit der Batterie. Hinzu kommen die schwierigere Durchführbarkeit von Ersatzverkehren und Umleitungen bei Betriebsstörungen sowie Investitionsrisiken, falls steigende Reichweiten in den nächsten Jahren die Ladeinfrastruktur entlang der Linie überflüssig machen sollten. Es ist jedoch zu betonen, dass an dieser Stelle die Frage nach dem zukünftigen Technologiepfad noch nicht beantwortet ist. So wird etwa im Entwurf des Berliner Nahverkehrsplans von 2018 das Nachladen mittels Oberleitungen präferiert.

Auch unter den vergleichsweise günstigen Rahmenbedingungen (keine extrem hohen Tagesfahrleistungen, Auswahl von Linien mit günstigen Zeitfenstern zur Batterieladung) wird in diesem konkreten Einsatzfall noch von einem Fahrzeugmehrbedarf in Höhe von 15 % im Vergleich mit dem Einsatz von Dieselmotoren ausgegangen, da die vorher mit Dieselfahrzeugen absolvierten Fahrzeugumläufe mangels Reichweite nicht vollständig durch E-Fahrzeuge kompensiert werden können. Ob ein Fahrzeugmehrbedarf entsteht und wie groß dieser ggf. ist, hängt im konkreten Einsatzfall von Linienprofil, Ladekonzept, Batteriekapazität und Nebenverbraucherkonfiguration ab.

Tabelle 3-3: Steckbrief Maßnahme „Batterieelektrischer Bus“

Kategorie	Antrieb	
Musterunternehmen	BVG	
Verkehrsmittel	Bus	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	4 %	des Endenergiebedarfs in der jeweiligen Spartes des Musterunternehmens
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	10 %	bezogen auf die Gesamtfahrleistung der ÖSPV-Busse in Deutschland; mit zunehmender Modellverfügbarkeit und technischer Entwicklung stark steigende Anwendbarkeit erwartet
Technische Reife / Marktreife	Für deutschen Markt bisher nur seriennahe und Kleinserienfahrzeuge	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	-53,6 Mio. € -39,8 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung; inkl. Lade- und Werkstattinfrastruktur ohne Lade- und Werkstattinfrastruktur
Abschätzung Umweltkosteneinsparung	4,8 Mio. € (deutscher Strommix)	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

²⁵ Für den britischen Markt besteht hingegen bereits ein größeres Angebot, s. z. B. Werwitzke (2018)

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Durch die Umsetzung der Maßnahmen ergibt sich **im Musterunternehmen** bei einer zwölfjährigen Nutzungsdauer der batterieelektrischen Busse eine Einsparung von 42,8 Mio. Liter Dieselkraftstoff bei einem durchschnittlichen Verbrauch von ca. 57 l/100 km beim Gelenk- und ca. 48 l/100 km beim Standardbus. Die Elektrobusse verbrauchen insgesamt 160 TWh Strom und durch die nicht-elektrische Zusatzheizung 2,4 Mio. Liter Heizöl. Der Endenergiebedarf der Bussparte im Musterunternehmen sinkt damit um 867 TJ bzw. 4 %.

Für die Abschätzung der Primärenergieeinsparung ist der herangezogene Strommix entscheidend. Unter Ansatz des deutschen Kraftwerksparks – beginnend mit 2018, dem Jahr der Fahrzeuginbetriebnahme, und unter Berücksichtigung der Entwicklung im Stromerzeugungssektor über die Fahrzeugnutzungsdauer – ergibt sich für den im Musterunternehmen betrachteten Anwendungsfall eine Primärenergieeinsparung über die Nutzungszeit in Höhe von 473 TJ. Im Strommix sind fossile Erzeugungsanlagen (z. B. Kohle, Erdgas) enthalten, die bei der Verbrennung hohe Umwandlungsverluste verursachen. Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energie weisen diese verbrennungsbedingten Verluste hingegen nicht auf und die Primärenergieeinsparung entspricht fast der Endenergieeinsparung²⁶. Wird bei der Abschätzung hingegen von einem 100 %-igen Regenerativenergieanteil ausgegangen, liegt die Primärenergieeinsparung der Elektrobusse mit 1.191 TJ deutlich höher als bei Ansatz des Strommix. Perspektivisch wird sich die Zurückdrängung der konventionellen Stromproduktion mit ihrem geringen Wirkungsgrad also in Form eines deutlichen Vorteils beim Primärenergieeinsatz niederschlagen.²⁷

Ähnlich wie beim Hybridbus sind die mittels Rekuperation erzielbaren Einsparungen gegenüber dem Dieselmotor umso höher, je häufiger Anfahr- und Bremsvorgänge vorgenommen werden müssen. Dementsprechend gilt dies theoretisch auch für bewegte Topografie (Energierückgewinnung auf Gefällestrecken), wobei dazu bisher keine ausreichenden Vergleichsstudien verfügbar sind. Der relative Mehrverbrauch bei hohen Geschwindigkeiten ist beim elektrischen Antrieb außerdem größer als beim Verbrennungsmotor.

Unter der aus heutiger Sicht getroffenen Annahme, dass mit den verfügbaren und für die jeweiligen Anforderungen geeigneten Fahrzeugen 10 % der Fahrleistung der Busse mit Elektrobusen erbracht werden, ergibt sich für **Deutschland insgesamt** ein Einsparpotenzial von rund 1.174 TJ/a (Endenergieverbrauch), was etwa 5 % des gesamten Energieverbrauchs der Busse im ÖSPV entspricht. Ein exponentielles Wachstum dieses Potenzials in den kommenden Jahren ist jedoch zu erwarten, sofern das Fahrzeugangebot deutlich erweitert wird. Eine entsprechende Marktentwicklung kann auch in Europa in Anbetracht der Tatsache, dass in China mittlerweile der überwiegende Teil der neuzugelassenen Linienbusse über einen elektrischen Antrieb verfügt, als realistisch angesehen werden.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Bei der Erst-Anschaffung muss momentan mit einem etwa doppelten Kaufpreis gegenüber einem Dieselmotor sowie weiteren Ausgaben u. a. für Ladeinfrastruktur und Werkstatteinrichtung gerechnet werden. Die Infrastruktur muss in den meisten Verkehrsunternehmen vollständig neu errichtet

²⁶ Unter Verwendung der Methodik der EN 16258 ohne Bauvorleistung.

²⁷ Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde in dieser Studie nur der Energieaufwand und in der Nutzungsphase berücksichtigt. Es ist zu betonen, dass die Fahrzeuge bei Ansatz von mittleren Annahmen bzgl. der CO₂-Intensität der Zellproduktion in der Treibhausgasbilanz bereits heute tendenziell besser abschneiden als Dieselmotoren, was sich auch auf die Energiebilanz übertragen lässt. Die energieaufwendige Batterieherstellung wird durch Einsparungen in der Nutzungsphase mehr als kompensiert.

werden, während sie für Dieselbusse bereits besteht. Eine betriebswirtschaftliche Unsicherheit stellen zudem die der Akku-Lebensdauer und die damit verbundenen Mehrkosten dar. Diese sind hier über eine Batteriegarantie durch den Hersteller und entsprechende Mehrkosten berücksichtigt. Trotz massiver Einsparungen bei den Energiekosten schneidet der Batteriebus im Kostenvergleich über die Nutzungsdauer schlechter ab als ein Vergleichsfahrzeug mit Dieselmotor. Ursache dafür ist auch der hier angesetzte Fahrzeugmehrbedarf, der jedoch von einigen Verkehrsunternehmen geringer als vom Musterunternehmen eingeschätzt wird.

Zusätzliche von Herstellern in Aussicht gestellte Kosteneinsparungen von etwa einem Drittel gegenüber Dieselfahrzeugen durch die erwartete geringere Wartungsintensität sind im betrachteten Anwendungsfall nicht berücksichtigt, da die empirische Datenbasis noch nicht ausreichend ist.

Tabelle 3-4: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Batterieelektrische Busse“

Ausgaben	Solo- / Gelenkbus		Hinweis
AHK Batterieelektrischer Bus	500.000 / 700.000	€	
AHK Ladeinfrastruktur	1,2 Mio.	€	Pro 4 Fahrzeuge und eine Reserve
AHK konv. Fzg.	280.000 / 330.000	€	
Zusätzl. Heizölbedarf	3,00	€/a	1 l/100 km
Anzahl Fahrzeuge	37 / 47	Anzahl	
Batteriegarantie	7.000	€/a pro Bus	
Restwert konv. Fzg.	21.000 / 30.000	€	
Nutzungsdauer	12	Jahre	
Einnahmen			
Kraftstoffeinsparung	9.000	€/a pro Fahrzeug	
Umfang			
Ersatz von	10 %	der Solo- und Gelenkbusse des MU	
Ergebnis			
Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	-4 Mio.	€/a	
	-3 Mio.	€/a	
Barwert über die Nutzungsdauer	-53,6 Mio. / -39,8 Mio.	€ €	inkl. / ohne Lade- und Werkstattinfrastruktur
Hypothetischer Anstieg des Fahrkartenpreises	0,57 % / 0,44 %		inkl. / ohne Lade- und Werkstattinfrastruktur Bei 100 % Nutzerfinanzierung

Quelle: Öko-Institut, KWC und Praxispartner

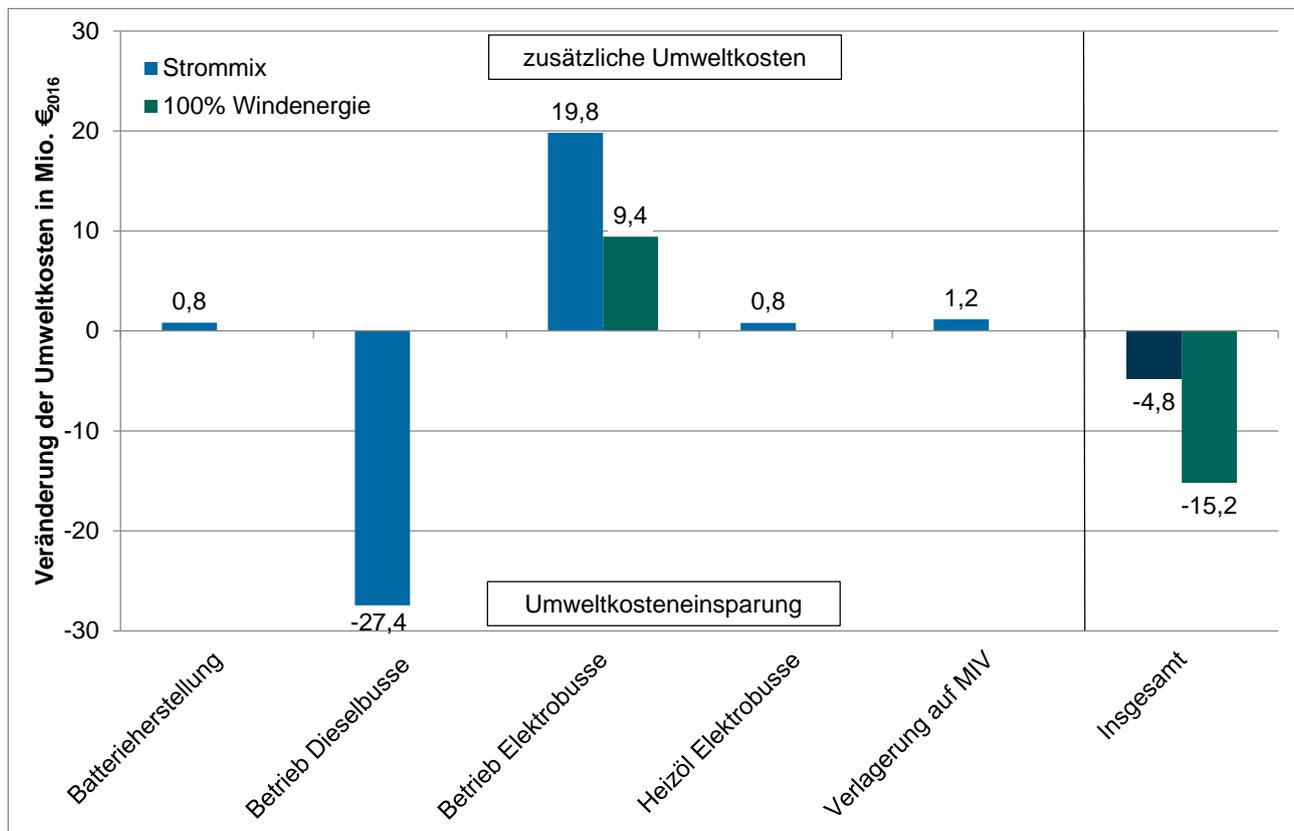
Einfluss auf die Umweltkosten

Der oben beschriebene Einsatz von Elektrobussen würde im Musterunternehmen zu einer Reduktion der verursachten Umweltkosten führen. Die Elektrobusse ersetzen Dieselbusse, weshalb Die-

selkraftstoff und Luftschadstoffemissionen eingespart und dadurch rund 27 Mio. € an Umweltkosten vermieden werden. Auf der anderen Seite entstehen durch die Maßnahme im Musterunternehmen zusätzliche Umweltkosten durch den Stromverbrauch im Betrieb, den Betrieb der Zusatzheizung der E-Busse (rund 1 Mio. €), und die zusätzlichen Aufwendungen bei der Fahrzeugherstellung (rund 1 Mio. €).

Die Umweltkosten im Betrieb hängen stark davon ab, welcher Strommix für die Abschätzung herangezogen wird. Aus Strommarktperspektive ist es sinnvoll, den deutschen Strommix für die Abschätzung heranzuziehen. Wechselt das Musterunternehmen in einen Tarif mit rein erneuerbarem Strom (z.B. 100 % Windenergie), hat dies in der Regel keine Änderung auf den Strommix und damit auf die in Deutschland verursachten Umweltkosten zur Folge. Es tritt vereinfacht ausgedrückt v. a. eine Verschiebung in der Zurechnung der Umweltkosten hin zu einem anderen Verursacher auf. Andererseits eröffnet die Norm EN 16258 die Möglichkeit, die Berechnung der für die Umweltkosten zu einem großen Teil verantwortlichen Treibhausgasemissionen entsprechend des eigenen Strombezuges durchzuführen. Aus diesem Grund sind beide Ergebnisse in Abbildung 3-4 dargestellt. Bei Verwendung des deutschen Strommix, in dem der Anteil an erneuerbar erzeugtem Strom über die Nutzungsdauer weiter zunimmt, verursacht der Betrieb der Elektrobusse Umweltkosten in Höhe von rund 20 Mio. € (s. Abbildung 3-4). Bei Annahme einer vollständigen Nutzerfinanzierung der Mehrkosten des Einsatzes der Elektrobusse kommt es aufgrund der Erhöhung der Fahrpreise zu einer Verkehrsverlagerung auf den MIV. Diese zusätzlichen Pkw-Fahrten sind mit Umweltkosten in Höhe von 1,2 Mio. € verbunden. Bei Verrechnung der positiven und negativen Effekte verringern sich die Umweltkosten durch diese Maßnahme jedoch erheblich um 4,8 Mio. €.

Abbildung 3-4: Veränderung der Umweltkosten durch den Einsatz batterieelektrischer Busse im Musterunternehmen unter Berücksichtigung des deutschen Strommix und Strom aus 100 % Windenergie.



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Perspektiven und Diskussion

Bei den aktuell in Deutschland eingesetzten batterieelektrischen Bussen findet momentan der Übergang von Prototypen zu seriennahen bzw. Kleinserienfahrzeugen statt. Dadurch kommen die nötigen Prozesse der Standardisierung, Kostensenkung und Verbesserung der technischen Parameter in Gang. So werden neue E-Bus-Modelle mittlerweile mit über 300 kWh Batteriekapazität angeboten. Welches Ladekonzept sich durchsetzen wird, ist dabei noch nicht entschieden, wenngleich mittlerweile viele Beteiligte optimistisch sind, dass sich ein großflächiger Aufbau von Ladeinfrastruktur an Haltstellen entlang der Strecke vermeiden lässt, sondern das nächtliche Depotladen (per Stecker) in Kombination mit mehrmals täglichem Nachladen an den Endpunkten (per Induktion oder Pantograf) ausreicht.

Mit dem Hochlauf der Produktionszahlen sind Kostensenkungen und damit auch eine verbesserte Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von batterieelektrischen Bussen aus Sicht der Anwender zu erwarten. Die in Omnibussen eingesetzte Batterietechnologie wird von Fortschritten auf dem deutlich größeren Pkw-Markt profitieren sowie vom beispielsweise in China schon vorhandenen Massenmarkt. Dort hat der Bestand an rein elektrischen Bussen die Marke von 300.000 mittlerweile überschritten²⁸. Sollten die dort ansässigen Hersteller verstärkt auch den deutschen Markt anvisieren

²⁸ Zum Einsatz von elektrischen Bussen in China s. z. B. Shengyang (2017) und Bloomberg New Energy Finance (2018).

und die hier geforderten Spezifikationen anbieten, könnte dies den Anbietermarkt beleben. Die Verkehrsunternehmen stärken derweil mittels Initiativen zur gemeinsamen Beschaffung und Vereinheitlichung von Lastenheften den Markt über die Nachfrageseite. Positive Effekte eines wachsenden Markts für Wirtschaftlichkeit und Umwelt sind nicht nur Skaleneffekte in der Produktion, sondern z. B. auch, dass Batterierecyclinganlagen wirtschaftlich betrieben werden können²⁹.

Es besteht zudem die Hoffnung, dass batterieelektrische Busse aufgrund des geringeren Verschleißes künftig länger genutzt werden können als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, was sich positiv auf Umwelt- und betriebswirtschaftliche Bewertung auswirken würde.

Kontrovers diskutiert wird bisweilen die Frage nach der Anforderung vollständiger Emissionsfreiheit der Fahrzeuge oder möglicher zulässiger Kompromisse. Eine elektrische Reichweite von 200 km ist auch mit heute verfügbaren Fahrzeugen realisierbar, solange übergangsweise eine Innenraumbeheizung mit Flüssigkraftstoff wie Diesel, Heizöl oder Bio-Ethanol in Kauf genommen wird. Bei rein elektrischer Klimatisierung des Innenraums können die Heizung sowie in geringerem Maße auch die Kühlung den monatlichen Verbrauch gegenüber dem verbrauchsschwächsten Monat um etwa 50 % erhöhen und damit die Reichweite entsprechend reduzieren. Die Alternative sind Luft-Wärmepumpen, die sich noch nicht im Serienstadium befinden, aber perspektivisch eine hocheffiziente Lösung für den vollständig emissionsfreien Betrieb darstellen. Da eine verlässliche auskömmliche Reichweite die zentrale Voraussetzung für die Einsetzbarkeit von E-Fahrzeugen darstellt, müssen bei weiteren Nebenverbrauchern wie dem Druckluftsystem noch Fortschritte hinsichtlich der Energieeffizienz erzielt werden.

Fazit

Die Umstellung vom Diesel- auf den batterieelektrischen Antrieb ist die aktuell wohl meistdiskutierte Entwicklung in der Bussparte. Der Nutzen für die Luftqualität liegt auf der Hand und sofern die Bereitstellung zusätzlicher erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten auf den Weg gebracht wird, werden das Klima und die Energieeffizienz in Zukunft noch stärker als heute profitieren.

Die auch im Bussektor angestrebte Wende zugunsten der Elektromobilität scheitert auch im Jahr 2018 immer noch an einem erheblichen Angebotsdefizit v. a. seitens der in Deutschland etablierten Fahrzeughersteller. Hinzu kommt eine vergleichsweise gering ausgeprägte Akzeptanz der Verkehrsbetriebe für Fahrzeuge bislang weniger relevanter Produzenten.

Zudem ist es von zentraler Bedeutung, die erforderlichen Umstellungen auf den Betriebshöfen und im Einsatzkonzept von vornherein mit einzuplanen: Dazu gehören die Errichtung von Dacharbeitsplätzen in den Werkstätten, die Ausbildung des Personals u. a. im Umgang mit Hochvolttechnik, die systematische Abstellung und Einsatzplanung der Fahrzeuge mit verschiedenen Antrieben, die Schaffung der Anschlusskapazitäten im Stromnetz und eines intelligenten Lademanagements, die Integration von Ladezeiten in die Umlaufplanung, die Einbeziehung des Lademanagements in das Umleitungs- und Störungsmanagement sowie die Minimierung der Anfahrwege ins Einsatzgebiet.

Auch große Verkehrsbetriebe in Großstädten und Ballungsräumen stehen hier vielmals noch am Anfang. Jedoch haben mehrere Kommunen, die aufgrund von Grenzwertüberschreitungen bei Stickstoffdioxid zum Handeln verpflichtet sind, bereits umfassende Konzepte für die Elektrifizierung des Busverkehrs aufgestellt. Noch erheblichere Defizite bestehen aber bei mittelständischen, privatwirtschaftlichen Busunternehmen. Sie werden durch relativ gesehen größere Erstinvestitionen, vergleichsweise aufwendige Informationsbeschaffung, mangelnde Teilhabemöglichkeiten bei För-

²⁹ Öko-Institut e.V. 2018

derprogrammen, Risiken bei wettbewerblicher Vergabe und das Restwertrisiko gehemmt. Die Problematik und v. a. der Handlungsbedarf werden in Kapitel 5.2 genauer ausgearbeitet.

3.2.2.3. Chiptuning – Anpassung der Motor- und Getriebesteuerung

Beschreibung der Maßnahme

In Bussen eingesetzte Dieselmotoren ähneln in ihrer Auslegung und Steuerung meist Lkw-Motoren. Beide Anwendungen unterscheiden sich jedoch deutlich hinsichtlich ihrer Geschwindigkeitsprofile: Während Lkw große Entfernungen bei konstanten Geschwindigkeiten von 80 bis 90 km/h auf Autobahnen oder Landstraßen erbringen, legen Linienbusse im Stadtverkehr oft nur etwa 20 Kilometer in der Stunde zurück und absolvieren dabei im Abstand weniger 100 m Anfahr- und Bremsvorgänge aufgrund von Haltestellen, Ampeln und dichtem Verkehr. Daher lassen sich durch eine Anpassung der Motorsteuerung an das individuelle Nutzungsprofil des Busses Verbrauchsvorteile erzielen. Hinzu kommt als potenzieller Vorteil, dass das Einsatzprofil eines Busses im Linienverkehr sehr klar definiert ist – wobei betont werden muss, dass die Verkehrsunternehmen die Fahrzeuge meist nicht linienspezifisch einsetzen, sondern diese nach Bedarf „verschieben“.

Das sogenannte „Chiptuning“ oder auch „Eco-Tuning“ kann durch den Nutzer, also Techniker des Verkehrsunternehmens selbst, erfolgen. Meist werden jedoch spezialisierte externe Dienstleister eingesetzt. Die teilnehmenden Musterunternehmen haben mit dem Chiptuning sowohl bei neuen als auch bei gebraucht erworbenen Fahrzeugen Erfahrungen gemacht. Grundsätzlich kann durch Chiptuning die Leistung gehoben oder gesenkt werden. Eine verwandte Maßnahme ist die Änderung der Getriebesteuerung.

Diese Maßnahme dient meist dem primären, aber nicht unbedingt ausschließlichen Ziel eines minimierten Kraftstoffverbrauchs. Chiptuning begrenzt das Drehmoment, zudem werden Einspritzmenge und Förderbeginn optimiert.

Die Anwender im Projekt vertraten unterschiedliche Standpunkte hinsichtlich der Frage, bei welchen Fahrzeuggenerationen durch Chiptuning Kraftstoffeinsparungen ohne ungewollte Nebeneffekte, z. B. in Bezug auf Schadstoffemissionen und Fahrverhalten, erreicht werden können. Für das betrachtete Musterunternehmen wurde betrachtet, dass nur die älteren Fahrzeuggenerationen Euro II bis Euro V umgesetzt wird und nicht für die Euro-VI-Neufahrzeuge.

Tabelle 3-5: Steckbrief Maßnahme „Chiptuning“

Kategorie	Investiv Ergänzung	
Musterunternehmen	KViP	
Verkehrsmittel	Bus	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	6 %	des Endenergiebedarfs in der jeweiligen Sparte des Musterunternehmens
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	60 %	Bezogen auf die Fahrleistung der Busse mit Abgasstandard Euro-II bis Euro V
Technische Reife / Marktreife	Am Markt; Unsicherheiten wegen Gewährleistungsfragen und in Bezug auf neue Fahrzeuggenerationen	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	430.000 €	Im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Durch die Umsetzung der Maßnahme lassen sich **im Musterunternehmen** in der gesamten Nutzungszeit rund 680 Tsd. l Dieselkraftstoff einsparen. Dies entspricht einer Einsparung in Höhe von 24 TJ (Endenergie) bzw. 30 TJ (Primärenergie).

Für die Abschätzung des **Gesamtpotenzials im ÖSPV in Deutschland** wird angenommen, dass das Chiptuning sinnvoll bei 60 % der Busse mit den Abgasstandards Euro-II bis Euro V angewendet werden kann. Das abgeschätzte Gesamtpotenzial in Deutschland beträgt mit rund 430 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 530 TJ/a (Primärenergieverbrauch) etwa 2 % des gesamten Energieverbrauchs der Busse im ÖSPV.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Im betrachteten Anwendungsfall fielen Systemkosten von wenigen Tausend Euro pro Fahrzeug an.

Der Nachweis der Einsparungen erfolgt i. d. R. durch den Anbieter, der garantiert, dass bei Nichterreichen der erzielten Einsparung die Fahrzeuge in den Ausgangszustand zurückversetzt und die Kosten erstattet werden. Bei einem anderen Musterunternehmen trat dieser Fall ein, da keine ausreichenden Einspareffekte erreicht wurden. Im hier betrachteten Verkehrsunternehmen konnte der Dieselkraftstoffverbrauch jedoch um 8 % gesenkt werden. Ein unabhängiger Nachweis in der Praxis ist schwierig, jedoch wurde die Größenordnung der Einsparung – auch dauerhaft – grundsätzlich bestätigt.

Tabelle 3-6: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Chiptuning“

Ausgaben	Solo- / Gelenkbus		Hinweis
AHK Chiptuning	3.000	€	
Anzahl Fahrzeuge	15 / 13	Anzahl	
Nutzungsdauer	14	Jahre	(Gesamtnutzungsdauer)
Einnahmen			
Kraftstoffeinsparung	1700 / 1200	€/a pro Fahrzeug	
Umfang			
Umsetzung bei	88 %	% der Busse des MU	
Ergebnis			
Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	35.000	€/a	
Barwert über die Nutzungsdauer	430.000	€	

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Perspektiven und Diskussion

Über die Kraftstoffeinsparung hinaus werben die Anbieter mit weiteren Vorteilen wie geringerem Verschleiß, geringeren Schadstoffemissionen und weniger Schaltvorgängen. Praxispartner und Teilnehmende der Werkstattgespräche kritisierten im Rahmen des Projekts jedoch im Gegenteil ungewollte Nebeneffekte wie Schwingungen im Fahrgastraum oder mangelndes Beschleunigungsvermögen der chipgetunten Fahrzeuge.

Zudem hegen potenzielle Anwender Bedenken hinsichtlich der Gewährleistung, auch wenn diese durch die Anbieter relativiert werden. Diese übernehmen im Zuge der Umrüstung auch die nötige Neuzertifizierung der Fahrzeuge in Hinblick auf die Schadstoffgrenzwerte.

Fazit

Angesichts der kontroversen Diskussion dieser Maßnahme im Kontext des Projekts kann keine einhellige Empfehlung für die Modifikation der Motorsteuerung oder Getriebesteuerung für alle Fahrzeuggenerationen und Einsatzzwecke ausgesprochen werden. Die Verkehrsunternehmen sollten, schon wegen der möglichen Kostenersparnis, diese und ähnliche Maßnahmen im Blick behalten. In vielen Fällen kann ein sehr gutes Zahlenverhältnis zwischen Investition und Einsparung erreicht werden. Inwieweit das auch schon für Fahrzeuge der Schadstoffklasse Euro VI gilt, muss jedoch in Frage gestellt werden.

Diese Tatsache kann auch als Hinweis an die Fahrzeughersteller – die der Maßnahme meist kritisch gegenüberstehen – aufgefasst werden: Eine auf das jeweilige Einsatzprofil zugeschnittene hard- und softwareseitige Konfiguration des Antriebs kann für die Kunden große Vorteile aufweisen – umso mehr, wenn Fahrzeuge stärker als bisher linienspezifisch eingesetzt werden. Über das Chiptuning, das rein den verbrennungsmotorischen Antrieb adressiert, hinaus werden sich ähnliche Einsparpotenziale beim elektrischen Antrieb voraussichtlich auch zukünftig ergeben. Durch die in dieses Projekt eingebundenen Experten wird einhellig konstatiert, dass diese Potenziale im relativ kleinen Omnibusmarkt nicht ausreichend ausgeschöpft werden. Wichtig ist angesichts dessen eine enge Zusammenarbeit zwischen Fahrzeugherstellern und -anwendern.

3.2.2.4. Weitere Maßnahmen

Beim Dieselmotor beginnt das Thema Energieeffizienz mit der Wahl der für den Einsatzort **optimierten Leistungsauslegung und des geeigneten Getriebes**. Der Hubraum der angebotenen Fahrzeugmodelle variiert erheblich: So setzt beispielsweise der Praxispartner KViP Solobusse mit 12.000 cm³ Hubraum, aber auch solche mit unter 5.000 m³. Die am Projekt teilnehmenden Praxispartner berichteten übereinstimmend von geringeren Verbräuchen beim Einsatz von Motoren mit *größerem* Hubraum bei ansonsten gleichen Fahrzeugeigenschaften aufgrund des Fahrens in geeigneteren Lastbereichen. Eine Senkung des Dieserverbrauchs in der Größenordnung von ca. 1 l/100 km wurde zudem beim Einsatz eines 6-stufigen anstelle eines 4-stufigen Getriebes beobachtet. Es werden dabei jedoch Konflikte mit den konkurrierenden Zielen der Minimierung des Schadstoffausstoßes und der Langlebigkeit des Getriebes sowie eine Abhängigkeit von den Charakteristika des Bedienungsgebiets (Verkehrsdichte, Höhenprofil, Haltestellenabstände) gesehen. Eine größere herstellerseitige Auswahl verschiedener Motorisierungsvarianten würde es ermöglichen, individuellere Lösungen zu finden. Dagegen spricht aus Sicht mancher Vertreter von Verkehrsbetrieben, dass eine weitgehende Standardisierung auf ein bis zwei Motortypen zu geringeren Preisen führen müsste.

Durch die Wahl von **Leichtlauf-Motoröl** werden zwar Verbrauchseinsparungen im Bereich von bis zu 3 % für möglich gehalten, jedoch kann dies zu höherem Verschleiß und häufigeren Ölwechseln

führen. Ohnehin setzen die Fahrzeughersteller (Gewährleistung) und die Regulierung des Feinstaubausstoßes (aschearmes Öl) enge Grenzen.

Ähnliches gilt für einen **erhöhten Reifendruck** zur Verminderung des Rollwiderstands. Diese Maßnahme kann sich im Fernbusbereich und im ländlichen ÖSPV auszahlen, innerstädtisch sind die Reifen sehr hohen Beanspruchungen ausgesetzt und maßgeblich ist eher das Interesse an einer langen Nutzungsdauer. Auch das Potenzial von **Leichtlaufreifen** im Stadtverkehr wurde durch Experten im Projekt zurückhaltend eingeschätzt, denn eine verbesserte Energieerhaltung durch geringeren Rollwiderstand geht praktisch immer mit einem Sicherheitsverlust aufgrund längerer Bremswege einher. Da ein großer Teil der Fahrleistung mit Bussen im innerstädtischen Bereich und somit bei geringen Geschwindigkeiten stattfindet, spielte auch die Verbesserung der **Aerodynamik** in den Diskussionen praktisch keine Rolle.

Die Alternativen zum batterieelektrischen Bus werden derzeit relativ wenig diskutiert. Die beteiligten Praxispartner haben die **Wasserstoff-Brennstoffzelle** in geringem Umfang erprobt. Zudem wurden einzelne Fahrzeuge mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor nach Ablauf der öffentlichen Förderung aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit und gegenwärtig nicht gegebener Zukunftsperspektiven außer Betrieb genommen.

Da beim Brennstoffzellenantrieb die Grenzkosten größerer Reichweiten prinzipiell geringer sind als beim batterieelektrischen Antrieb³⁰, könnte er als Energieträger in bestimmten Anwendungsnischen mittelfristig durchaus eine Rolle spielen. Auch bei der Wasserstofftechnologie wird jedoch als ein zentrales Entwicklungshemmnis neben den (gegenüber dem batterieelektrischen Antrieb noch höheren) Kosten ein Angebotsdefizit festgestellt, v. a. seitens der einheimischen Anbieter³¹. Im Jahr 2018 fanden eine größere Ausschreibung von 40 Wasserstofffahrzeugen³² der Verkehrsbetriebe in Köln und Wuppertal sowie mehrere kleinere Ausschreibungen statt. Aus umweltbilanzieller Perspektive stellt sich die Frage nach der Herkunft des Wasserstoffs: in Wuppertal wurde die Wasserstoffproduktion mit Strom aus einer städtischen Müllverbrennungsanlage konzipiert. Ansonsten ist eine zukünftige Bereitstellung aus überschüssigen erneuerbaren Energien fragwürdig, da sich teure Elektrolyseanlagen wirtschaftlich eher bei einem Dauerbetrieb lohnen werden. Darüber hinaus ist im Vergleich zur direkten Stromnutzung durch Batteriebusse aufgrund der hohen Verluste in der Wasserstoffherstellung und in der Brennstoffzelle dauerhaft ein Energieeffizienznachteil zu erwarten. Meist wird die Technologie daher zukünftig als „Beimischung“ in einer zukünftigen E-Bus-Flotte oder als sogenannter „Range Extender“ zur Verlängerung der Reichweite in bestimmten besonders geforderten E-Bussen gesehen.

Eine Besonderheit wird voraussichtlich auch in Zukunft der **Oberleitungsbus** darstellen. In punkto Energieeffizienz besteht gegenüber dem batterieelektrisch betriebenen Fahrzeug der Vorteil, dass keine große Antriebs-, sondern höchstens eine kleinere Pufferbatterie transportiert werden muss und somit das Fahrzeuggewicht prinzipiell niedriger ausfallen könnte. Allerdings führt dieser Vorteil im Vergleich nicht zu günstigeren Fahrzeugpreisen. Dies ist nicht nur in den geringen produzierten Stückzahlen begründet, sondern auch in der gegenüber einem Diesibus deutlich massiveren Karosserie, die zum Tragen der Hochspannungstechnik erforderlich ist. In Städten mit bestehendem Oberleitungssystem ist ein Weiterbetrieb des energieeffizienten und lokal emissionsfreien Systems aber unbedingt zu empfehlen. In Einzelfällen kann auch die Neu- oder Wiedereinführung des

³⁰ Eine höhere Reichweite erfordert bei der Auslegung des Fahrzeugs nur eine Vergrößerung des Drucktanks zur Wasserstoffspeicherung im Fahrzeug, nicht aber des wesentlichen Kostentreibers, der Brennstoffzelle. Beim batterieelektrischen Antrieb muss hingegen die Batteriekapazität, der größte Kostenblock, erhöht werden.

³¹ Wetzel 2018

³² Wagner 2018

Oberleitungsbussystems in Frage kommen – wenn die Situation im Straßenraum und die Akzeptanz der Bevölkerung die Errichtung der neuen Oberleitungsinfrastruktur erlauben und gleichzeitig der Aufbau eines Straßenbahnsystems abgelehnt wird. Interessant sind zudem kombinierte Systeme – batterieelektrische Fahrzeuge können die Oberleitung zum Zwischenladen der Batterie nutzen und umgekehrt überbrücken Trolleybusse interne Batteriespeicher, so dass an schwierigen Streckenabschnitten, v. a. auch an Kreuzungen, auf die Oberleitung verzichtet werden kann.

Ein Nachteil von Oberleitungsbussen, wie auch von Batteriebusen, die tagsüber auf Zwischenladung angewiesen sind, ist die geringere Flexibilität hinsichtlich der Einsatzstrecken. Wenn es im jeweiligen Bedienungsgebiet dauerhaft Umläufe gibt, die zu lang für eine reine Übernachtladung sind, braucht es Ersatzlösungen für den Fall, dass Ladestationen aufgrund technischer Probleme oder wegen Streckensperrungen nicht erreichbar sind. Dies könnte das Anwendungsfeld für **Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge** bzw. Batteriebusse mit sogenanntem **Range-Extender**, also einem zusätzlichen Verbrennungsmotor (oder auch einer Brennstoffzelle) sein. Diese könnten auch im Regelbetrieb auf den längsten Umläufen eingesetzt werden, um z. B. in Kälteperioden das Reichweitenrisiko zu minimieren.

3.2.2.5. Exkurs: Minderung der NO_x-Emissionen

In vielen Städten werden Grenzwerte für Stickstoffoxide (NO_x) überschritten, besonders häufig kommt dies an viel befahrenen Straßen vor. Insbesondere für Kinder, ältere und kranke Menschen stellt dies eine Gesundheitsgefahr dar³³. Es ist wahrscheinlich, dass zukünftig aufgrund dieser Überschreitungen in weiteren Städten Fahrverbote für Dieselfahrzeuge verhängt werden. Obwohl Diesel-Pkw Hauptverursacher der verkehrsbedingten NO_x-Emissionen in den meisten Kommunen sind, steigt auch der Handlungsdruck auf den ÖSPV, die NO_x-Emissionen der Busse weiter zu senken.

Möglichkeiten zur Minderung bestehen im Austausch älterer Fahrzeuge durch EURO VI-Busse, die im realen Einsatz wesentlich geringere Emissionen verursachen als frühere Fahrzeuggenerationen, und durch die Nachrüstungen von Abgasbehandlungssystemen im Busbestand. Mit 0,2 bis 0,4 g NO_x/km pro Kilometer liegen sie unter den mittleren Emissionen von Euro 6-Diesel-Pkw in Höhe von rund 0,5 g/km. Eine weitere Möglichkeit liegt in der Flottenumstellung auf Elektrobusse (vgl. Kapitel 3.2.2.2), wobei berücksichtigt werden muss, dass der Betrieb von Zusatzheizungen zu NO_x-Emissionen führt. Diese Emissionen sind nicht durch bestehende Gesetzesvorschriften für limitierte Schadstoffe abgedeckt. Sofern Ausschreibungen von Fahrzeugen bzw. Verkehrsleistungen eine solche Zusatzheizung erlauben, sollten deshalb Obergrenzen für die NO_x-Emissionen festgelegt werden.

Bei der Nachrüstung mit einem System zur Abgasnachbehandlung handelt es sich nicht um eine Energieeffizienzmaßnahme. Da die NO_x-Problematik aktuell jedoch zu den wesentlichen Treibern gehört, wird an dieser Stelle (Tabelle 3-7) als Exkurs eine vergleichbare Abschätzung der Kosten sowie des Einflusses auf den Energieverbrauch und die Umweltkosten am Beispiel eines Solobusses dargestellt

Tabelle 3-7: Bewertung „Nachrüstung SCR-System“

Ausgaben

Hinweis

³³ Einen Überblick über gesundheitliche Folgen besonders vulnerabler Bevölkerungsgruppen sowie Mortalitätszahlen aufgrund von NO_x und anderen Luftschadstoffen bietet beispielsweise der jährliche Bericht „Air quality in Europe“ der EEA (European Environment Agency (EEA) 2016).

AHK SCR-System	20.000	€ pro Fahrzeug	Incl. Einbau
Zusätzl. Kraftstoffverbrauch	1 %		
Verbrauch von Harnstofflösung	5 %		Bezogen auf Kraftstoffverbrauch
Ergebnis			
Barwert	-22.000	€	Nutzungsdauer 3 Jahre bzw. 180.000 km
Abschätzung Umweltkosteneinsparung			Nutzungsdauer 3 Jahre bzw. 180.000 km
Euro III - Solobus	32.000		
Euro IV - Solobus	21.000		
EURO V - Solobus	17.000		

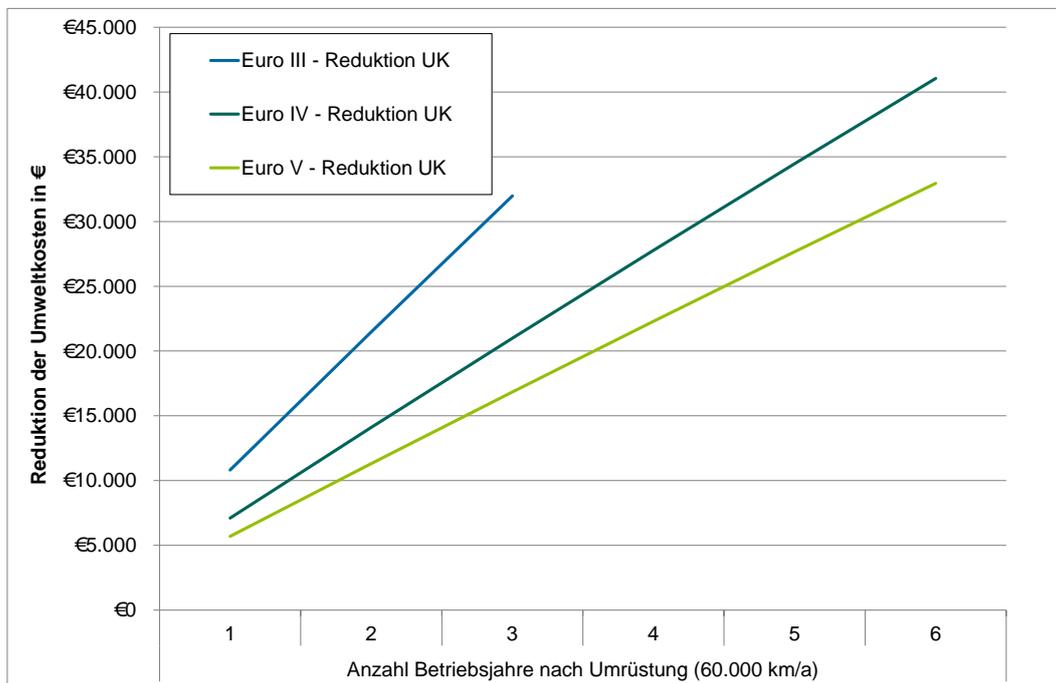
Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Gängig sind Systeme zur selektiven Katalytischen Reduktion (SCR). Die Kosten für diese Nachrüstung liegen etwa bei 20 Tsd. €. Aktuell wird die Nachrüstung durch das BMVI im Rahmen des „Sofortprogramm Saubere Luft 2017 bis 2020“ gefördert (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)). Neben den Kosten für Anschaffung und Einbau des Systems fallen in der weiteren Nutzungszeit der Busse nicht geförderte Zusatzkosten für die Verkehrsunternehmen durch einen leicht höheren Kraftstoffverbrauch und den Verbrauch von Harnstofflösung („Ad Blue“) an.

Der zusätzliche Kraftstoffverbrauch bei einer Nutzung der umgerüsteten Busse von drei Jahren beträgt etwa 750 l. Dies entspricht einem zusätzlichen Energieverbrauch von 27 GJ (Endenergie) bzw. 33 GJ (Primärenergie).

Die Umweltkosten, die sich durch eine Nachrüstung einsparen lassen, sind erheblich. Bei einer weiteren Laufleistung von 180.000 km im Anschluss an die Umrüstung lassen sich die Umweltkosten um rund 17 (Euro V) bis 21 Tsd. € (Euro IV) senken, wenn durch die Umrüstung ein mit Euro VI vergleichbares Niveau der Emissionen erreicht werden kann. Bei Euro III Bussen wäre die Einsparung noch größer. Es ist jedoch fraglich, ob viele dieser Busse, deren Typengenehmigung im Zeitraum zwischen dem Jahr 2000 und 2005 stattgefunden hat, noch eine Fahrleistung von 180.000 km erbringen können.

Abbildung 3-5: Reduktion der Umweltkosten eines Solobusses durch eine SCR-Nachrüstung in Abhängigkeit der Nutzungsdauer und des Abgasstandards



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

3.2.3. Straßenbahn und U-Bahn: Antriebstechnik und Fahrwiderstände

3.2.3.1. Nachrüstung Rückspeisefähigkeit bei Altfahrzeugen

Beschreibung der Maßnahme

In Gleichstromnetzen, wie vor allem bei Straßen- und U-Bahn, kann die bei Bremsvorgängen abgebaute kinetische Energie mit hohem Wirkungsgrad rekuperiert werden. Dadurch wird der Verschleiß an Rädern, Schienen und mechanischem Bremssystem ebenso reduziert wie der Einsatz von Betriebsmitteln. Vor allem aber kann die dabei gewonnene elektrische Energie auf vielfältige Weise wiederverwendet werden: Entweder unmittelbar für den Betrieb der Nebenverbraucher, also z. B. für Licht, Klimatisierung und Fahrgastinformation, oder als Antriebsenergie für andere, im selben Netzabschnitt befindliche Triebfahrzeuge. Alternativ kann sie für die zeitversetzte Nutzung in mobilen oder ortsfesten Systemen zwischengespeichert oder durch rückspeisefähige Unterwerke ins Mittelspannungsnetz zurückgespeist werden.

Alle Anwendungen außerhalb des Fahrzeugs erfordern aber, dass das Fahrzeug technisch überhaupt zur Rückspeisung fähig ist. Bei heutigen Neufahrzeugen ist dies der Standard. Bei Altfahrzeugen kann die Nachrüstung der erforderlichen elektronischen Komponenten und Regeltechnik im Rahmen einer turnusgemäßen Überholung erwogen werden.

Tabelle 3-8: Steckbrief Maßnahme „Nachrüstung Rückspeisefähigkeit“

Kategorie	Investiv Ergänzung	
Musterunternehmen	BVG	
Verkehrsmittel	U-Bahn	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	3 %	des Endenergiebedarfs in der jeweiligen Sparte des Musterunternehmens
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	10 %	Sinkend wegen Flottenerneuerung
Technische Reife / Marktreife	Bei Neufahrzeugen Standard	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	-19,3 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung
Abschätzung Umweltkosteneinsparung	-7 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KWC und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Die Strommenge, die dem Netz entgeht, wenn Fahrzeuge nicht rückspeisefähig sind, kann mehr als ein Drittel des Gesamtbedarfs des Fahrzeugs betragen. Im betrachteten Anwendungsfall hätte die Nachrüstung einer U-Bahn-Fahrzeuggeneration **im Musterunternehmen** in der restlichen Nutzungszeit bei diesen Fahrzeugen 2 %, das sind rund 111 GWh, Fahrstrom eingespart. Dies entspricht einer Einsparung in Höhe von 400 TJ (Endenergie) bzw. 891 TJ (Primärenergie) bzw. 3 % des Energieverbrauchs aller U-Bahnen im Musterunternehmen.

Eine bedeutende Einschränkung ist, dass die erzielbaren Einsparungen wie auch die Kosten stark von der jeweiligen Ausgangslage in den individuell sehr verschiedenen U-Bahn- und Stadtbahn-systemen abhängig sind. Bedeutende Unterschiede liegen bei den in der Flotte vertretenen Fahrzeugalterskohorten, dem technischen Ausrüstungsstandard, dem Überholungsturnus in der Flotte, den Charakteristika der Stromversorgungsinfrastruktur und der Taktichte.

Das abgeschätzte **Gesamtpotenzial in Deutschland** beträgt mit rund 42 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 95 TJ/a (Primärenergieverbrauch) etwa 2 % des gesamten Energieverbrauchs der U-Bahnen. Dabei wird angenommen, dass je nach Verkehrsunternehmen zwischen 8 und 10 % des Fahrzeugbestandes auf Rückspeisefähigkeit umgerüstet werden kann und noch über eine hinreichende Restlaufzeit verfügt.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Bei der hier gewählten Maßnahmenabgrenzung und unter den individuellen Randbedingungen des betrachteten Praxispartners ergab sich, dass sich eine Umsetzung der Maßnahme unter rein betriebswirtschaftlicher Betrachtung über die erwartete Restlaufzeit von 15 Jahren nicht amortisiert. Es wären Kosten in Höhe von mehr als 150.000 € je Fahrzeug entstanden. Die Maßnahme hätte einer komplementären Gegenfinanzierung durch einen Fördermittelgeber i. H. v. ca. 19 Mio. € bedurft. Andernfalls hätte eine Gegenfinanzierung über die Erhöhung der Erlöse durch Fahrkartpreise i. H. v. 0,2 % erfolgen müssen. Aufgrund der fehlenden Amortisationsperspektive wurde die Maßnahme im betrachteten Musterunternehmen nicht durchgeführt.

Tabelle 3-9: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Nachrüstung Rückspeisefähigkeit“

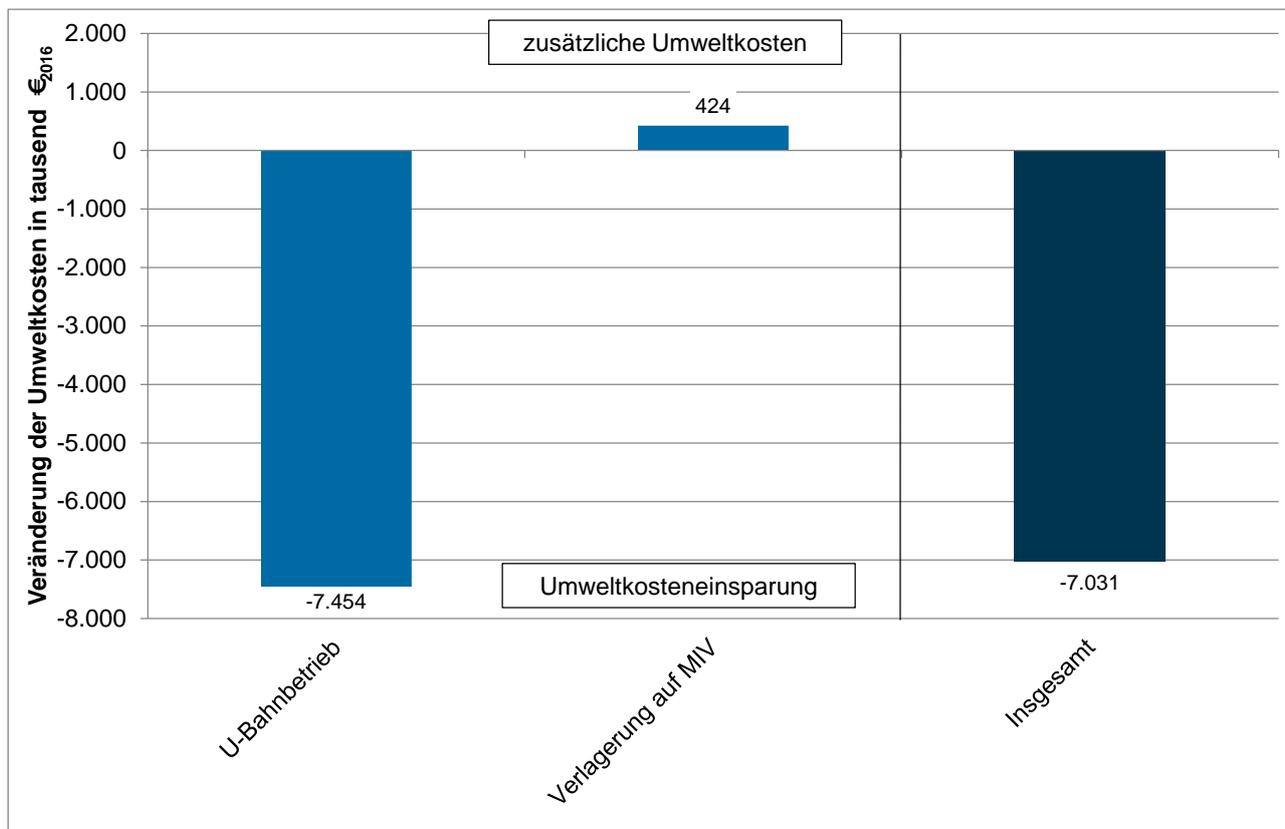
Ausgaben	U-Bahn		Hinweis
AHK U-Bahn	165.000	€	Zusatzkosten für die Nachrüstung der Rückspeisefähigkeit bei der Ertüchtigung
Anzahl der nachrüstbaren Fahrzeuge	182	Anzahl	
Restwert	0 %	der AHK	
Nutzungsdauer	15	Jahre	
Durchschnittsalter der Fahrzeugflotte	27	Jahre	
Einnahmen			
Energiekosteneinsparung	790.000	€	
Umfang			
Ersatz von	14 %	der U-Bahnen des MU	
Ergebnis			
Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	-1,2 Mio.	€/a	
Barwert über die Nutzungsdauer	-19,3 Mio.	€	
Hypothetischer Anstieg des Fahrkartenpreises	0,2 %		Bei 100 % Nutzerfinanzierung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Einfluss auf die Umweltkosten

Die Nachrüstung der Rückspeisefähigkeit der Altfahrzeuge bei den U-Bahnen im Musterunternehmen führt zu einer Verringerung der Umweltkosten. Insgesamt ergibt die Abschätzung über die gesamte Nutzungszeit eine deutliche Einsparung in Höhe von 7,03 Mio. € (s. Abbildung 3-6). Haupttreiber sind die vermiedenen Treibhausgasemissionen durch die Stromeinsparung. Dadurch sinken die Umweltkosten um 7,45 Mio. € in der gesamten Nutzungszeit. Ausgehend von der Annahme einer vollständigen Nutzerfinanzierung (Erhöhung der Fahrscheinpreise) ergibt sich eine Verkehrsverlagerung auf den MIV. Diese zusätzlichen Pkw-Fahrten verursachen zusätzliche Umweltkosten in Höhe von etwa 0,42 Mio. €.

Abbildung 3-6: Veränderung der Umweltkosten durch die Nachrüstung der Rückspeisefähigkeit von U-Bahnfahrzeugen im Bestand des Musterunternehmens



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Perspektiven und Diskussion

Grundsätzlich handelt es sich um ein beträchtliches Einsparpotenzial. Eine eigenwirtschaftliche Amortisation dieser Maßnahme kann jedoch nicht erreicht werden. Sie erscheint auch in anderen Verkehrsunternehmen schwierig, auch wenn die jeweils erzielbare Energieeinsparung und damit auch die erzielbaren Kosteneinsparungen stark von der Ausgangslage und den örtlichen Randbedingungen abhängig sind. Wegen der sukzessiven Erneuerung der Flotten und der bei Neufahrzeugen angesichts des fortgeschrittenen Stands der Technik selbstverständlichen Rückspeisefähigkeit wird diese Maßnahme in dieser Form nur noch wenige Jahre relevant sein.

Fazit

Auch wenn die Relevanz der Rückspeisefähigkeit im Sinne einer Einzelmaßnahme abnimmt: Das Beispiel zeigt, dass eine Nachrüstung sinnvoller und absolut praxisreifer Technologien bei turnusmäßig anstehenden Generalüberholungen aufgrund der hohen Investitionskosten nicht selbstverständlich ist. Wenn Fahrzeuge ohnehin weitgehend „entkernt“ und auch Antriebskomponenten ausgetauscht werden, sollten diese auf einen mit Neufahrzeugen vergleichbaren technischen Standard gebracht werden. Es ist bedenklich, dass sich die Hebung eines so massiven Einsparpotenzials nicht lohnt. Eine finanzielle Förderung der Energieeffizienz sollte daher gerade auch bei auf den aktuellen Stand der Technik gerichteten Nachrüstungen stattfinden. Andernfalls droht der ökologische Vorteil der langen Lebensdauer von Schienenfahrzeugen zu einem Nachteil zu werden.

3.2.3.2. Weitere Maßnahmen

In den Expertengesprächen wurden die Fortschritte, die sich beim Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs sowie beim Rad-Schiene-System noch erzielen lassen, durchgehend als gering bewertet. Unbestritten ist, dass die heute im Bestand befindlichen Fahrzeuge sehr hohe Wirkungsgrade im elektrischen Antriebsstrang haben: Beim Motor liegen sie im Bereich von 98 % und bei Wechselrichtern um 95 %. Effizienztechnologien wie **Choppersteuerung** und **IGBT** (insulated-gate bipolar transistor) sind heute Stand der Technik.³⁴ Bei Technologien, die noch weitere Verbesserungen der Wirkungsgrade ermöglichen könnten, werden zu große Nachteile in der Praxis gesehen. So äußerten die beteiligten Praxispartner beispielsweise für den Einsatz **permanenterregter Synchronmotoren** Bedenken wegen des Zusatzgewichts und der schwierigeren Bergung bei Havarien, da sich die Fahrzeuge mit entsprechendem Antrieb bei Ausfall der Stromversorgung nicht ohne weiteres von außen bewegen lassen. Auch für **radial einstellbare Fahrwerke** herrschte weitgehender Konsens, dass die erzielbaren Einsparungen von ca. 2 % durch Verringerung der Fahrwiderstände mit zu hohen Investitions- und zusätzlichen Instandhaltungskosten verbunden seien. Beim Thema Aerodynamik hat ein Praxispartner durch Ausrolltests festgestellt, dass bei U-Bahnen die **Taschenschiebetüren** älterer Fahrzeuggenerationen den Luftwiderstand stark erhöhen, weil sie die Ebenheit der Fahrzeugaußenwand unterbrechen. Bei Neufahrzeugen sind Außenschiebetüren, die dem Luftwiderstand während der Fahrt eine ebene Oberfläche bieten, Standard. Eine Nachrüstung von Altfahrzeugen mit Außenschiebetüren ist technisch nicht möglich.

3.2.4. Bus, Straßenbahn, U-Bahn: Nebenverbraucher und sonstige Fahrzeugtechnik

3.2.4.1. Verbesserte Innenraumdämmung

Beschreibung der Maßnahme

Bei null Grad Außentemperatur wird für die Heizung einer Straßenbahn ähnlich viel Energie aufgewendet wie für den Antrieb. Im Jahresdurchschnitt kann davon ausgegangen werden, dass mindestens ein Viertel der aus der Oberleitung entnommenen elektrischen Energie für Heizung und Kühlung verwendet wird. Zur Reduktion dieses Heizenergiebedarfs kommen zum einen ähnliche Maßnahmen in Betracht, wie im nachfolgenden Abschnitt 3.2.4.3 für die Klimatisierung diskutiert: Verbesserte Sensorik und bedarfsgerechte Steuerung sowie optimierte Luftführung. Großer Handlungsbedarf wurde jedoch seitens der beteiligten Musterunternehmen und Experten besonders bei der Innenraumdämmung gesehen. Eine konsequente Isolierung senkt sowohl bei geheiztem als auch bei gekühltem Innenraum den Energiebedarf. Insbesondere bei den Schienenfahrzeugen wurde das Thema Dämmung diskutiert. Zwar spielt die Verwendung von Wandmaterialien mit hoher Isolationswirkung bei der Fahrzeugentwicklung eine Rolle, jedoch hat sie nur nachgeordnete Priorität gegenüber Themen wie der Crashesicherheit. Ein konsequent wärmeoptimiertes Fahrzeug würde schon bei der Konzeption des Wagenkastens Wärmebrücken besser vermeiden als heutige Fahrzeuge. Dabei sollte auch ein zweites bisher im Nahverkehr nicht konsequent durchdekliniertes Thema Berücksichtigung finden: die energetische Optimierung der Fensterflächen mittels Doppelverglasung und automatisch abdunkelndem Glas zur Vermeidung übermäßiger Wärmeentwicklung im Sommer.

³⁴ Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode, ein Halbleiterbauelement in der Leistungselektronik

Energieeinsparpotenzial und betriebswirtschaftliche Bewertung

Eine betriebswirtschaftliche Betrachtung konnte bei dieser Maßnahme nicht durchgeführt werden. Es befindet sich momentan im ÖSPV-Bereich kein Fahrzeugmodell auf dem Markt, das auf Wärmedämmung hin optimiert ist und das einem ansonsten vergleichbaren Referenzfahrzeug gegenübergestellt werden könnte.

Perspektiven und Diskussion

Die Erschließung der theoretisch hohen Effizienzpotenziale wird durch mehrere Faktoren gehemmt. Bei der Doppelverglasung gibt es einen Zielkonflikt mit dem dadurch entstehenden Fahrzeugmehrgewicht, das die erforderliche Antriebsenergie steigert. Es besteht die zwingende Herausforderung, die infrastrukturbedingten Maximalachslasten einzuhalten – bei gleichzeitig gewünschter hoher Beförderungskapazität, Mehrgewicht durch zusätzliche Einbauten (Klimaanlagen, Fahrgastinformation etc.) sowie gestiegenen Anforderungen an die Crashesicherheit. Zudem wird das Energieeinsparpotenzial dadurch reduziert, dass v. a. im Stadtverkehr viel Wärme durch die intervallmäßigen Türöffnungsvorgänge verloren geht (s. u.). Sowohl auf der Straße als auch auf der Schiene kommt daher Doppelverglasung bisher fast ausschließlich im Fernverkehr zum Einsatz. Bei der Verwendung wärmedämmender Materialien in den Außenwänden bestehen zudem Einschränkungen aufgrund von Brandschutzvorschriften und das Bestreben, das nutzbare Innenraumvolumen nicht durch größere Wandstärken zu verringern.

Fazit

Die Erforschung und Entwicklung konsequenter Gesamtkonzepte durch Forschung, Wissenschaft und Hersteller bietet bislang nicht gehobene Potentiale: hierzu zählen insbesondere Sonneneinstrahlung, Fensterflächen, Karosserie und Wandmaterialien. Dabei kann möglicherweise aus dem Bereich der Gebäudetechnik oder auch aus den im Schienenfern- und Luftverkehrsbereich eingesetzten Technologien gelernt werden. Erst dann wird die energetische und damit auch monetäre Einsparung verlässlicher quantifizierbar sein.

Um Anreize zur Technologieentwicklung zu geben, kommen zudem erhöhte Fördermittel in Frage. Gleiches gilt für die höhere Gewichtung der realen Wärmedurchgangszahl als Bewertungskriterium in Ausschreibungen, ohne dass dadurch die Einhaltung sonstiger Anforderungen an das Fahrzeug in Frage gestellt werden muss.

3.2.4.2. Verzicht auf Klimatisierung des Fahrgastraums

Beschreibung der Maßnahme

Der Energiebedarf zur Kühlung des Fahrzeuginnenraums lässt sich konstruktionstechnisch am einfachsten vermeiden, wenn auf eine aktive Klimatisierung verzichtet und stattdessen passiv mit einem leistungsfähigen Lüftungssystem gearbeitet wird. Neben den direkten Einsparungen bei warmen Außentemperaturen schlägt sich ganzjährig die Gewichtsreduktion positiv auf den Energieverbrauch nieder.

Konkret wurde hier betrachtet, welche Effekte es hätte, wenn das MU (das vollständig auf klimatisierte Busse und Straßenbahnen setzt) auf 10 % des Ergänzungsnetzes (also bei moderat ausgelasteten Linien) auf Klimatisierung verzichten würde, und zwar dort, wo die Haltestellenabstände gering sind (ca. 400 Meter). Bei diesen Bedingungen hat die fehlende Klimatisierung lediglich geringe Einschränkungen des Fahrgastkomforts.

Tabelle 3-10: Steckbrief Maßnahme „Verzicht auf Klimatisierung“

Kategorie	Investiv Ersatz	
Musterunternehmen	BVG	
Verkehrsmittel	Bus	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	1 %	des Endenergiebedarfs in der jeweiligen Sparte des Musterunternehmens
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	30 %	Wenn nur dort, wo auch Fahrzeuge ohne Klimaanlage betrieben werden
Technische Reife / Marktreife	Serienmäßig verfügbar	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	5,4 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Beim hier primär betrachteten Omnibus lassen sich 12 bis 15 % Kraftstoff einsparen. An Spitzentagen kann die Einsparung sogar fast 50 % betragen. Bei den Praxispartnern sind unklimateisierte Fahrzeuge auch bei der Straßen- und U-Bahn verbreitet, bei denen zusätzlich auch Bordnetzrichter entfallen. Es wird hier eine ähnliche prozentuale Verbrauchseinsparung wie beim Bus erreicht.

Für den hier betrachteten Teilverzicht auf eine Klimatisierung der Busse könnte das Unternehmen in der gesamten Nutzungszeit rund 5,4 Mio. l Dieselkraftstoff einsparen. Dies entspricht einer Einsparung in Höhe von 192 TJ (Endenergie) bzw. 237 TJ (Primärenergie). Die Endenergieeinsparung umfasst 1 % des Verbrauchs der Bus-Sparte **des Musterunternehmens**.

Für die Abschätzung des **Gesamtpotenzials im ÖSPV in Deutschland** wurde der Verzicht auf eine Klimatisierung des Fahrgastraums angesichts möglicher Akzeptanzprobleme nur dort unterstellt, wo bereits heute Fahrzeuge ohne Klimaanlage betrieben werden (etwa 30 % der Fahrzeuge). Insofern stellt die Energieeinsparung einen theoretischen Wert im Sinne einer bewussten Entscheidung, einen zukünftigen Mehrverbrauch durch Klimatisierung bei Neubeschaffung zu vermeiden, dar. Das abgeschätzte Gesamtpotenzial in Deutschland beträgt mit rund 866 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 1.062 TJ/a (Primärenergieverbrauch) etwa 3,8 % des gesamten Energieverbrauchs der Busse im deutschen ÖSPV. Damit wurde ein kleineres Potenzial als durch den Einsatz einer effizienten Klimatisierung abgeschätzt (vgl. 3.2.4.1), obwohl die Einzeleinsparung pro Bus bei einem vollständigen Verzicht größer ausfällt. Grund dafür ist die in der Potenzialabschätzung getroffene Annahme, dass dort, wo heute bereits klimatisierte Busse betrieben werden, aufgrund des Komfortverlusts und der hiermit verbundenen fahrgastseitigen Akzeptanzprobleme nicht ohne weiteres wieder auf Fahrzeuge ohne Klimatisierung zurückgewechselt werden kann.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Die Einsparung bei den Anschaffungs- und Herstellungskosten (AHK) einer Vollklimatisierung wurde auf Basis von Fachveröffentlichungen berechnet. Die Einsparung beim Dieselverbrauch der Busse wurde auf Basis der VDV-Schrift 236 angenommen.

Betriebswirtschaftliche Vorteile ergeben sich nicht nur durch die Energieeinsparung, sondern auch durch eine Kostenreduktion bei Fahrzeuganschaffung, Betriebsmitteleinsatz und Wartung. Für letzteres wurden im Hinblick auf die Ausführungen der VDV-Schrift 236/1 aufgrund des Komponentenverzichts und des einhergehend vereinfachten technischen Aufbaus lediglich 4 Servicestunden pro Jahr plus Material angenommen.

Tabelle 3-11: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Verzicht auf Klimatisierung“

Ausgaben	Solo- / Gelenkbus	Hinweis
AHK Bus ohne Klimatisierung	261.500 / 316.500	€
AHK Bus mit Klimatisierung	275.000 / 330.000	€
Anzahl Fahrzeuge	38 / 42	Anzahl
Restwert (mit Teilklimatisierung)	20.400 / 28.700	€
Restwert (Vollklimatisierung)	21.500 / 29.900	€
Nutzungsdauer	12	Jahre
Einnahmen		
Kraftstoffeinsparung	6.100	€/a pro Fahrzeug
Umfang		
Ersatz von	6 %	% der Busse des MU
Ergebnis		
Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	490.000	€/a
Barwert über die Nutzungsdauer	5,4 Mio.	€

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Perspektiven und Diskussion

Aus der Perspektive der Verkehrsunternehmen bieten Fahrzeuge ohne Klimaanlage viele Vorteile: günstigere Anschaffungskosten, geringerer Einsatz von Energie und Betriebsmitteln, geringere Wartungsintensität. Bei der U-Bahn, deren Tunnelstrecken meist über einen minimalen und damit baukostenoptimierten Querschnitt verfügen, kann eine Klimaanlage zudem nicht auf dem Dach angeordnet werden und reduziert aus diesem Grund das Platzangebot im Innenraum. Bei unterirdischer Streckenführung ist die Außentemperatur ohnehin ausgeglichener, so dass es prinzipiell einfacher ist, eine für die Fahrgäste akzeptable Innenraumtemperatur auch ohne Klimatisierung zu erreichen. Folgerichtig bezeichneten z. B. Vertreter der U-Bahn das Beharren auf unklimateisierte Fahrzeuge als das größte Energieeffizienzpotenzial in ihrer Sparte.

Das bestimmende Thema in der Diskussion ist jedoch die Akzeptanz durch die Fahrgäste. Auf der einen Seite berichtete die DVB – ein Verkehrsunternehmen, das im Straßenbahnbereich auf Kli-

omatisierung verzichtet und damit in Sachen Energieeffizienz Spitzenwerte erzielt – von einer hohen Akzeptanz durch die Fahrgäste.³⁵ Andererseits sollte Energieeffizienz nach Möglichkeit nicht auf Kosten des gebotenen Fahrgastkomforts gehen. Negative Wirkungen auf diesen können in unklimateisierten Fahrzeugen nicht nur durch die Innenraumtemperatur, sondern auch, insbesondere in Tunnelstrecken, durch Lärm und Luftverschmutzung entstehen. Kunden sind es inzwischen im sonstigen Alltag gewöhnt, sich in klimatisierten Räumen und Fahrzeugen, v. a. auch im konkurrierenden Pkw, aufzuhalten. Die Gefahr hitzebedingter Gesundheitsprobleme (Kreislaufbeschwerden, v. a. auch bei älteren und gesundheitlich vorbelasteten Fahrgästen) ist ernst zu nehmen. Der Bedarf, Innenräume zu klimatisieren, ist durch technische Entwicklungen, wie der besseren Dämmung der Fahrzeugaußenhaut, dem verstärkten Einsatz abwärmeentwickelnder Elektronik und der Vergrößerung des Glasflächenanteils, angestiegen. Die Anforderung, klimatisierte Fahrzeuge einzusetzen, hat sich bei Ausschreibungen und Direktvergaben aus diesen Gründen weitgehend durchgesetzt und eine Trendumkehr ist nicht abzusehen – nicht zuletzt auch angesichts der voraussichtlich in den kommenden Jahren fortschreitenden Klimaerwärmung.

Fazit

Durch Verzicht auf Klimatisierung könnte angesichts des vorher Gesagten eines der größten Energieeffizienzpotenziale gehoben werden. Die geringe berechnete Einsparung für den hier betrachteten Einzelfall ist darauf zurückzuführen, dass das Musterunternehmen das mögliche Einsatzspektrum sehr zurückhaltend einschätzte. In anderen Bedienungsgebieten bestehen dagegen geringere Probleme, den Fahrgästen diese Einschränkung zu vermitteln. Der Verzicht auf Klimatisierung scheint hauptsächlich dort denkbar, wo bereits heute unklimateisierte Fahrzeuge genutzt werden. Wo man das Ziel einer Verlagerung von Wegen des MIV auf den ÖSPV gefährdet sieht, sollten im Interesse der Attraktivität im Zweifel stattdessen Effizienzpotenziale bei der Klimaanlage genutzt werden, die im folgenden Abschnitt erläutert werden.

3.2.4.3. Energieeffiziente Klimatisierung

Beschreibung der Maßnahme

Die Optimierung der Energieeffizienz von Klimaanlage kann bei ihrer Dimensionierung, der Anlagen- und Luftführungstechnologie, ihrer intelligenten Steuerung und bei den betrieblichen Vorgaben ansetzen.

Um die Klimatisierung der Fahrzeuge energieeffizienter zu gestalten, sollten die Anlagen hinsichtlich ihrer Kühlleistung nicht über den Bedarf hinaus dimensioniert und betrieben werden. Beim Omnibus bedeutet dies eine Abkehr von der „klassischen“ Vollklimaanlage, bei der der Kompressor mechanisch mit dem Motor gekoppelt ist, hin zu elektrischen Aufdach-Geräten. Alle weiteren Ansatzpunkte sind auch auf Schienenfahrzeuge anwendbar: Anlagentechnische Ansätze sind z. B. die Vorkühlung der Zuluft durch Luftrückführung und luftleitende Einbauten im Fahrgastraum, die zu einer verbesserten Führung der Frischluft in alle Bereiche des Fahrzeugs führen. Im Schienenverkehrsbereich wird diskutiert, die elektrischen Antriebsmotoren mit einer Wasserkühlung zu versehen und die Abwärme durch eine Kopplung der Kreisläufe für die Klimaanlage nutzbar gemacht werden. Eine intelligente Steuerung wird ermöglicht, indem Auslastung und Luftqualität über CO₂- und Feuchtigkeitssensoren gemessen werden. So können die Frischluftzufuhr und die besonders energieaufwändige Luftentfeuchtung bedarfsgerecht gesteuert werden. Empfehlungen für Vorga-

³⁵ Bei der DVB hat es nach Angaben des Unternehmens beispielsweise im Jahr 2017 keine einzige Kundenanfrage zur nicht vorhandenen Klimatisierung der Straßenbahnfahrzeuge gegeben.

ben zum Klimaanlagebetrieb finden sich in der VDV-Vorschrift 236. Sie hat neben den Anforderungen der Fahrgäste auch die Energieeffizienz im Blick. Es fällt jedoch auf, dass die Umsetzung in die Praxis und auch die Bewertung der Wirksamkeit in dieser Hinsicht durch Praxispartner und Experten sehr unterschiedlich ausfallen. So kann die sog. 4°C-Delta-Regelung (Innenraum max. 4 °C kühler als Außentemperatur) nicht in allen Fahrzeugen softwareseitig umgesetzt werden und ihre Wirksamkeit auf den Kraftstoffverbrauch wird von einem Praxispartner angezweifelt. Im Interesse der Energieeffizienz sollten Flexibilität bei den Anforderungen genutzt werden. So kann die untere Temperaturschwelle des Klimaanlageeinsatzes auf mehr als den heute z. B. üblichen Wert von 24 °C Außentemperatur erhöht und stattdessen in diesem Temperaturbereich noch einfach belüftet werden. Im Stadtverkehr, wo Fahrzeuge mit einer hohen Anzahl von Türen eingesetzt werden und in kurzer Folge Öffnungsvorgänge stattfinden, erschwert der häufige Austausch mit der Umgebungsluft einen energieeffizienten Betrieb. Die von Experten angeführte Variante der Abregelung der Frischluftzufuhr an den Haltestellen und Luftschleier im Türbereich³⁶ wurden von Anwendern jedoch mehrfach als ebenfalls unwirksam bewertet. All diese Lösungen erfordern übrigens, dass zumindest die Temperatur des Fahrgastraums automatisch geregelt wird – mit ggf. weiterhin unabhängiger Regulierung für die Fahrerkabine. Auch dies ist jedoch nicht in jedem Verkehrsunternehmen bzw. Fahrzeug möglich.³⁷

Im hier betrachteten Fall werden Busse mit Vollklimatisierung und solche mit Teilklimatisierung, einer intelligent und bedarfsgerecht gesteuerten Anlage sowie einer intensivierten natürlichen Lüftung betrachtet.

Tabelle 3-12: Steckbrief Maßnahme „Energieeffiziente Klimatisierung“

Kategorie	Investiv Ersatz	
Musterunternehmen	DVB	
Verkehrsmittel	Bus	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	7 %	des Endenergiebedarfs in der jeweiligen Sparte des Musterunternehmens
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	70 %	Steigend wegen vermehrter Anforderung der Klimatisierung von Fahrzeugen
Technische Reife / Marktreife	Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	3,6 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Durch die Umsetzung der effizienten Klimatisierung ließe sich **im Musterunternehmen** in der gesamten Nutzungszeit rund 3,5 Mio. l Dieselkraftstoff einsparen. Dies entspricht einer Einsparung in

³⁶ Verhinderung der Infiltration warmer oder kalter Außenluft mittels eines senkrechten Luftstroms

³⁷ Des Weiteren wird beim Thema Klimatisierung oft die Wahl des Kühlmittels diskutiert. Der Einsatz von CO₂ statt R134a als Kühlmittel ist (aufgrund der hohen Klimawirkung von R134a) als Klimaschutzmaßnahme zu sehen. Eine Kraftstoff-Einsparwirkung ist hingegen nicht zu beobachten, weshalb es sich hier nicht um eine Energieeffizienzmaßnahme handelt.

Höhe von 126 TJ (Endenergie) bzw. 155 TJ (Primärenergie) bzw. rund 7 % des Endenergieverbrauchs der Busse des Musterunternehmens.

Die Umsetzung der Maßnahme wäre in einem Großteil der klimatisierten Fahrzeuge umsetzbar. Ausgehend von der Annahme, dass dies in 70 % der Fahrzeuge der Fall ist, ergibt sich ein abgeschätztes **Gesamtpotenzial in Deutschland** von rund 1.175 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 1.440 TJ/a (Primärenergieverbrauch), was etwa 5 % des gesamten Energieverbrauchs der Busse im ÖSPV entspricht.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Busse mit Teilklimatisierung sind i. d. R. günstiger als vergleichbare Fahrzeuge mit Vollklimatisierung. Daher ist schon in der Anschaffung, trotz der zusätzlichen Mess- und Regelungstechnik, ein Kostenvorteil zu beobachten. Hinzu kommt die Kraftstoffeinsparung, weshalb sich im Ergebnis ein deutlicher betriebswirtschaftlicher Vorteil für den Anwender ergibt.

Die Einsparung bei den Anschaffungs- und Herstellungskosten (AHK) für eine Teilklimatisierung im Gegensatz zur Vollklimatisierung wurde auf Basis von Fachveröffentlichungen berechnet. Die Einsparung beim Dieselkraftstoff wurde auf Basis der VDV-Schrift 236 mit der Hälfte des zusätzlichen Kraftstoffverbrauches bei Vollklimatisierung angenommen. Einsparungen bei den Wartungskosten wurden im Hinblick auf die Ausführungen der VDV-Schrift 236/1 aufgrund des Komponentenwegfalls und des einfacheren technischen Aufbaus mit 5 % angenommen.

Tabelle 3-13: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Energieeffiziente Klimatisierung“

Ausgaben	Solo- / Gelenkbus	Hinweis
AHK Energieeffiziente Klimaanlage	12.000	€
AHK konv. Fzg.	13.500	€
Anzahl Fahrzeuge	25 / 115	Anzahl
Restwert Energieeffiziente Klimaanlage	0	€
Restwert konv. Fzg.	0	€
Nutzungsdauer	12	Jahre
Einnahmen		
Kraftstoffeinsparung	2.000 / 2.600	€/a pro Fahrzeug
Umfang		
Ersatz von	100 %	% der Busse des MU
Ergebnis		
Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	326.600	€/a
Barwert über die Nutzungsdauer	3,6 Mio.	€

Quelle: Öko-Institut, KWC und Praxispartner

Perspektiven und Diskussion

Angesichts der für die Fahrgäste mehr und mehr selbstverständlichen Klimatisierung kommt ein Verzicht auf Klimatisierung (s. Abschnitt 3.2.4.2) in vielen Anwendungsfällen nicht mehr in Frage. Unbestritten sind die hohe Bedeutung der Klimatisierung für den Energiebedarf und die vorhandenen Einsparpotenziale. Jedoch werden die verschiedenen oben aufgeführten technischen und betrieblichen Ansätze durch Anwender und Experten teils kontrovers beurteilt.

Fazit

Angesichts des steigenden Einsatzes von Fahrzeugklimatisierung und der hohen Bedeutung für den Energiebedarf sollte ein hoher Energieeffizienzstandard der Klimaanlage bei Neufahrzeugen umso mehr angezeigt sein. Bei der Generalüberholung langlebiger Fahrzeuge, also im Schienenverkehrsbereich, sollte ebenfalls der Stand der Technik umgesetzt werden. Auch wenn nicht, wie im hier betrachteten Anwendungsfall, schon die AHK geringer sind – eine Amortisation der Mehrinvestitionen über die eingesparten Energiekosten ist sehr wahrscheinlich.

Angesichts der unterschiedlichen Bewertung der verschiedenen Ansätze besteht allerdings noch Bedarf, die Wirksamkeit der Maßnahmen im Realbetrieb zu analysieren. V. a. sollte dabei die Abhängigkeit vom jeweiligen Einsatz- und Nutzungsprofil beachtet werden. Eine energieeffizienzoptimierte Klimatisierung im ländlichen Bereich mit großen Haltestellenabständen und geringer Auslastung wird sich grundsätzlich von einer städtischen Anwendung unterscheiden. Die für den jeweiligen Anwendungsfall durchzuspielenden Optionen können wiederum durchaus auch den Verzicht auf Klimatisierung beinhalten, z. B. auf Linien, auf denen sich die Temperatur wegen häufiger Fahrgastwechsel und großer Türöffnungen ohnehin kaum halten lässt und die Fahrgäste nur kurze Zeit verbringen. Möglicherweise zu starre Standards seitens der Aufgabenträger sollten daher hinterfragt werden. Dies gilt besonders im Busbereich, wo sich in der voraussichtlich elektromobilen Zukunft eine ineffiziente Klimaanlage deutlich auf die Reichweite auswirkt.

3.2.4.4. Leichtbaubusse

Beschreibung der Maßnahme

Grundsätzlich gibt es verschiedene Ansätze zur konstruktiven Verringerung des Fahrzeuggewichts: Stoffleichtbau (Aluminium, Kunststoffe und Kohlefaserverbund anstatt Stahl und Holz), Formleichtbau (z. B. Verringerung von Wandstärken) und Bedingungsleichtbau (Gewichtseinsparung durch genaue Analyse der auftretenden Einsatzbedingungen). Diese Methoden können wiederum bei unterschiedlichen Bauteilen zum Einsatz kommen: In der Karosserie, in Wandmaterialien, im Boden sowie in rotierenden Teilen wie Felgen und Achsen. Einzelne Leichtbauteile werden von allen Herstellern eingesetzt. Der Formleichtbau gewinnt an Bedeutung, wenn z. B. durch 3D-Druck-Verfahren neue intelligente Bauteilgeometrien realisiert werden können.

Einzelne Hersteller gehen über die Gewichtsoptimierung einzelner Teile hinaus und bieten ganzheitlich Leichtbaubusse an. Beim hier betrachteten Solobus wird das um ein Viertel reduzierte Fahrzeuggewicht v. a. durch eine Aluminiumkarosserie erreicht.

Betrachtet wurde hier das Szenario, in dem das Musterunternehmen die gesamte, bisher noch nicht auf Leichtbau umgestellte Flotte an Solo- und Gelenkbussen durch Leichtbaufahrzeuge ersetzt.

Tabelle 3-14: Steckbrief Maßnahme „Leichtbaubusse“

Kategorie	Investiv Ersatz	
Musterunternehmen	BVG	
Verkehrsmittel	Bus	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	4 %	
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	80 %	Steigend bei zukünftig breiterer Modellpalette
Technische Reife / Marktreife	Wenige Serienmodelle angeboten	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	30 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Im hier untersuchten Beispiel verbrauchen die Leichtbaubusse 7,5 % weniger Kraftstoff als vergleichbare konventionelle Fahrzeuge. Dabei handelt es sich wegen der noch nicht ausreichenden Datenbasis im Musterunternehmen um eine vergleichsweise konservative Angabe des Herstellers (5 bis 10 %). Andere Quellen, so auch Erfahrungswerte aus dem Musterunternehmen, nennen teils einen um bis zu 20 % reduzierten Kraftstoffbedarf. Durch den Einsatz von Leichtbaubussen würde sich im Musterunternehmen in der gesamten Nutzungszeit rund 28 Mio. l Dieselkraftstoff einsparen. Dies entspricht einer Einsparung in Höhe von 1.000 TJ (Endenergie) bzw. 1.233 TJ (Primärenergie). Die Endenergieeinsparung umfasst 4 % des Verbrauchs der Bus-Sparte **im Musterunternehmen**.

Nicht nur in punkto Energieeinsparpotenzial schneidet der Einsatz der Leichtbaubusse gut ab, sondern auch in Sachen Anwendbarkeit, denn grundsätzlich sind derartige Fahrzeuge für alle Einsatzzwecke geeignet.

Unter der Annahme, dass mit Leichtbaubussen ein Anteil von 80 % der Fahrleistung der Dieselsebuse ersetzt werden könnte, ergibt sich ein **Gesamtpotenzial in Deutschland** von rund 1.400 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 1.700 TJ/a (Primärenergieverbrauch). Dies entspricht etwa 6 % des gesamten Energieverbrauchs der Busse im ÖSPV.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Schon bei den Anschaffungs- und Herstellungskosten (AHK) bieten Leichtbaubusse einen leichten Vorteil gegenüber konventionellen Modellen. Dieser wurde, wie auch die Einsparung beim Dieselkraftstoff, auf Basis von Herstellerangaben berechnet. Sowohl gemäß Herstellerangaben als auch auf nach der Erfahrung des Musterunternehmens ist nicht mit zusätzlichen Wartungskosten zu rechnen. (s. u.).

Tabelle 3-15: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Leichtbaubusse“

Ausgaben	Solo- / Gelenkbus	Hinweis
AHK Leichtbaubus	260.000 / 320.000	€

AHK konv. Fzg.	280.000 / 330.000	€	
Anzahl Fahrzeuge	310 / 419	Anzahl	
Restwert Leichtbau- bus	8 / 9 %	der AHK	
Restwert konv. Fzg.	7 / 9 %	der AHK	
Nutzungsdauer	12	Jahre	
Einnahmen			
Kraftstoffeinsparung	2.400 / 2.900	€/a pro Fahrzeug	
Umfang			
Ersatz von	74 % / 79 %	der Solo und Gelenk-Busse des MU	Alle Solo- und Gelenk- busse, die noch keine Leichtbaufahrzeuge sind
Ergebnis			
Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	2,7 Mio.	€/a	
Barwert über die Nutzungsdauer	30 Mio.	€	

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Perspektiven und Diskussion

Angesichts geringerer Anschaffungskosten und Verbräuche erscheinen Leichtbaubusse eindeutig vorteilhaft. Die geringe Hersteller- und Modellauswahl im Leichtbaubereich schränkt allerdings die Vergleichbarkeit ein und die Angaben zur Kraftstoffeinsparung schwanken erheblich. Daher sollten noch weitere Langzeiterkenntnisse gewonnen werden. Eine Maßnahme wird unwirtschaftlich, sobald die Anschaffungsmehrkosten nicht mehr durch die Einsparung kompensiert werden. Die hier für Leichtbaubusse durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt, dass dies bei einer Erhöhung der Anschaffungskosten um 10 bis 20 % der Fall sein dürfte.

Auch zu den Themen Lebensdauer und Instandhaltungsaufwand besteht Bedarf an weiteren Langzeitauswertungen. Viele Akteure erwarten Mehrkosten bei der Unfallschadensbehebung, da beschädigte Aluminiumstrukturen nicht so leicht wie Stahlkarosserien ohne Demontage mit Schweiß- und Biegetechniken repariert werden können. Diese Skepsis wird jedoch bislang vom betrachteten Musterunternehmen nicht geteilt. Zu beachten ist auch, dass die benachbarte Bearbeitung von Stahl- und Aluminiumbauteilen zu Korrosionsschäden führen kann. Deshalb sind in gemischten Flotten getrennte Werkstattkapazitäten für Aluminium- und Stahlinstandhaltung nötig. Eine weitere Unsicherheit beim Leichtbau stellt aufgrund der Verwendung von Werkstoffen mit anderen Eigenschaften und der oft verringerten Bauteildicken die Lebensdauer dar. Hier gibt es zwar erste ermutigende Erfahrungen, eine breitere Datenbasis fehlt jedoch noch.

Potenzielle Anwender äußern zudem Skepsis hinsichtlich der lebenszyklusumfassenden Gesamtenergiebilanz, denn die Herstellung von Aluminium ist energieaufwändiger als die Stahlproduktion.

Fazit

Trotz einzelner offener Fragen handelt es sich beim Leichtbaubus klar um eine verbrauchsreduzierende Maßnahme, die sich bei den aktuellen Angebotspreisen betriebswirtschaftlich in der Regel ohne monetäre Förderung lohnt. Sie hätte daher mehr Interesse der Verkehrsunternehmen und Hersteller verdient, damit die marktverfügbare Fahrzeugpalette nicht so unzureichend bleibt, wie sie sich heute darstellt. Es besteht derweil noch Bedarf an praxisnahen Vergleichsstudien, um die Frage nach der Gesamtenergiebilanz zu beantworten.

3.2.4.5. Leichtbauschienenfahrzeuge

Beschreibung der Maßnahme

Leichtbaumaßnahmen jedweder Art sind bei Schienenfahrzeugen unabhängig von Energieeffizienzerwägungen unverzichtbar, um den Gewichtsrestriktionen gerecht zu werden: Die durch einzelne Bauwerke, wie Hochbahnstrecken und Brücken, vorgegebene maximale Achslast sowie die durch den minimalen Kurvenradius definierte Fahrwerkconfiguration bestimmen maßgeblich das zulässige Gewicht von Schienenfahrzeugen im ÖSPV. Gleichzeitig sind die Fahrzeuge in der Vergangenheit aufgrund gestiegener Stabilitätsanforderungen (Unfall- und Anprallsicherheit) und wegen zusätzlicher Komfortfunktionen tendenziell schwerer geworden. Bei wachsenden Fahrgastzahlen werden zudem Kapazitätssteigerungen gefordert – beispielsweise durch eine Erhöhung des Stehplatzanteils. Die erhöhte Auslastung erhöht wiederum die Gesamtmasse des Fahrzeugs. Beim Erreichen der Achslastgrenze kann dies entweder durch Kapazitätsbeschränkungen oder aber durch Leichtbaumaßnahmen kompensiert werden.

Um diese Ansprüche zu erfüllen, kommen auch bei Schienenfahrzeugen alle in Abschnitt 3.2.4.4 genannten Ansätze zur Gewichtsreduktion zum Einsatz. Abgesehen vom Aluminium-Wagenkasten können Masseneinsparungen durch Sandwichbauweise und andere intelligente Konstruktionsweisen sowie durch Verbundmaterialien und Kunststoffe in Böden, Außenwänden und Mobiliar erreicht werden. Im Fahrwerksbereich kann z. B. durch geänderte Antriebskonzepte die Anzahl der Motoren, Getriebe und Wechselrichter reduziert werden.

Energieeinsparpotenzial und betriebswirtschaftliche Bewertung

Ein Vergleich zweier Fahrzeugtypen mit unterschiedlichem Fahrzeuggesamtgewicht bei ansonsten gleichen Kennwerten war für Straßen- oder U-Bahnen nicht möglich. Dazu sind die Flotten stets zu individuell auf die Anforderungen des jeweiligen Bedienungsgebietes und der Verkehrsunternehmen zugeschnitten. Es existieren keine weitgehend standardisierten Fahrzeugkonfigurationen und -massen wie im Busbereich.

Perspektiven und Diskussion

In Hinsicht auf Aluminium-Wagenkästen wird neben der erschwerten Unfallschadensbehebung (s. Leichtbaubusse) häufig eingewendet, dass heutige Straßenbahnfahrzeuge mehr Gewicht auf dem Dach tragen müssten (z. B. Klimaanlage) als in der Vergangenheit. Die dazu erforderliche Stabilität auch mit leichten Aluminiumkonstruktionen zu erreichen, stellt eine anspruchsvolle Herausforderung dar.

Die größeren Potenziale sind daher bei U-Bahnen zu sehen. Die Traglast spielt eine geringere Rolle, da die Fahrzeuge aufgrund der lokal vorgegebenen Lichtraumprofile keine Dachaufbauten tragen können. Es bestehen keine Berührungspunkte mit anderen Verkehrsmitteln, daher sind Unfallwahrscheinlichkeit und Schadenumfänge minimiert.

Fazit

Auch wenn der Treiber der Gewichtsreduktion eher das zulässige Gesamtgewicht ist, stellt Leichtbau bei Schienenfahrzeugen unzweifelhaft auch eine wirkmächtige Energieeffizienzmaßnahme dar. Zu beachten ist allerdings, dass bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (so auch beim E-Bus) ein Teil der durch Leichtbau gegenüber der konventionellen Bauweise gesparten Beschleunigungsenergie im Gegenzug durch geringere Rekuperation kompensiert wird und somit nicht als Einsparung zu Buche schlägt.

Es ist davon auszugehen, dass sich viele sinnvolle Leichtbaumaßnahmen bei Neufahrzeugen automatisch durchsetzen, weil sie betriebswirtschaftlich rentabel sind. Bei Altfahrzeugen sollten die Chancen zur Nachrüstung genutzt werden. Bei der Generalüberholung der Fahrzeuge werden ohnehin viele Bauteile ausgetauscht. Gerade diejenigen Leichtbaumaßnahmen, die auch bei Neufahrzeugen den gegenwärtigen Technologie- und Ausstattungsstandard darstellen, sollten dann auch bei Generalüberholungen umgesetzt werden.

3.2.4.6. Bedarfsgerechtes Kneeling

Beschreibung der Maßnahme

„Kneeling“ (aus dem Engl. sinngemäß: Knien, Hinknien) bezeichnet das seitliche Absenken eines Busses, das auf dessen Türeseite den Höhenunterschied zwischen der Bordsteinkante und dem Fahrzeugboden durch eine Kippbewegung des Wagenkastens verringert oder aufhebt. Dies erleichtert Fahrgästen mit Rollstuhl, Gehbehinderung, Kinderwagen oder schwerem Gepäck den Einstieg. Der Vorgang wird über ein Druckluftsystem realisiert.

In manchen Verkehrsunternehmen wird der Kneeling-Vorgang automatisch bei jedem Türöffnungsvorgang ausgelöst, auch wenn dies weder durch Fahrgäste noch durch das Fahrpersonal angefordert wird. Ein derartiger Betrieb kann über 10 % des Kraftstoffverbrauchs ausmachen. Ihm wird hier als Energieeffizienzmaßnahme die Maßgabe gegenübergestellt, dass das Kneeling nur bei Bedarf, also bei tatsächlichem Zu- oder Ausstieg von mobilitätseingeschränkten Fahrgästen an Haltestellen mit unzureichender Bordhöhe erfolgt. Im Vergleich kommt nicht nur der bei bedarfsgerechtem Kneeling weniger häufig erforderliche Wiederaufbau des Drucks im pneumatischen System zum Tragen, sondern auch die Zeitersparnis an den Haltestellen. Die Druckluftsysteme sind zudem sehr wartungsintensiv und der Instandhaltungsaufwand steigt bei zunehmender Nutzungsfrequenz.

Tabelle 3-16: Steckbrief Maßnahme „Bedarfsgerechtes Kneeling“

Kategorie	Nicht-investiv	
Musterunternehmen	KViP	
Verkehrsmittel	Bus	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	11 %	
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	10 %	Sinkende Relevanz des Kneeling bei Haltestellenumbau (Hochbord)
Technische Reife / Marktreife	Serienmäßig verfügbar	
Betriebswirtschaftliche	950.000 €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Bewertung: Barwert

Quelle: Öko-Institut, KWC und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Im Vergleich mit dem konsequenten „Zwangs-Kneeling“ ergibt sich durch das bedarfsgerechte Kneeling **im Musterunternehmen** über die Nutzungszeit des gesamten Fuhrparks eine Ersparnis von rund 1,3 Mio. l Dieselkraftstoff. Dies entspricht einer Reduktion in Höhe von 45 TJ (Endenergie) bzw. 55 TJ (Primärenergie). Dies entspricht 11 % des Endenergieverbrauchs der Busse im Musterunternehmen.

In der Abschätzung des **Gesamtpotenzials in Deutschland** wird angenommen, dass bei 10 % der Fahrleistung (innerorts) bzw. 5 % (außerorts) ein „Zwangs-Kneeling“ stattfindet und somit die hier betrachtete Umstellung zum Einsatz kommen könnte. Das abgeschätzte Gesamtpotenzial in Deutschland beträgt mit rund 195 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 239 TJ/a (Primärenergieverbrauch) etwa 1 % des gesamten Energieverbrauchs der Busse im ÖSPV. Das Gesamtpotenzial ist wesentlich geringer als das Potenzial im Musterunternehmen, da das „Zwangs-Kneeling“ nicht sehr weit verbreitet ist und in der Abschätzung ein Potenzial von 10 % des Busbestandes angenommen wurde.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Die Maßnahme erschließt sehr kosteneffiziente Einsparpotenziale. Wegen der hohen Bedeutung des Kneeling für den Kraftstoffeinsatz wirkt sie sich positiv auf das Betriebsergebnis des Musterunternehmens aus und erzielt über die Nutzungsdauer der Fahrzeuge einen positiven Barwert. Die Einsparung von Dieselkraftstoff wurde auf Basis von Erfahrungswerten des Musterunternehmens kalkuliert und die Nutzungsdauer der Fahrzeuge im Musterunternehmen zugrunde gelegt.

Tabelle 3-17: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Bedarfsgerechtes Kneeling“

Ausgaben	Solo- / Gelenkbus	Hinweis
AHK	0 €	im Vergleich zum automatischen Kneeling
Nutzungsdauer	14 Jahre	
Einnahmen		
Kraftstoffeinsparung	2.800 / 2.500 €/a pro Fahrzeug	
Umfang		
Ersatz von	100 %	% der Busse des MU
Ergebnis		
Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	75.200 €/a	
Barwert über die Nutzungsdauer	950.000 €	

Quelle: Öko-Institut, KWC und Praxispartner

Perspektiven und Diskussion

Die hier betrachtete Regelung, dass der Kneeling-Vorgang bei jeder Türöffnung automatisiert ausgelöst wird, ohne dass das Fahrpersonal Einfluss nehmen kann – sogar beim Rangieren auf dem Betriebshof – stellt einen Extremfall dar.

Die unterschiedliche Handhabung des Kneeling ist jeweils aufgrund lokaler Diskussionen mit Fahrgastverbänden und Vertretern mobilitätseingeschränkter oder Menschen mit Behinderungen entstanden. Daher wird auch die Akzeptanz einer Änderung der Handhabung sehr unterschiedlich eingeschätzt. Während diejenigen Unternehmen, die heute bedarfsgerechtes Kneeling praktizieren, kaum von Fahrgastbeschwerden berichten, wurde die Maßnahme in Berlin aufgrund deutlicher Kritik seitens der Verbände nach weniger als zwei Jahren zurückgenommen.

Die Maßnahme „Umstellung von kontinuierlichem („Zwangs-“) auf bedarfsgesteuertes Kneeling“ ist nur bei einzelnen Unternehmen von Bedeutung, da sie vielerorts bereits umgesetzt ist. Das Kneeling verliert tendenziell an Bedeutung, da Haltestellen schrittweise auf Hochborde umgestellt werden und moderne Busse über eine niedrige Flurhöhe verfügen, sodass auf die Fahrzeuge auf die Dauer möglicherweise auf die Absenkfunktion verzichten können. Ansonsten können elektrisch anstatt hydraulisch betriebene Druckluftsysteme den Energieaufwand senken.

Fazit

Das Kneeling, das für die Mehrheit der Fahrgäste ein eher unwichtiges Detail ist, stellt für mobilitätseingeschränkte Personen eine zentrale Zugangsvoraussetzung für den ÖSPV dar. Jedoch werden bei der nicht bedarfsgesteuerten Nutzung mehr als ein Zehntel des Kraftstoffverbrauchs für diese Vorgänge aufgewendet.

Auch wenn es tendenziell an Bedeutung verliert, ist das Thema ein gutes Beispiel, wie eine sehr weitgehende und nicht sachgemäße Auslegung anderer, zweifellos unabdingbarer Anforderungen Energieeffizienzzugewinne konterkarieren kann. Eine energieeffizientere Lösung, die ohne Abstriche die Anforderung der Barrierefreiheit erfüllt, ist in Form der Bedarfsteuerung des Kneeling verfügbar.

3.2.4.7. Weitere Maßnahmen

Während **LED-Leuchtmittel** in vielen Anwendungen, sowohl stationär als auch bspw. im Pkw, mittlerweile Standard sind, nutzen selbst ÖSPV-Neufahrzeuge oft noch Leuchtstoffröhren im Innenraum und Glühlampen als Scheinwerfer. Sowohl im Bus- als auch im Schienenbereich machen konventionelle Leuchtmittel weniger als 5 % des Energiebedarfs aus. Dieser Bedarf kann durch Einsatz von LED-Technik um etwa ein Viertel bis ein Drittel gesenkt werden. Die Kosten reichen von ca. 1 Tsd. € Aufpreis für LED-Scheinwerfer bei einem neuwertigen Bus bis zu 15 Tsd. € Kosten zur Nachrüstung eines aus sechs Wagen zusammengesetzten U-Bahn-Zugs. Damit wäre eine hinreichende Wirtschaftlichkeit in den meisten Fällen nicht gegeben – es sei denn, die Leuchtmittel haben eine erheblich höhere Lebensdauer als die bisher eingesetzten. Dies wird aus dem Straßenbahnbereich berichtet, wo Leuchtstoffröhren im Innenraum und Scheinwerfer wegen der starken Vibrationen nur ca. 2 Jahre halten, während bei LED mehr als 10 Jahre erwartet werden. Die Praxispartner bestätigten die lange Lebensdauer durch erste Langzeiterfahrungen. Neben einer Kostensenkung für LED sollte auch auf eine austauschfreundliche Konstruktionsweise geachtet werden, so dass auch zukünftig verbrauchsärmere Leuchtmittel nachgerüstet werden können. Eine dynamische Anpassung der Beleuchtung auf die Außenhelligkeit sollte selbstverständlich sein. Dies ist bei Leuchtstoffröhren zur Schonung der Leuchtmittel nicht üblich, bei LED jedoch unkritisch.

Eine durch die Verkehrsunternehmen häufig thematisierte Energieeffizienzmaßnahme ist der **Verzicht auf immer weitere Verbraucher**, die dem **Fahrgastkomfort** dienen. Hier werden v. a. USB-Anschlüsse und W-LAN genannt. Neue elektronische Geräte erhöhen durch ihre Abwärme den Bedarf zur Klimatisierung. Dem dadurch entstehenden Zusatzverbrauch steht hier jedoch besonders klar der Attraktivitätsgewinn für Fahrgäste gegenüber, der zu einer Verlagerungswirkung auf den ÖSPV führen kann. Angesichts der weiten Verbreitung und Nutzung von Smartphones ist aber tatsächlich zu hinterfragen, ob z. B. weitere Bildschirme, die im Wesentlichen dem Entertainment bzw. „Infotainment“ dienen, notwendig sind.

Beim Bus werden sich weitere Einsparpotenziale seitens der Nebenverbraucher durch eine **Elektrifizierung des Druckluftsystems** erschließen: Herkömmlicherweise sind die Kompressoren direkt mechanisch mit dem Dieselmotor gekoppelt. Ähnlich wie bei der Klimatisierung können sie somit nicht bedarfsgerecht geregelt werden. Eine elektrisch betriebene Druckluftanlage, die ihren Energiebedarf aus einer Batterie bezieht, kann hingegen intelligent angesteuert werden. Trotz eines durchgehend als hoch bewerteten Einsparpotenzials gibt es dabei weiterhin Entwicklungsbedarf. Experten im Projekt sahen die Einsparpotenziale einer Elektrifizierung der Nebenaggregate beim Dieselbus teils skeptisch, beim E-Bus ist sie jedoch ein Muss.

Aus Energieeffizienzsicht wünschenswert ist bei den elektrischen und teilelektrischen Antrieben zudem eine stärker **„linienbezogene Programmierung“** der Nebenverbraucher: Das Fahrzeug sollte die Strecke inkl. Topografie, Brems- und Anfahrvorgängen (Haltestellen und Ampeln) „kennen“ und daraus ein individuell optimiertes Zusammenspiel aus Antriebs- und Rekuperationsleistung sowie Nebenverbraucherbetrieb ableiten. Durch moderne Datenverarbeitungstechnologien ergeben sich hier neue Möglichkeiten. Bei elektrischen Schienenfahrzeugen ist dies in ähnlicher Weise bereits üblich: Wenn das Fahrzeug an Haltestellen oder bergab gebremst werden muss, wird die rekuperierte Energie beispielsweise für ein kurzes Heizintervall genutzt.

3.2.5. Straßenbahn und U-Bahn: Stromversorgungsinfrastruktur

3.2.5.1. Optimierung der Fahrstromverteilung

Beschreibung der Maßnahme

In allen elektrisch betriebenen Schienenverkehrsnetzen ist man bestrebt, die in die Oberleitung eingespeisten Strommengen zu mindestens 95 % für die Fahrzeuge nutzbar zu machen. Verluste aufgrund von Leitungsverlusten oder fehlenden Abnehmern für rekuperierte Bremsenergie sollen minimiert werden. Um dies zu gewährleisten, gibt es unterschiedliche technische Optimierungsmöglichkeiten.

Die *Durchbindung* bezeichnet die elektrische Verbindung vorher getrennt arbeitender Speiseabschnitte der Oberleitungsinfrastruktur. Dies ermöglicht die Nutzung des rückgespeisten Stroms durch andere Fahrzeuge in anderen und gegebenenfalls weiter entfernten Netzabschnitten. *Vermaschung* bezeichnet hingegen die Schaffung von Querverbindungen. Bei der Oberleitungsinfrastruktur bedeutet dies v. a. die Schaffung elektrischer Verbindungen zwischen beiden Fahrtrichtungen. Dies erhöht die Sicherheit gegen Stromnetzausfälle und verbessert die Nutzungsmöglichkeiten der rekuperierten Energie. *Mehrpunktspeisung* bezeichnet die Speisung eines Netzabschnittes an mehr als einem Punkt. Dies führt zu geringeren Übertragungs- und Leerlaufverlusten.

Im Projekt wurde die Wirtschaftlichkeit für einen Anwendungsfall bei einem Praxispartner betrachtet, der über einen Zeitraum von sechs Jahren eine verbesserte Durchbindung von Speiseabschnitten und Mehrpunktspeisung mittels Installation von Mitnahmerelais und einer zusätzlichen

Software vornahm. Außerdem waren neue Schutzvorrichtungen erforderlich: Getrennte Netzabschnitte bieten einen Schutz vor Stör- und Ausfällen, der bei der energetischen Optimierung ansonsten verloren ginge.

Tabelle 3-18: Steckbrief Maßnahme „Optimierung der Fahrstromverteilung“

Kategorie	Investiv Ergänzung	
Musterunternehmen	DVB	
Verkehrsmittel	Straßenbahn	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	13 %	des Endenergiebedarfs in der jeweiligen Sparte des Musterunternehmens
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	50 %	
Technische Reife / Marktreife	Technische Maßnahmen verfügbar	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	14,3 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Durch die Optimierung der Fahrstromverteilung würde **das Musterunternehmen** in der restlichen Nutzungszeit rund 170 GWh Strom einsparen. Dies entspricht einer Einsparung in Höhe von 614 TJ (Endenergie) bzw. 1.241 TJ (Primärenergie) und damit 13 % des gesamten Energieverbrauchs der Straßenbahnen im Musterunternehmen.

Das abgeschätzte **Gesamtpotenzial** der optimierten Fahrstromverteilung in Deutschland beträgt mit rund 303 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 613 TJ/a (Primärenergieverbrauch) rund 7 % des gesamten Energieverbrauchs der Straßenbahnen. Dabei wird angenommen, dass sich die Maßnahme auf 50 % der Fahrleistung der Straßenbahnen übertragen lässt.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Im MU umfassten Erforderliche Infrastrukturinvestitionen die Installation von Mitnahmerelais und Software in 50 Gleichrichterunterwerken (GUW). Insgesamt entstanden Kosten von weniger als 10.000 € je GUW. Somit wirkte sich die Maßnahme positiv auf das Betriebsergebnis des Musterunternehmens aus und erzielte über die Nutzungsdauer der Infrastruktur einen positiven Barwert. Wenn Tiefbauarbeiten unter Straßen nötig sind, können die Kosten jedoch deutlich höher sein.

Weitere Einsparungen können sich bei dieser Maßnahme durch eine Glättung von Strombedarfs- spitzen und damit der Vermeidung von Spitzenstrompreisen ergeben.

Tabelle 3-19: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Optimierung der Fahrstromverteilung“

Ausgaben	Straßenbahn	Hinweis
AHK Gesamtnetz	300.000	€
Restwert	0 %	der AHK

Nutzungsdauer	25	Jahre
Einnahmen		
Fahrstrom einsparung	730.000	€
Umfang		
Umrüstung GUW	50	Anzahl
Ergebnis		
Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	700.000	€/a
Barwert über die Nutzungsdauer	14,3 Mio.	€

Quelle: Öko-Institut, KWC und Praxispartner

Perspektiven und Diskussion

Sofern zusätzliche Schutzfunktionen gegen Stör- und Ausfälle eingerichtet werden (s. o.), sind keine nachteiligen Folgen der Maßnahme zu befürchten. Vielmehr können neben der Verringerung von Stromverlusten weitere Vorteile wie eine Glättung von Strombedarfsspitzen erreicht werden. Dementsprechend wurde sie auch durch die beteiligten Musterunternehmen und Experten durchgehend positiv bewertet.

Die zukünftigen Perspektiven dieser Maßnahme sind jedoch davon abhängig, inwieweit die Infrastruktur schon heute nach den entsprechenden Kriterien gestaltet ist. In den U-Bahn-Netzen gibt es nur noch wenig Optimierungspotenzial.

Fazit

Die technische Ausgestaltung und damit auch das Einsparpotenzial hängen auch hier entscheidend von der Ausgangslage sowie dem Umsetzungsstand bei „konkurrierenden“ Maßnahmen ab. Grundsätzlich ist eine sorgfältige Analyse und Planung erforderlich. Auch wenn sich eine Optimierung über den reduzierten Energiebedarf in vielen Fällen selbst refinanzieren und somit ohne Förderung auskommen mag: Wichtig ist für das Verkehrsunternehmen finanzielle Planungssicherheit für den mehrjährigen Planungs- und Umstellungsprozess und eine gute Zusammenarbeit mit der Kommune.

3.2.5.2. Erhöhung der Nennspannung

Beschreibung der Maßnahme

Die Entscheidung für eine bestimmte Nennspannung betrifft immer das Gesamtsystem. Die zu meist auftretende und auch in diesem Fall betrachtete Erhöhung von 600 auf 750 V muss also im gesamten Netz umgesetzt werden und alle Fahrzeuge müssen auf die neue Spannung ausgelegt sein. Ein wesentlicher Energieeffizienzeffekt ist, dass nach Erhöhung des Spannungsniveaus größere Mengen rekuperierten Stroms zurückgespeist werden können. Die zweite wesentliche Wirkung ist, dass die erhöhte Nennspannung die in der Leitung entstehenden Übertragungsverluste verringert. Die Erhöhung, im hier betrachteten Fall um den Faktor 1,25, geht bei der Verringerung der Leitungsverluste im Quadrat ein. Im Beispiel ergibt sich der Faktor 1,56, d. h. die Übertra-

gungsverluste werden rechnerisch um etwa 36 % (1-1/1,56) sinken. Die wesentliche Hardware-Umstellung bei dieser Maßnahme ist die Umrüstung der Transformatoren.

Tabelle 3-20: Steckbrief Maßnahme „Erhöhung der Nennspannung“

Kategorie	Investiv Ergänzung	
Musterunternehmen	DVB	
Verkehrsmittel	Straßenbahn	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	8 %	des Endenergiebedarfs in der jeweiligen Sparte des Musterunternehmens
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	50 %	Bei Umstellung aller Netze mit 600 V (vorrangig Straßenbahnbetriebe) auf 750 V
Technische Reife / Marktreife	Verfügbar; Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu Potenzialen für Erhöhung auf > 1.000 V	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	-28,5 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung
Abschätzung Umweltkosteneinsparung	-5,6 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Durch eine Erhöhung der Nennspannung lassen sich **im Musterunternehmen** in der gesamten Nutzungsdauer rund 99 GWh Strom einsparen. Dies entspricht einer Einsparung in Höhe von 356 TJ (Endenergie) bzw. 718 TJ (Primärenergie) und damit 8 % des gesamten Energieverbrauchs der Straßenbahnen im Musterunternehmen.

Das abgeschätzte **Gesamtpotenzial in Deutschland** der erhöhten Nennspannung beträgt mit rund 304 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 614 TJ/a (Primärenergieverbrauch) rund 7 % des gesamten Energieverbrauchs der Straßenbahnen. Dabei wird angenommen, dass sich die Maßnahme auf 50 % der Fahrleistung der Straßenbahnen übertragen lässt.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Die Berechnung der Maßnahme erfolgte unter der Annahme, dass die Fahrzeuge im Netz die technischen Voraussetzungen für die erhöhte Spannung erfüllen. Selbst unter dieser Maßgabe ergab sich bei der gewählten Maßnahmenabgrenzung und unter den individuellen Randbedingungen des betrachteten Praxispartners, dass sich eine Umsetzung der Maßnahme unter rein betriebswirtschaftlicher Betrachtung nicht amortisiert. Es mussten insgesamt fast 40 Mio. € für die Umrüstung von Transformatoren und Sicherheitstechnik sowie für zusätzliche stromführende Tragseile in der Oberleitungsinfrastruktur aufgewendet werden.

Tabelle 3-21: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Erhöhung der Nennspannung“

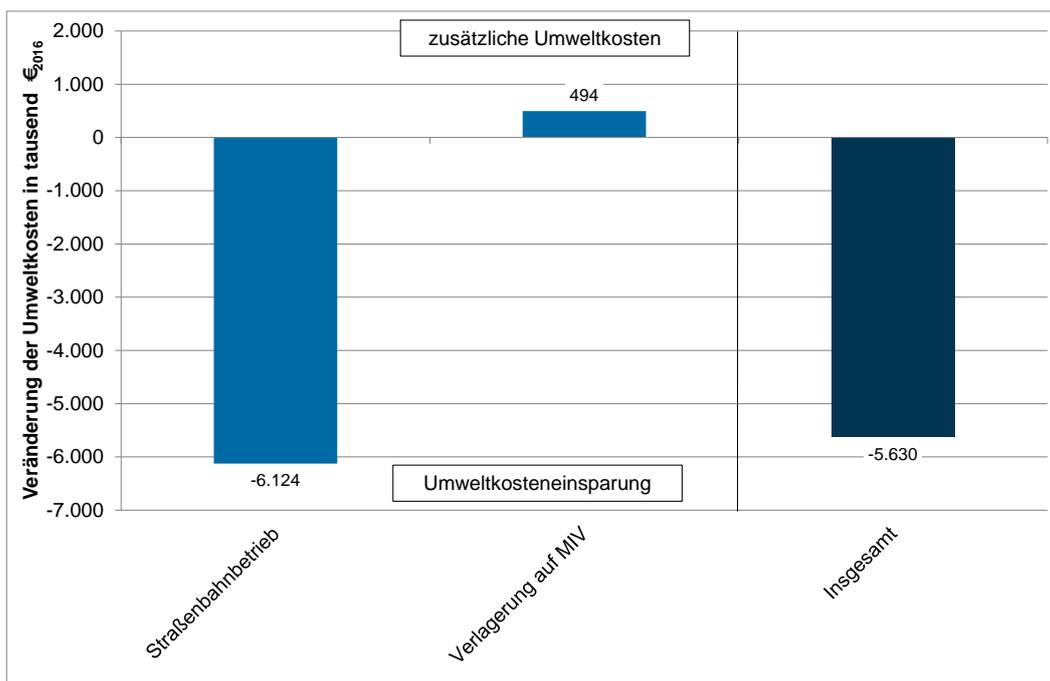
Ausgaben	Straßenbahn	Hinweis
AHK Transformatoren und sonst. elekt-	36,9 Mio.	€

rische Ausrüstung		
Restwert Infrastruktur	0 %	der AHK
Restwert Unterwerke	0 %	der AHK
Nutzungsdauer	25	Jahre
Einnahmen		
Einsparung Energiekosten	422.650	€/a
Ergebnis		
Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	-1,1 Mio.	€/a
Barwert über die Nutzungsdauer	-28,5 Mio.	€
Hypothetischer Anstieg des Fahrkartenpreises	1 %	Bei 100 % Nutzerfinanzierung

Einfluss auf die Umweltkosten

Der Erhöhung der Nennspannung im Netz der Straßenbahnen führt im Musterunternehmen zu einer Verringerung der Umweltkosten von insgesamt rund 5,6 Mio. €. Haupttreiber sind die vermiedenen Treibhausgasemissionen durch die Stromeinsparung. Dadurch sinken die Umweltkosten um 6,1 Mio. € in der gesamten Nutzungszeit. Ausgehend von der Annahme einer vollständigen Nutzerfinanzierung (Erhöhung der Fahrscheinpreise) ergibt sich eine Verkehrsverlagerung auf den MIV. Diese zusätzlichen Pkw-Fahrten verursachen zusätzliche Umweltkosten in Höhe von 0,5 Mio. €

Abbildung 3-7: Veränderung der Umweltkosten durch die Erhöhung der Fahrdrachtspannung



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Perspektiven und Diskussion

Das Motiv für diese Maßnahme ist i. d. R. nicht alleine die Effizienzsteigerung. Wie das dargestellte Beispiel zeigt, kann ohne externe Förderung keine betriebswirtschaftliche Amortisation erreicht werden. Die betriebswirtschaftliche Bewertung würde noch negativer ausfallen, wenn der Fuhrpark aktiv umgestellt würde. Das hieße, dass das Verkehrsunternehmen nicht die organische Fuhrparkerneuerung nutzt, indem es nur noch Neufahrzeuge beschafft, die für die höhere Spannung ausgelegt sind, sondern auch Bestandsfahrzeuge umrüstet oder vorzeitig aus dem Fuhrpark ausscheiden lässt.

Umgekehrt bestehen aber zusätzliche Argumente pro Umsetzung. Neben der Reduktion der Leitungsverluste wird eine höhere übertragbare Leistung ermöglicht. Die Steigerung der Kapazitätsgrenzen der Energieübertragung kann auch für Taktverdichtungen genutzt werden. Es wird zudem eine verbesserte Spannungsstabilität erwartet und ein größerer Abstand zwischen den einzelnen GUV ermöglicht. Hinzu kommen eine Erhöhung des Rückspeisungsgrads wegen der Vergrößerung des nutzbaren Spannungsbereiches und eine Minderung der Streustromkorrosion.

Zu beachten ist, dass zur Hebung des vollen Einsparpotenzials auch eine angepasste Steuerung der Nebenverbraucher wie etwa der Heizung nötig ist. Andernfalls wurden in einzelnen Verkehrsunternehmen Mehrverbräuche statt der erwarteten Einsparungen verzeichnet.

Fazit

Eine Umstellung des Gesamtsystems der Stromversorgungsinfrastruktur kann nur langfristig geplant und umgesetzt werden. Transformatoren und Sicherheitseinrichtungen müssen vollständig umgerüstet werden und alle vorhandenen oder hinzukommenden Fahrzeuge geeignet sein. Alt-

fahrzeuge können ein Hindernis für die Umsetzung darstellen. Insofern müssen die Vor- und Nachteile sorgfältig gegeneinander abgewogen sein.

Perspektivisch wird auch eine Erhöhung über die vielerorts aktuelle Spannung von 750 V hinaus in Frage kommen. Dafür ist in Deutschland bisher nur das Anwendungsbeispiel der Hamburger S-Bahn mit 1.200 V bekannt.

Angesichts eines umfangreichen Umrüstungs- und/oder Erneuerungsbedarf von Fahrzeugpark und Infrastruktur können Jahrzehnte bis zur vollständigen Amortisation vergehen. Erforderlich sind eine dauerhaft gesicherte Perspektive und eine finanzielle Grundausstattung des Verkehrsunternehmens. Zudem ist eine gute Abstimmung zwischen Herstellern sowie Betreibern von Fahrzeugen, Komponenten und baulicher bzw. elektrotechnischer Infrastruktur nötig.

3.2.5.3. Stationäre Energiespeicherung

Beschreibung der Maßnahme

Durch die Rekuperation beim Bremsen vor Haltestellen oder Signalanlagen sowie beim Bergabfahren entstehen zeitlich und örtlich begrenzte Stromüberschüsse. Für die Energiemengen, die nicht durch eine intelligente Steuerung der Nebenverbraucher im Fahrzeug oder durch andere, gleichzeitig im Netzabschnitt befindliche und fahrostrombedürftige Fahrzeuge abgenommen werden, kommt eine stationäre Speicherung entlang der Strecke in Frage, damit die rekuperierte Energiemenge nicht ungenutzt verlorenght. Auch Dienstleistungen für das Stromsystem, wie Netzstabilisierung und Spitzenlastkappung, können dadurch erbracht werden.

Technisch können die Speicher als

- Schwungrad (Energiespeicherung in Form von Bewegungsenergie eines in Rotation versetzten Körpers, – dieser Fall wird hier betrachtet),
- Batterie,
- oder bei Fokus auf kurzfristige Speicherung als Kondensatoren (ggf. in Verbindung mit einem Batteriespeicher)

ausgeführt sein.

Tabelle 3-22: Steckbrief Maßnahme „Stationäre Energiespeicherung“

Kategorie	Investiv Ergänzung	
Musterunternehmen	moBiel	
Verkehrsmittel	Straßenbahn	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	4 %	des Endenergiebedarfs in der jeweiligen Sparte des Musterunternehmens
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	80 %	künftig mehr sinnvolle Einsatzgebiete aufgrund von Änderungen im Strommarkt
Technische Reife / Marktreife	Weiterentwicklungsbedarf in Hinblick auf Technologien und geeignete Betriebskonzepte	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	800.000 €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Da den beteiligten Musterunternehmen aufgrund der spezifischen Netzbegebenheiten keine geeigneten Praxiserfahrungen vorlagen, wurde als Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsabschätzung ein Pilotprojekt mit einem Schwungradspeicher bei der Stadtbahn Bielefeld (moBiel) herangezogen. Dabei wird die überschüssige Energie genutzt, um einen Rotationskörper in Bewegung zu setzen, der die auf diese Weise gespeicherte Energie zeitversetzt wieder abgibt.

Durch stationäre Energiespeicher kann **das betrachtete Verkehrsunternehmen** während der gesamten Nutzungsdauer rund 18 GWh Strom einsparen. Dies entspricht einer Einsparung in Höhe von 65 TJ (Endenergie) bzw. 144 TJ (Primärenergie) und damit 4 % des gesamten Energieverbrauchs der Straßenbahnen im Unternehmen.

Je mehr Energie in der bisherigen Situation ohne die Existenz der stationären Speicher verloren geht, umso höher ist der Nutzen der Maßnahme. Die aktuell entstehenden Verluste lassen sich über den Einsatz der mechanischen Bremse abschätzen – diese wird immer dann genutzt, wenn sich im betroffenen Netzabschnitt kein Abnehmer des rekuperierten Stroms befindet.

Oft kommt es auf peripheren Abschnitten eines Straßenbahnnetzes zu den höchsten relativen Verlusten. Hier stehen aufgrund des geringen Takts, größerer Haltestellenabstände oder auch wegen nicht verbundener Oberleitungsnetzabschnitte häufig keine anderen Fahrzeuge als Nutzer rückgespeicherter Energie zur Verfügung. Diese Netzbereiche stellen einen idealen Einsatzbereich für stationäre Speicher dar.

Das abgeschätzte **Gesamtpotenzial in Deutschland** der stationären Energiespeicherung beträgt mit rund 128 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 286 TJ/a (Primärenergieverbrauch) rund 3 % des gesamten Energieverbrauchs der Straßenbahnen. Dabei wird angenommen, dass sich die Maßnahme auf 80 % der Fahrleistung der Straßenbahnen übertragen lässt.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Die betriebswirtschaftliche Berechnung wurde auf Grundlage von Daten aus dem Projekt „Bremsenergierückgewinnung im Bielefelder Stadtbahnnetz durch den Einsatz von Schwungradspeichern“ berechnet. Dabei konnte eine Amortisation der Investitionen über die Nutzungsdauer der Infrastruktur erreicht werden.

Tabelle 3-23: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Stationäre Energiespeicherung“

Ausgaben	Straßenbahn		Hinweis
AHK stationäre Energiespeicher	825.000	€	
Restwert	0 %		der AHK
Anzahl der Energiespeicher im Unternehmen	0 %		
Nutzungsdauer	20	Jahre	
Einnahmen			

Fahrenergieeinsparung	96.000	€/kWh pro Jahr
Umfang		
Anzahl der Energiespeicher im Test	3	
Ergebnis		
Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	55.000	€/a
Barwert über die Nutzungsdauer	800.000	€

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Perspektiven und Diskussion

Es gibt Anzeichen, dass die Energiespeicherung in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird. Zum einen bestehen schon heute v. a. auf peripheren Abschnitten von Straßenbahnnetzen günstige Bedingungen, um Energieeffizienzpotenziale zu heben. Als Standorte der Speicheranlagen sind z. B. Wendeschleifen an Streckenendpunkten geeignet, auch weil dort oft geeignete Flächen im Eigentum des Verkehrsunternehmens zur Verfügung stehen.

Zum anderen wird sich die Wirtschaftlichkeit solcher Projekte verbessern, wenn die Kosten von Speichersystemen weiter sinken. Letzteres ist v. a. für Batteriespeicher zu erwarten, der damit an Bedeutung gewinnen wird. Getrieben u. a. durch die Marktentwicklung von E-Fahrzeugen schreitet die Technologiereife deutlich voran. Zudem können in Zukunft ausrangierte Batterien aus dem Fahrzeugbereich zweitverwendet werden. Gegen den hier betrachteten Schwungradspeicher spricht auch, dass die Speicherung von Rotationsenergie trotz des einfachen physikalischen Wirkungsprinzips nicht unkompliziert (Abfederung von Vibrationen, Kühlung, Kapselung) und die Verfügbarkeit der gespeicherten Energie zeitlich begrenzt ist.

Und nicht zuletzt steigt die Bedeutung von Speichern aufgrund einer wachsenden Einspeisung aus fluktuierenden (zeitlich variierenden) erneuerbaren Energiequellen. Systemdienstleistungen wie Netzstabilisierung und Spitzenlastkappung, die durch die Speicher erbracht werden können, bekommen dadurch eine höhere Bedeutung.

Fazit

In einem zukünftig voraussichtlich noch stärker durch erneuerbare Energien bestimmten Stromsektor wird sich der in vielen Fällen bereits gegebene betriebswirtschaftliche Nutzen weiter verbessern, wenn er zur Senkung von Preisspitzen führt. Darüber hinaus können Speicher wertvolle Bindeglieder zur Ladeinfrastruktur für elektrische Busse, Pkw und E-Bikes darstellen.

Bei heutigen Anwendungen kann jedoch eine Amortisation der getätigten Investitionen rein über die Senkung des Stromverbrauchs nicht kurzfristig erreicht werden. Zudem erfordert die Maßnahme eine umfassende Analyse des Gesamtsystems. Besonders kleinere Straßenbahnbetriebe, die prozentual höhere Einsparungen erreichen können als die oft schon hochoptimierten Netze in größeren Städten, verfügen dafür oft nicht über ausreichendes Know-how und finanzielle Mittel. Sie sollten daher unterstützt werden.

3.2.5.4. Weitere Maßnahmen

Eine von mehreren Optionen der Nutzung rekuperierter Energie und damit der Verringerung von Energieverlusten in der Schienenverkehrsinfrastruktur ist, sie ins öffentliche **Mittelspannungsnetz zurückzuspeisen**. Dies kann relevant werden, wenn keine Nutzung durch intelligent gesteuerte Nebenverbraucher oder andere Fahrzeuge im Netzabschnitt möglich und keine stationäre Zwischenspeicherung vorhanden ist – aber auch, wenn externe Verbraucher den Strom zu attraktiven Konditionen abnehmen. Technisch kann dies über den Einsatz zusätzlicher Wechselrichter, stellbare Gleichrichter oder Umkehrstromrichter erfolgen. In den Werkstattgesprächen im Rahmen des Projekts wurde es in der heutigen Situation jedoch nicht für wahrscheinlich gehalten, dass es für diese elektrische Energie geeignete Abnehmer gibt, sofern das Verkehrsunternehmen nicht über ein eigenes Mittelspannungsnetz verfügt. Eine derart stark fluktuierende, schlecht vorab zu prognostizierende Strombereitstellung ist für externe Abnehmer wenig attraktiv. Bei einer zukünftig voraussichtlich dynamischeren Gestaltung der Strompreise in einer „erneuerbaren Energiewelt“ werden jedoch bessere Bedingungen für die Vermarktung erwartet, insbesondere wenn die Einspeisung mithilfe von Zwischenspeichern zielgerichteter erfolgen kann.

Neben stationären Lösungen spielen auch **mobile Energiespeicher** eine Rolle. Dabei gibt es für die Option Schwungrad bisher keine vielversprechende Pilotanwendung. Hier herrscht Skepsis angesichts des Zusatzgewichts und v. a. bei der Straßenbahn aufgrund der Anfälligkeit für Erschütterungen. Hingegen wurde in Pilotprojekten in Frankreich und Spanien durch einen auf dem Fahrzeugdach untergebrachten mobilen Superkondensatorspeicher bzw. durch einen Li-Ionen-Batteriespeicher jeweils ein Sechstel bzw. ein Siebtel des Fahrstroms eingespart.³⁸

3.2.6. Straßenbahn und U-Bahn: Sonstige Infrastruktur

3.2.6.1. Fahrzeugabstellung in geschlossenen Hallen

Beschreibung der Maßnahme

Zu Betriebsbeginn werden die eingesetzten Fahrzeuge im Interesse des Komforts von Fahrgästen und Fahrpersonal, aber auch des störungsfreien Betriebs elektronischer Anlagen vorgeheizt. Werden Straßenbahnfahrzeuge im Freien abgestellt, sinkt die Innenraumtemperatur an kalten Tagen sehr stark ab. Das Vorheizen kann bis zu 30 Minuten in Anspruch nehmen und an sehr kalten Wintertagen die Stromversorgungsinfrastruktur durchaus an ihre technischen Grenzen bringen. Die DVB berichtete z. B. von einer Havarie der Oberleitung auf dem Betriebshof aufgrund von Überhitzung. Für Extremtage quantifizierte das die Einsparung auf bis zu 50 % der am gesamten Tag benötigten Heizenergie.

Das starke Absinken der Innenraumtemperatur lässt sich verhindern, indem die Fahrzeuge auf dem Betriebshof nicht im Freien, sondern in geschlossenen Hallen abgestellt werden. Das Vorheizen der Fahrzeuge lässt sich dadurch vermeiden, während die Halle i. d. R. nur leicht temperiert wird. Es wurde beispielhaft die Errichtung einer Halle zur Abstellung von ca. 70 Fahrzeugen auf einem Betriebshof der DVB betrachtet.

³⁸ Testbetrieb in Paris (Linie 3) mit Supercap (Projekt STEEM): ALSTOM 2011

Li-Ion Onboard Speicher in Vitoria-Gasteiz im Rahmen von Osiris – Einsparung 13,7 % im Testbetrieb (Goikoetxea 2015), in Stockhausen et al. 2017

Tabelle 3-24: Steckbrief Maßnahme „ n“

Kategorie	Investiv Ergänzung	
Musterunternehmen	DVB	
Verkehrsmittel	Straßenbahn	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	2 %	des Endenergiebedarfs in der jeweiligen Sparte des Musterunternehmens
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	30 %	steigende Relevanz des Neubaus von Betriebshöfen; auf bestehenden Höfen bauliche Beschränkungen
Technische Reife / Marktreife	Verfügbar; Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu innovativer Gebäudetechnik und Kostenreduktion	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	-5,4 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung
Abschätzung Umweltkosteneinsparung	-2,1 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Im betrachteten Anwendungsfall **in einem Musterunternehmen** könnten durch Abstellung der Straßenbahnen in geschlossenen Hallen über die gesamte Nutzungsdauer rund 35 GWh Strom eingespart werden (2 % des Verbrauchs der Straßenbahnen im Musterunternehmen). Dies entspricht 127 TJ (Endenergie) bzw. 257 TJ (Primärenergie).

Weitere Energieeinsparungen könnten durch den Einbezug von Weichen in die Halle erzielt werden, denn dadurch wird Energie für die Weichenheizung eingespart. Dies war in zugrunde gelegten Musterprojekten z. B. bei der Straßenbahn in Ulm jedoch nicht der Fall und die erzielbare zusätzliche Einsparung konnte daher nicht quantifiziert werden konnte.

Das abgeschätzte **Gesamtpotenzial in Deutschland** der Fahrzeugabstellung in geschlossenen Hallen beträgt mit rund 97 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 196 TJ/a (Primärenergieverbrauch) rund 2 % des gesamten Energieverbrauchs der Straßenbahnen. Die Abschätzung basiert auf der Annahme, dass 30 % der Fahrzeuge in geschlossenen Hallen abgestellt werden können.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Die Investitionskosten wurden anhand von Angaben des Musterunternehmens kalkuliert. Für das betrachtete große Bauwerk für ca. 70 Fahrzeuge von je 30 m Länge werden Baukosten in Höhe von 8,3 Mio. € alleine für den Kalthallenbau erwartet.

Es ergab sich somit bei der gewählten Maßnahmenabgrenzung und unter den individuellen Randbedingungen des betrachteten Praxispartners, dass sich eine Umsetzung der Maßnahme bei betriebswirtschaftlicher Betrachtung über den betrachteten Zeitraum von 30 Jahren nicht amortisiert.

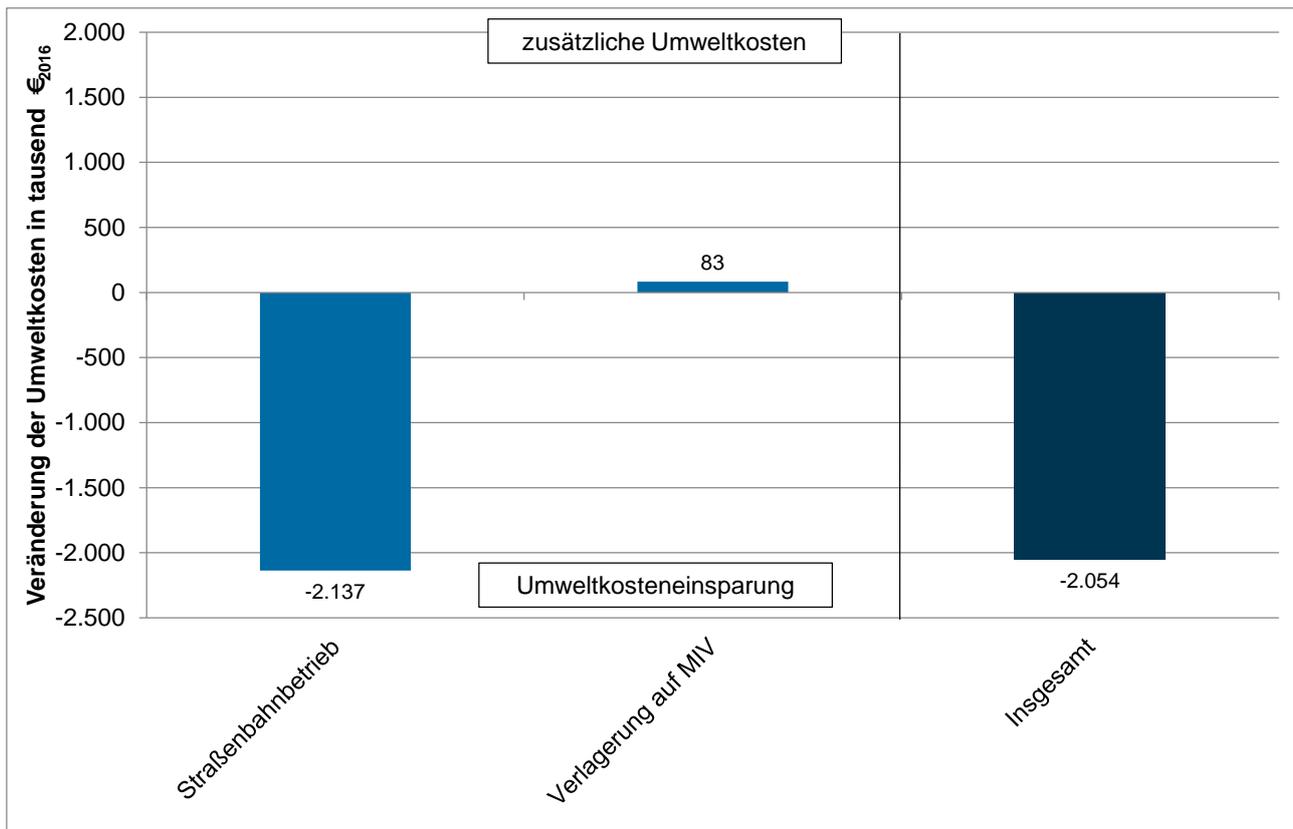
Tabelle 3-25: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Fahrzeugabstellung in geschlossenen Hallen“

Ausgaben	Straßenbahn		Hinweis
AHK Abstellanlagen	8,3 Mio.	€	
Restwert	0 %	der AHK	
Nutzungsdauer	30	Jahre	
Einnahmen			
Heizenergieeinsparung	126.000	€/a	
Umfang			
Abstellhalle für	70	Straßenbahnen	
Ergebnis			
Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	-150.000	€/a	
Barwert über die Nutzungsdauer	-5,4 Mio.	€	
Hypothetischer Anstieg des Fahrkartenpreises	0,1 %		Bei 100 % Nutzerfinanzierung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Einfluss auf die Umweltkosten

Die Nutzung einer geschlossenen Abstellung für die Straßenbahnen führt im Musterunternehmen zu einer Verringerung der Umweltkosten von insgesamt über 2 Mio. €. Haupttreiber sind die vermiedenen Treibhausgasemissionen durch die Stromeinsparung. Dadurch sinken die Umweltkosten um 2,1 Mio. € in der gesamten Nutzungszeit. Ausgehend von der Annahme einer vollständigen Nutzerfinanzierung (Erhöhung der Fahrscheinpreise) ergibt sich eine Verkehrsverlagerung auf den MIV. Diese zusätzlichen Pkw-Fahrten verursachen zusätzliche Umweltkosten in Höhe von rund 80 Tsd. €.

Abbildung 3-8: Veränderung der Umweltkosten durch die geschlossene Abstellung

Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Perspektiven und Diskussion

Eine Abstellhalle bietet neben der Heizenergieeinsparung weitere Vorteile: Personalkosten zur Schneeräumung auf dem Betriebshof und Eisentfernung am Fahrzeug werden vermieden. Der wetterbedingte Verschleiß an den Fahrzeugen nimmt ab und sie bietet einen besseren, wenn auch nicht unbedingt vollständigen Schutz vor Vandalismus. Sofern die Weichenharfe im Vorfeld des Abstellbereiches mit in die Halle einbezogen wird, können die energetisch sehr aufwändigen Weichenheizungen auf dem Betriebshofgelände vermieden werden. Zudem benötigt die Halle in diesem Fall nur wenige kostenerhöhende Einfahrtstore, die Kosten erhöhen und über die Wärme entweichen kann. Eine reduzierte Variante ist die überdachte Abstellung ohne geschlossene Seitenwände, die die genannten Vorteile zumindest teilweise bietet.

Die Neuerrichtung von Betriebshöfen ist nach langen Jahren von Stagnation und Kapazitätenminderung angesichts gegenwärtig wachsenden Fahrgastaufkommens wieder verstärkt ein Thema. Bei Neu- oder Umbau wird mittlerweile eine geschlossene oder zumindest überdachte Abstellung in den allermeisten Fällen in Erwägung gezogen, so auch bei den betrachteten Praxispartnern. Hallen sollten durch klimafreundliche Baustoffe, photovoltaische Nutzung der Dachflächen, Solarthermie, Begrünung sowie geothermische Heizung oder Anschluss an ein bestehendes Fernwärmenetz auf den ökologischen Nutzen hin optimiert sein.

Fazit

Durch die Einsparung von Heizkosten kann keine betriebswirtschaftliche Amortisation der Baukosten für eine Abstellhalle erreicht werden. Aufgrund der weiteren Nutzen, die eine solche Halle bietet, spielt die geschlossene Fahrzeugabstellung dennoch bei der Neuerrichtung von Betriebshöfen eine wichtige Rolle.

Es sollte jedoch immer auch auf die viel höhere Zahl der bestehenden Betriebshöfe geblickt werden. Die nachträgliche Errichtung von Hallen ergäbe auch hier Sinn. Jedoch sind die Höfe ohnehin oft stark ausgelastet und eine Hallenkonstruktion erfordert zusätzlichen Platzbedarf. Dabei geht es um Flächen, die das Bauwerk an sich beansprucht, aber auch um zusätzliche Bereiche, die aufgrund des Brandschutzes freigehalten werden. Auch der Bauprozess im laufenden Betrieb ist eine große Herausforderung, die intelligente Lösungen erfordert. Eine Unterstützung der Baukosten und des Planungsprozesses durch externe Förderung könnte das Thema bei den Verkehrsunternehmen stärker auf die Agenda bringen.

3.2.6.2. Wärmetauscher zur Nutzung von Tunnelabwärme

Beschreibung der Maßnahme

Unterirdische Strecken von U- und Stadtbahnen weisen stets Temperaturunterschiede zur Außenluft und zum umgebenden Erdreich auf. Er entsteht einerseits durch die natürlicherweise konstantere Temperatur im Untergrund, andererseits durch die Wärmeabgabe durch Fahrzeuge, sonstige Technik und Fahrgäste.

Technische Lösungen zur Nutzung dieses Gradienten, die bei Neubaustrecken eingesetzt werden (s. u.), kommen im Bestand kaum in Frage. Aber auch in bestehenden Systemen lassen sich Potenziale heben. So installierte die BVG im U-Bahn-Netz mehrere Luft-Wasser-Wärmepumpenanlagen, die die Gebäudeheizung angrenzender Liegenschaften unterstützen. Grundlage der hier gezeigten Berechnungen ist eine Pilotanlage, die die Heizung eines BVG-eigenen 1.200 m² großen Gebäudes in Tunnelnähe unterstützt.

Tabelle 3-26: Steckbrief Maßnahme „Nutzung von Tunnelabwärme“

Kategorie	Investiv Ergänzung	
Musterunternehmen	BVG	
Verkehrsmittel	U-Bahn	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	8,4 GWh	
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	30 %	der unterirdischen U-Bahn-Stationen
Technische Reife / Marktreife	Bisher nur Pilotprojekte; Forschungs- und Entwicklungsbedarf	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	-2,4 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung
Abschätzung Umweltsparung	-307.000 €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Bei der BVG findet momentan eine Studie zur Ermittlung weiterer Potenziale für Wärmepumpenanlagen statt. Ein Kriterium bei der Standortidentifikation ist, ob für die gewonnene Wärme oder auch Kälte ein Abnehmer zur Verfügung steht. Dabei muss es sich nicht um eine unternehmenseigene Liegenschaft handeln – die Wahrscheinlichkeit, dass in energetisch sinnvoller Entfernung Gebäude in Frage kommen, sollte in Abschnitten mit unterirdischer Streckenführung prinzipiell hoch sein. Jedoch ist ein enger räumlicher Zusammenhang zwischen Wärmepumpe und Abnehmer zwingend erforderlich. In einer ersten Abschätzung wurde davon ausgegangen, dass 30 % der unterirdischen Haltestellen mit Wärmetauschern ausgerüstet werden können. Durch den Einsatz von Wärmetauschern zur Nutzung von Abwärme in Tunnelstrecken könnten dann **im Musterunternehmen** in der gesamten Nutzungsdauer auf die Wärmeerzeugung von rund 8,4 GWh mit Ölheizungen verzichtet werden. Dadurch ließe sich eine Einsparung in Höhe von 36 TJ (Endenergie) bzw. 42 TJ (Primärenergie) erzielen.

Wichtigster Einflussfaktor auf die nutzbare Abwärme ist die Temperatur im Tunnel. Diese schwankt saisonal und ist zudem u. a. durch Höhenlage, Abschirmung nach außen, Querschnitt und Bedienungsfrequenz geprägt, aber auch durch technische Eigenschaften der Fahrzeuge. Ältere Baureihen produzieren möglicherweise mehr Abwärme, weil sie nicht rückspeisefähig sind – und daher v. a. mechanisch bremsen. Zusätzlich sind sie schlechter wärmegeklämt als Neufahrzeuge. Umgekehrt kann der Trend zu Klimatisierung und hinzukommenden elektronischen Verbrauchern im Fahrzeug jedoch eine zusätzliche Wärmeentwicklung im Tunnel verursachen.

Das abgeschätzte **Gesamtpotenzial in Deutschland** der Nutzung von Tunnelabwärme beträgt rund 8 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 9 TJ/a (Primärenergieverbrauch). Dabei wurde ebenfalls davon ausgegangen, dass sich die Abwärme an 30 % aller unterirdischen Stationen gewinnen lässt.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Die betriebswirtschaftliche Betrachtung berücksichtigt die Anschaffung und den Einbau der Wärmepumpenanlagen und der Warmwasserleitungen sowie auf der „Habenseite“ die in der angrenzenden Liegenschaft eingesparten Heizkosten. Tiefbaukosten entstanden im betrachteten Fall nicht. Längere Leitungsnetze und Tiefbauarbeiten v. a. im öffentlichen Straßenraum können aber im Einzelfall zu einer relevanten Verschlechterung der Bewertung aus betriebswirtschaftlicher Sicht führen.

Bei der bisherigen Technologie- und Kostensituation ist eine betriebswirtschaftliche Amortisation der Investitionen für die Wärmepumpenanlagen nicht zu erwarten. Es ist jedoch zu betonen, dass sich die Maßnahme noch in einem frühen technischen Stadium befindet. Daher wurde für Anlagenausfälle aufgrund technischer Fehlfunktionen auch ein 10-prozentiger Risikoabschlag auf die Energieeinsparung angesetzt.

Tabelle 3-27: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Nutzung von Tunnelabwärme“

Ausgaben	U-Bahn	Hinweis
AHK Wärmetauscher	66.000	€
Restwert	0 %	der AHK
Nutzungsdauer	10	Jahre

Einnahmen

Heizenergieeinsparung	1000	€/a
-----------------------	------	-----

Umfang

Wärmepumpen	42	Anzahl
-------------	----	--------

Ergebnis

Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	-240.000	€/a
---------------------------------------	----------	-----

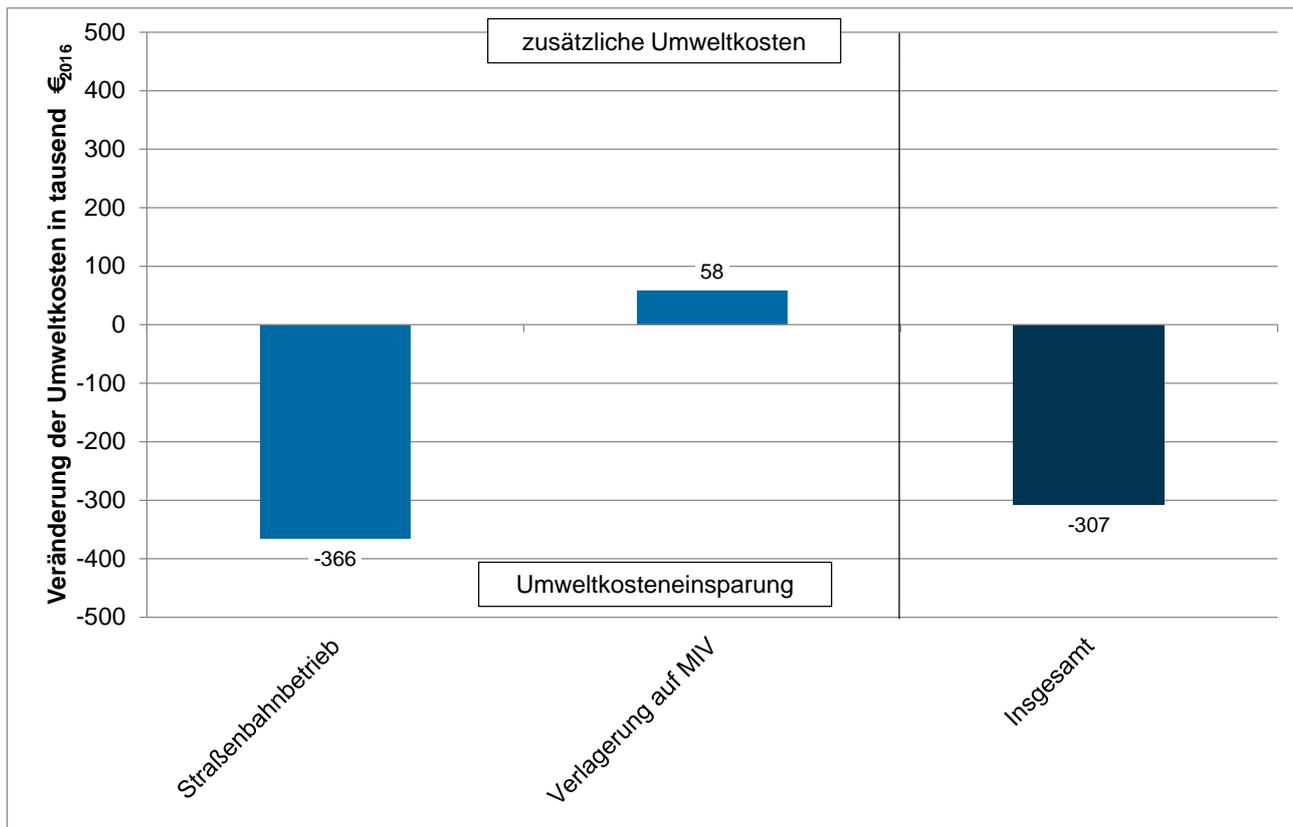
Barwert über die Nutzungsdauer	-2,4 Mio.	€
--------------------------------	-----------	---

Hypothetischer Anstieg des Fahrkartenpreises	0,03 %	Bei 100 % Nutzerfinanzierung
--	--------	------------------------------

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Einfluss auf die Umweltkosten

Die Verwendung von Wärmetauschern zur Nutzung der Tunnelabwärme bei den U-Bahnen führt im Musterunternehmen zu einer Verringerung der Umweltkosten von insgesamt rund 0,3 Mio. €. Haupttreiber sind die vermiedenen Treibhausgasemissionen durch die Reduktion des Heizwärmebedarfs (Ölheizung). Dadurch sinken die Umweltkosten um 366.000 € in der gesamten Nutzungszeit. Ausgehend von der Annahme einer vollständigen Nutzerfinanzierung (Erhöhung der Fahrpreise) ergibt sich eine Verkehrsverlagerung auf den MIV. Diese zusätzlichen Pkw-Fahrten verursachen zusätzliche Umweltkosten in Höhe von 58.000 €.

Abbildung 3-9: Veränderung der Umweltkosten durch Nutzung von Tunnelabwärme

Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Perspektiven und Diskussion

Beim Neubau von Tunnelstrecken werden vermehrt Möglichkeiten genutzt, um den Temperaturgradienten energetisch nutzbar zu machen, z. B. Absorberleitungen innerhalb der Tunnelwände.³⁹

Nachgerüstete Technologien zur Nutzung der Tunnelabwärme befinden sich noch in einem Entwicklungsstadium, weshalb das Energieeffizienzpotenzial mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Dies gilt zum einen für die technische Umsetzung und Positionierung der einzelnen Anlage. So wird die Anordnung der Anlage im Tunnel dadurch eingeschränkt, dass existierende Zugänge wie Versorgungsschächte genutzt werden sollten. Ansonsten wird die unterirdische Strecke ungewollt mit einer zusätzlichen, schlecht zugänglichen Brandlast versehen sowie einer Schwachstelle, an der das Eindringen von Wasser verhindert werden muss. Zum anderen kann auch die Abschätzung des Potenzials für den Gesamt-ÖSPV nur auf Basis wenig gesicherter Annahmen durchgeführt werden.

Fazit

Die Pilotanwendungen erbringen momentan noch ein eher geringes Energieeinsparpotenzial. Eine betriebswirtschaftlich vorteilhafte Anwendung der Technologie ist bisher nicht absehbar. Dass insgesamt jedoch hohe energetische Potenziale in den Tunnelstrecken zur Verfügung stehen, zeigt sich bei Neubauprojekten. Um auch Nachrüstlösungen weiter zu entwickeln und die Einsatzpoten-

³⁹ S. Stadtbahn Stuttgart (Funk 2013).

ziale genauer zu untersuchen, sollten Anlagenhersteller, Anwender und Fördermittelgeber ihre Aktivitäten verstärken.

3.2.6.3. Weitere Maßnahmen

Jenseits der Stromversorgungsinfrastruktur finden sich Potenziale für Energieeinsparmaßnahmen etwa bei der **Weichenheizung**. Hier wurden erste Pilotprojekte zur Nutzung von **Fernwärme oder bodennaher Geothermie** anstelle von elektrischer Energie umgesetzt. Energieeffizienzpotenziale an Haltestellen spielten in den Expertengesprächen eine untergeordnete Rolle, die wichtigsten Themen sind hier die **LED-Beleuchtung** (vgl. Kapitel 3.2.4.7) sowie rekuperationsfähige Fahrtreppen. Jedoch liegen auch hier aus einer ersten Praxisanwendung in Bern noch keine Ergebnisse vor.⁴⁰

Bei der Trassierung von Schienenstrecken gibt es Planungsgrundsätze, die die Energieeffizienz im Betrieb erhöhen: Um die Anzahl der Anfahr- und Bremsvorgänge zu verringern und dem energieeffizientesten Geschwindigkeitsprofil näher zu kommen, sind **unabhängige** oder **besondere Bahnkörper**, die baulich vom übrigen Verkehrsraum abgetrennt sind, von Vorteil. Positiv wirkt sich zudem die Minimierung energiezehrender Kurvenwiderstände mittels einer möglichst **geradlinigen Streckenführung** aus. Insbesondere bei unterirdischer Trassierung kann versucht werden, Haltestellen bevorzugt an den Scheitelpunkten des **Höhenprofils** anzulegen, um so bei der Ankunft an der Haltestelle den nötigen Bremswiderstand durch eine Steigung zu reduzieren und anschließend beim Anfahren die potenzielle Energie eines Gefälles zu nutzen. Letztendlich verringern auch **vergrößerte Haltestellenabstände** die Anzahl von Anfahrvorgängen und stellen somit eine Energieeffizienzmaßnahme dar. Jedoch waren sich die Experten im Rahmen des Projekts weitgehend einig, dass bei der Streckenplanung andere Planungsgrundsätze wie konkurrierende Nutzungen des Straßenraums, Erreichbarkeit der Haltestellen, Zwangspunkte und Baugrundbeschaffenheit wenig Spielraum für solche Erwägungen bieten. Dies gilt ganz besonders in bestehenden Siedlungsgebieten, aber auch in neu zu erschließenden Quartieren.

3.2.7. Bus, Straßenbahn, U-Bahn: Betrieb

3.2.7.1. Buszüge zur Bewältigung von Lastspitzen

Beschreibung der Maßnahme

Im ländlichen und suburbanen Raum bestehen besonders ausgeprägte Nachfragespitzen im morgendlichen Schüler- und Berufspendlerverkehr und in den späten Nachmittagsstunden. Häufig werden für diese Fahrten (im Vergleich zum Solobus längere) Gelenkbusse eingesetzt. Werden dieselben Fahrzeuge auch in Randzeiten und um die Mittagszeit eingesetzt, sind sie schlecht ausgelastet, auch und gerade wenn die Taktfrequenz reduziert wird. Wird die Beförderungskapazität in diesen Stunden durch Einsatz kleinerer Fahrzeuge stärker an die Nachfrage angepasst, erhöht dies die Energieeffizienz, ohne dass gleichzeitig Abstriche bei der Angebotsqualität entstehen: Der Verbrauch pro Fahrgastkilometer wird verringert.

Eine mögliche Lösung stellen Gespanne aus einem (im Vergleich zum Gelenkbus kürzeren) Solobus und einem nicht angetriebenen Personenanhänger dar. Der Anhänger kann entsprechend der Nachfrage an- und abgekuppelt werden. Um Mehrverbräuche aufgrund von „Übermotorisierung“ zu vermeiden, „erkennt“ das Zugfahrzeug, ob es mit oder ohne Anhänger fährt. Die Motorsteue-

⁴⁰ Meyer 2016

ung wird entsprechend der aktuellen Fahrzeugmasse automatisch angepasst. Im hier betrachteten Praxisbeispiel ersetzt ein Unternehmen des ländlichen Bedienungsgebiets vier Gelenkbusse und zwei Solobusse durch vier Gespanne. Die Anhänger werden zu nachfrageschwachen Zeiten abgekuppelt und im Einsatzgebiet geparkt. Beispielsweise wird der Personenanhänger am Ende der morgendlichen Hauptverkehrszeit auf eine Stellfläche an einem Schulstandort, Arbeitsplatzschwerpunkt oder einer S-Bahn-Station abgestellt und nachmittags wieder angekuppelt. Ein Gespann bietet mit ca. 130 Plätzen zudem deutlich mehr Kapazität als ein Gelenkbus mit ca. 100 Plätzen.

Tabelle 3-28: Steckbrief Maßnahme „Buszüge zur Bewältigung von Lastspitzen“

Kategorie	Investiv Ersatz	
Musterunternehmen	KViP	
Verkehrsmittel	Bus	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	4 %	des Endenergiebedarfs in der betroffenen Sparte des Musterunternehmens
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	20 %	der Fahrleistung der Linienbusse mit 18 t zGG oder mehr
Technische Reife / Marktreife	am Markt verfügbar, aber Angebotsdefizite	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	200.000 €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Aufgrund stark abweichender Erfahrungen mit dem Einsatz von Anhängerzügen wurde die Kraftstoffeinsparung auf der Basis von Fahrzeugdaten aus der VDV-Schrift 2318 berechnet. Die Hochrechnung auf das gesamte Musterunternehmen erfolgte unter der Annahme, dass zwei Anwendungsfälle möglich sind. Eine Hochrechnung auf alle in diesem Unternehmen eingesetzten Gelenkbusse erfolgte nicht, da nicht alle Gelenkbusse im Schülerverkehr eingesetzt werden und daher der Ersatz durch Anhängerzüge nicht für jeden Gelenkbus aus betrieblicher Sicht sinnvoll ist. Durch diese Umsetzung der Maßnahme ließen sich **im Musterunternehmen** während der gesamten Nutzungszeit rund 400 Tsd. l Dieselkraftstoff einsparen. Dies entspricht einer Einsparung in Höhe von 14 TJ (Endenergie) bzw. 18 TJ (Primärenergie) und damit 4 % des Verbrauchs der Busse im Musterunternehmen.

Der genaue Umfang der Energieeinsparung hängt stark vom jeweiligen Einsatzkonzept ab, das wiederum vom zeitlichen Verlauf des Fahrgastaufkommens bestimmt ist.

Das abgeschätzte **Gesamtpotenzial in Deutschland** des Einsatzes von Buszügen beträgt mit rund 438 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 537 TJ/a (Primärenergieverbrauch) etwa 2 % des gesamten Energieverbrauchs der Busse im ÖSPV. Dabei wird angenommen, dass die Maßnahme auf 20 % der Fahrleistung der Busse in Deutschland anwendbar ist.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Die Anschaffung des Buszugs verursacht pro Sitzplatz vergleichbare Kosten wie ein Gelenkbus, allerdings werden die Anschaffungskosten der ersetzten Solobusse eingespart. Die Instandhaltungskosten der Anhängerzüge wurden als doppelte Instandhaltungsaufwendungen eines Solobusses berechnet und zusätzlich mit einem Risikoaufschlag von 10% belegt, um den teilweise schlechten Erfahrungen einiger Musterunternehmen mit bestimmten Anhängerfabrikaten Rechnung zu tragen. Die Kraftstoffeinsparung gleicht die ggf. höheren Instandhaltungsaufwendungen mehr als aus. Insgesamt erzielt die Maßnahme daher eine betriebswirtschaftlich positive Bilanz.

Tabelle 3-29: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Buszüge zur Bewältigung von Lastspitzen“

Ausgaben	Solo- / Gelenkbus		Hinweis
AHK Buszug	400.000	€	
AHK konv. Fzg.	240.000 / 330.000	€	
Anzahl Buszüge	8		Als Ersatz von 8 Gelenkbussen und 4 Solobussen im Schülerverkehr
Restwert Anhänger	12.000	€	
Restwert konv. Fzg.	14.000 / 20.000	€	
Nutzungsdauer	12	Jahre	
Einnahmen			
Kraftstoffeinsparung	14.000	€/a pro Szenario	
Ergebnis			
Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	38.500	€/a	
Barwert über die Nutzungsdauer	200.000	€	

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Perspektiven und Diskussion

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt, dass eine Erhöhung der Anschaffungskosten um 20 % dazu führen würde, dass die Maßnahme unwirtschaftlich wird, d.h. die Anschaffungsmehrkosten nicht mehr durch die Einsparungen kompensiert würden.

Der Anhängerzug stellt eine grundsätzlich geeignete Möglichkeit dar, um die Fahrzeuggröße bedarfsweise und temporär an das Fahrgastaufkommen anzupassen. Die Alternative, stattdessen im täglichen Fahrzeugumlauf zwischen Solo- und Gelenkbus zu wechseln, würde hingegen den motorisierten und instandhaltungsintensiven Anteil des Fuhrparks im Vergleich unnötig vergrößern. Die andere mögliche Lösung, Solobusse sowohl zur Abdeckung der Grundlast als auch während der Hauptverkehrszeiten durch weitere Solobusse zur Verstärkung einzusetzen, würde ebenfalls den Bedarf an Fahrzeugen und darüber hinaus auch an Fahrpersonal erhöhen.

Anhängerzüge werden aber in anderen Praxisbeispielen auch auf andere Weise eingesetzt. So wird bei der MVG in München nicht im Laufe des Tages gekuppelt, sondern sie werden nur am Wochenende abgehängt. Hintergrund ist, dass das Fahrgastaufkommen in Großstädten gleichmäßiger ist. Zudem dürfte es dort schwieriger sein, geeignete Flächen zum Abstellen der Anhänger zu finden.

Ein häufig auftretender Nachteil ist, dass sich durch die Verbindung eines Solobusses regulärer Größe und eines meist ca. 10 m langen Personenanhängers ein im Verhältnis zum Gelenkbus längeres Gespann ergibt. Vor allem als Bucht ausgeführte Haltestellen müssen ggf. erweitert werden, damit das Gespann beim Halt gestreckt stehen kann. Ein weiterer Einwand bezieht sich auf den Fahrkomfort im Anhänger, der stärker zu Schwankungen neigt als das Zugfahrzeug, sowie auf das subjektive Sicherheitsgefühl von Fahrgästen, die räumlich getrennt vom Fahrpersonal reisen.

Die Gründe, warum Anhängerzüge in Deutschland gegenwärtig noch eine untergeordnete Rolle spielen, sind aber in anderen Hemmnissen zu suchen: Buszüge verfügen seit den 1950er Jahren nicht mehr über eine generelle Straßenzulassung. In § 32 StVZO wird die Gesamtlänge eines Fahrzeugs oder Gespanns auf 18,75 m begrenzt, was die hier besprochenen Gespanne von bspw. 23 m Länge ausschließt. Jedoch wird in der jüngeren Vergangenheit durch Landes- bzw. Kommunalbehörden vermehrt der Ermessensspielraum ausgenutzt. Teils werden streckenbezogene, teils pauschale Sondergenehmigungen erteilt – jedoch immer nur für wenige Jahre. Dies macht die Anschaffung eines Busanhängers für den potentiellen Betreiber zu einem hohen betriebswirtschaftlichen Risiko. Aufgrund der nicht oder selten erteilten Zulassung ist das Angebot an Anhängern und kompatiblen Zugfahrzeugen zurzeit klein und wird als technisch rückständig wahrgenommen. Nutzer bemängeln in der Folge hohe Ausfallzeiten der Fahrzeuge. Betriebswirtschaftlich müssen bei noch nicht erprobten Fahrzeugkonzepten Risikoaufschläge angesetzt werden, denn es ist nicht sicher, dass die Anhänger, wie aus technischer Sicht zu erwarten, geringere Instandhaltungskosten und eine höhere Lebensdauer als die Zugfahrzeuge vorweisen.

Fazit

Trotz betriebswirtschaftlich eigentlich guter Perspektiven spielen Anhängerzüge in der Praxis kaum eine Rolle. Durch den Abbau rechtlicher Hindernisse und eine Förderung des Einsatzes bedarfsgerechter Fahrzeuge könnte ein Prozess in Gang gesetzt werden. Eine anspringende Marktentwicklung sollte standardisierte, für Betreiber und Fahrpersonal gut handhabbare, technisch ausgereifte Modelle in unterschiedlichen Größen hervorbringen. Dann könnten die in Deutschland in der Vergangenheit und international auch heute noch verbreiteten Busgespanne wieder ein starkes Instrument für mehr Energieeffizienz werden. Bei Batteriebussen könnten mit zusätzlichen Antriebs-Akkus ausgestattete Anhänger zudem den Vorteil haben, dass analog zur Fahrzeuggröße auch die gewichtsintensiv mitgeführte Batteriekapazität an den Bedarf angepasst wird.

3.2.7.2. Busbeschleunigung

Beschreibung der Maßnahme

Unter dem Begriff „Busbeschleunigungsprogramm“ werden unterschiedliche verkehrsplanerische (nicht aber fahrzeugantriebsseitige) Einzelmaßnahmen zusammengefasst, die der Fahrzeitreduktion dienen. Im hier betrachteten Fall richtete die Kommune auf einer hochfrequentierten innerstädtischen Linie eines Musterunternehmens (Linie M27 der BVG) zusätzliche Busspuren ein und dehnte die Geltungsdauer bestehender Busspuren aus. Die Anordnung von Parkplätzen wurde geändert, um den Lade- und Lieferverkehr besser abzuwickeln und so die Störung des Busverkehrs zu unterbinden. Zahlreiche Ampelschaltungen wurden verbessert und intelligent gesteuert

und man richtete in einem Fall eine Busschleuse ein, die eine Anfahrt des Busses unmittelbar vor der Grünphase des Pkw-Verkehrs ermöglicht. Einige Haltestellen wurden im Zuge der ohnehin anstehenden Schaffung von Barrierefreiheit zu Kaphaltestellen umgebaut, wodurch das Einfädeln der Busse von der Bucht in den fließenden Verkehr entfällt.

Busbeschleunigungsprogramme sollen i. d. R. zu einer schnelleren, ungestörteren, gleichmäßigeren und damit tendenziell auch verbrauchsärmeren Fahrt führen. Im hier betrachteten Fall zielen die Maßnahmen jedoch primär auf eine geringere Anzahl verspäteter Fahrten und erforderlicher Verstärkerfahrten ab und damit auf eine Reduzierung des Fahrzeugeinsatzes.

Tabelle 3-30: Steckbrief Maßnahme „Busbeschleunigung“

Kategorie	Nicht-Investiv	Da Infrastrukturinvestitionen durch die Kommune getragen werden.
Musterunternehmen	BVG	
Verkehrsmittel	Bus	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	1 %	des Endenergiebedarfs in der jeweiligen Sparte des Musterunternehmens
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	20 %	der innerorts-Fahrleistung der Busse mit zGG. >= 18 t
Technische Reife / Marktreife		bekannte Maßnahmen verfügbar; Forschungs- und Entwicklungspotenzial zu neuen digitalen Steuerungsmöglichkeiten
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	18,8 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Aufgrund der o. g. unterschiedlichen Zielsetzungen von Busbeschleunigungsmaßnahmen, die alle energieeffizienzrelevant sind, ist eine Quantifizierung der Einsparungen schwierig. Zudem handelt es sich immer um langwierige Planungs- und Umsetzungsprozesse, während derer es zu einem veränderten Verkehrsaufkommen kommen kann, was die Vorher-nachher-Vergleiche erschwert.

Basierend auf einer Berechnung der BVG für eine konkrete Linie wurde das Potenzial der Busbeschleunigung **im Musterunternehmen** durch entfallende Verstärkerfahrten auf rund 6,4 Mio. l Dieselkraftstoff abgeschätzt. Bei Hochrechnung auf 2/3 der Metrobuslinien des Unternehmens entspricht dies einer Einsparung in Höhe von 227 TJ (Endenergie) bzw. 280 TJ (Primärenergie) bzw. 1 % des Verbrauches der Bussparte im Musterunternehmen.

Das abgeschätzte **Gesamtpotenzial in Deutschland** von Busbeschleunigungsprogrammen beträgt mit rund 33 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 44 TJ/a (Primärenergieverbrauch) etwa 0,1 % des gesamten Energieverbrauchs der Busse im ÖSPV. Dabei wurde angenommen, dass die Maßnahme auf 20 % der Innerortsfahrleistung von Bussen mit einem zGG von über 18 t angewendet werden kann.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Die Investitionen wurden nicht einkalkuliert, da diese auf Seiten der Stadt liegen und daher für das Verkehrsunternehmen kostenneutral sind. Somit ist eine betriebswirtschaftliche Vorteilhaftigkeit der Maßnahme, unabhängig von der real erzielten Kraftstoffeinsparung, selbsterklärend.

Tabelle 3-31: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Busbeschleunigung“

Ausgaben	Solo- / Gelenkbus		Hinweis
AHK Busbeschleunigung Infrastruktur	0	€	Annahme: Kommune finanziert die Umsetzung
AHK konv. Fzg.	300.000	€	
Restwert Busbeschleunigung	0 %	der AHK	
Restwert konv. Fzg.	10 %	der AHK	
Nutzungsdauer Busse	12	Jahre	
Einnahmen			
Kraftstoffeinsparung	40.300	€/a	
Gehaltseinsparung	120.000	€/a pro Linie	
Umfang			
Buslinien	11	Anzahl	
Ergebnis			
Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	2 Mio.	€/a	
Barwert über die Nutzungsdauer	18,8 Mio. €	€	

Quelle: Öko-Institut, KWC und Praxispartner

Perspektiven und Diskussion

Beschleunigungsmaßnahmen im Straßenraum, die einer effizienteren Abwicklung des Busverkehrs dienen, wirken nur in einem sinnvollen Gesamtkonzept. Die Effekte müssen kritische Schwellen überschreiten: Es müssen für den Fahrplan relevante Zeiteinsparungen erreicht und damit möglichst ganze Fahrzeugumläufe oder, wie in diesem Beispiel, Verstärkerfahrten eingespart werden. Die betriebswirtschaftliche Betrachtung zeigt: Wo aufgrund eines aktuell störungsanfälligen Verkehrsflusses eine Wirksamkeit von Beschleunigungsmaßnahmen prognostiziert werden kann, stellen sie oftmals für das Verkehrsunternehmen eine sehr attraktive Maßnahme dar. Auch die Kommune kann profitieren: Zwar trägt sie meist die Investitionen, jedoch kann sie bei sorgfältiger Planung und Umsetzung eine Amortisation über ein verbessertes Betriebsergebnis ihres Verkehrsunternehmens erreichen.

Durch Fahrdauereinsparungen und ungestörtere Fahrt wird auch die Attraktivität für potenzielle Fahrgäste erhöht. Ein weiterer positiver Nebeneffekt kann sein, dass aufgrund der bei Umbauten

vorzunehmenden Errichtung von Hochbord-Haltestellen auch das Kneeling (s. Abschnitt 3.2.4.6) entfallen kann.

Ein tatsächliches Erreichen der geplanten Beschleunigung erfordert auch die ordnungsrechtliche Durchsetzung des Vorrangs des Busverkehrs gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern, die Hindernisse auf Busspuren darstellen können.

Die mit einer Busbeschleunigung verbundenen, teils langwierigen Baumaßnahmen treffen oft auf Akzeptanzprobleme. Außerdem gibt es vermehrt konkurrierende Flächennutzungsansprüche an den Straßenraum, z. B. durch den Ausbau geschützter Radwege. Zudem kommt es aufgrund von Abstimmungsproblemen zu ganz profanen Umsetzungsproblemen, etwa wenn nach Bauarbeiten an Ampelkreuzungen versäumt wird, vorhandene ÖSPV-Vorrangschaltungen wieder einzuprogrammieren.

Fazit

Maßnahmen zur Busbeschleunigung – und gleichermaßen auch solche zur verbesserten Abwicklung des Straßenbahnverkehrs – sind bei weitem nicht nur als Energieeffizienzmaßnahme zu sehen, sondern in Städten mit oft wachsendem Verkehrsaufkommen ohnehin unverzichtbar, um zumindest die gegebene Bedienungsqualität weiterhin gewährleisten zu können. Zur Umsetzung sind aber umfassende Planung und konstanter Dialog zwischen Verkehrsunternehmen, kommunaler Verwaltung und Öffentlichkeit unerlässlich – in der Planungs- und Bauphase und darüber hinaus.

3.2.7.3. Anreizsystem / Wettbewerb energieeffizientes Fahrverhalten

Beschreibung der Maßnahme

Das Bus-Fahrpersonal kann durch vorausschauendes Fahren Brems- und Beschleunigungsvorgänge sowie Geschwindigkeitsspitzen und Motorleerlauf im Stillstand reduzieren. Oft sind diese Grundsätze des kraftstoffsparenden Fahrens jedoch dem Personal nicht ausreichend bekannt oder werden aus anderen Gründen nicht umgesetzt.

Dabei gibt es durchaus Möglichkeiten, die Vorteile des kraftstoffsparenden Fahrens für das Fahrpersonal nachvollziehbar zu vermitteln. Dienstleister bieten dazu Datenverarbeitungssysteme an, die Geschwindigkeitsprofil, Brems- und Gaspedaleinsatz aufzeichnen und auswerten. Daraus können in Echtzeit Informationen an das Fahrpersonal übermittelt werden, z. B. in Form einer „Verbrauchsampel“ (rotes Signal für hohen momentanen Kraftstoffverbrauch) oder eines Pedalsignals. Gleichzeitig können die Auswertungen zentral gespeichert und für ein Anreizsystem verwendet werden. Beispielsweise werden im Kollegium regelmäßig die erfolgreichsten, weil sparsamsten, Fahrer bekannt gegeben. Verbesserter Datenschutz kann beispielsweise gewährleistet werden, indem Teams gebildet werden. Vergleichbarkeit und Gerechtigkeit werden durch streckenbezogene und tageszeitabhängige Auswertungen geschaffen. Die Nutzung eines solchen Systems am Standort eines Praxispartners wurde hier betrachtet. Zusätzlich wurde in diesem Anwendungsfall eine jährliche halbtägige Zusatzschulung eingeführt.

Tabelle 3-32: Steckbrief Maßnahme „Anreizsystem effizientes Fahrverhalten“

Kategorie	Nicht-Investiv
Musterunternehmen	VB Bachstein
Verkehrsmittel	Bus

Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	5 %	des Endenergiebedarfs in der jeweiligen Sparte des Musterunternehmens
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	80 %	wenn keine Hemmnisse (Arbeitsrecht / Datenschutz) entgegenstehen
Technische Reife / Marktreife		technische Lösungen am Markt verfügbar
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	360.000 €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, Kcw und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Durch Einführung des Systems wurden **im betrachteten Musterunternehmen** im Realbetrieb 5 % Kraftstoff eingespart.

Durch Ausdehnung der Maßnahme auf die gesamte Unternehmensflotte würde das Musterunternehmen über die gesamte Fahrzeugnutzungsdauer von zwölf Jahren rund 1,2 Mio. l Dieselkraftstoff einsparen. Dies entspricht einer Einsparung in Höhe von 44 TJ (Endenergie) bzw. 54 TJ (Primärenergie).

Ausgehend von der Annahme, dass sich das Potenzial auf 80 % der Fahrleistung übertragen lässt, ergibt sich für Anreizsysteme zum effizienten Fahrverhalten ein **Gesamtpotenzial in Deutschland** von rund 796 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 975 TJ/a (Primärenergieverbrauch) und damit etwa 3,5 % des gesamten Energieverbrauchs der Busse im ÖSPV.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Das Musterunternehmen erreichte am Maßnahmenstandort durch Datenerhebung, -auswertung und Teamwettbewerb mehr als 5 % Verbrauchseinsparung. Die Kosten von nur ca. 500 € pro Jahr und Fahrzeug werden somit deutlich überkompensiert.

Für die Hochrechnung der Schulungskosten auf das gesamte Musterunternehmen wurde ein Verhältnis von 1,5 Fahrern pro Bus angesetzt.

Tabelle 3-33: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Anreizsystem effizientes Fahrverhalten“

Ausgaben	Solo- / Gelenkbus	Hinweis
Kosten System „Traveltainer“	540	€/a
Anzahl Fahrzeuge	85	Anzahl
Nutzungsdauer	12	Jahre
Einnahmen		
Kraftstoffeinsparung	1500	€/a pro Fahrzeug
Umfang		
Einsatz bei	100 %	der Busse des MU

Ergebnis

Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	30.800	€/a
Barwert über die Nutzungsdauer	360.000	€

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Perspektiven und Diskussion

Das Fahrverhalten wird regelmäßig als relevantester Einflussfaktor auf den Energieverbrauch von Bussen eingestuft, so auch in den Expertengesprächen im Rahmen des Projekts. Die Grundsätze zur Verbrauchseinsparung werden aber nach Ansicht vieler Beteiligten in betrieblichen Schulungen nicht mit ausreichendem Erfolg vermittelt. Der Fahrstil des Personals kann nicht direkt beeinflusst werden. Dieses über Anreizsysteme zu adressieren, wird von Vertretern der Verkehrsunternehmen und den meisten anderen beteiligten Experten als sinnvoller Ansatz gesehen. Gleichzeitig können die Unfallschadenzahl gesenkt und der Fahrgastkomfort erhöht werden. Jedoch besteht gleichzeitig der Druck durch das den Kunden gegebene Versprechen, unter allen Umständen den Fahrplan einzuhalten. Nach Ansicht des betrachteten Musterunternehmens hatten die Anreize zum verbrauchsarmen Fahren aber keinerlei negativen Einfluss auf die Pünktlichkeit. Die v. a. durch die größeren Verkehrsunternehmen geäußerte Skepsis basierte vielmehr auf Zweifeln an der Durchführbarkeit und Wirksamkeit eines Wettbewerbssystems an deutlich größeren Standorten. Im Musterunternehmen handelte es sich um einen kleinen Betriebshof mit ca. 50 Fahrern, was die Identifikation mit dem Wettbewerb und damit die Wirksamkeit nach Aussage der Beteiligten deutlich verbesserte. Bei einem Wettbewerb mit veröffentlichten Ergebnissen ist der zweite zentrale Kritikpunkt der Datenschutz⁴¹. Wenn in dieser Hinsicht Bedenken bestehen, können alternativ nur „teamspezifisch“ Verbrauchsänderungen gegenüber dem vorherigen Zeitraum ausgegeben werden.

Grundsätzlich ist auch denkbar, dass ein Teil der monetären Einsparung, die durch das verbrauchsarme Fahren für das Unternehmen entsteht, als Prämien an das Fahrpersonal ausgeschüttet wird. Hier bestehen arbeitsrechtliche Bedenken. Konflikte werden vermieden, wenn das Geld stattdessen für wohltätige Zwecke verwendet wird, was ebenfalls eine hohe Anreizwirkung entfalten kann.

Fazit

Der Einfluss des individuellen Fahrverhaltens wird trotz neuer Entwicklungen in Richtung automatisierten Fahrens in absehbarer Zeit nicht abnehmen. Vielmehr wurde im Projekt mehrfach geäußert, dass dieser Einfluss durch Hybrid- und batterieelektrischen Antrieb sogar steigen könnte. Auch ohne öffentliche Förderung finanzieller Art sollte mittels der hier dargestellten Mischung aus Bewusstseins-schaffung, technischer Unterstützung und Anreizsystem erreicht werden können, dass das Fahrpersonal aktiv daran mitarbeitet, Energie einzusparen.

⁴¹ S. z. B. Rebein (2013)

3.2.7.4. Systematischer Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung

Beschreibung der Maßnahme

Auch im schienengebundenen ÖSPV hat das Fahrverhalten höchste Priorität für die Verbesserung der Energieeffizienz. Anders als beim Bus kann das Fahrpersonal jedoch die situationsbedingt vorteilhafteste Fahrweise aufgrund der komplexen Abhängigkeiten mit den anderen im Netz verkehrenden Fahrzeugen nicht selbständig einschätzen. Prinzipiell ist es bei dem bei U- und Straßenbahnen verwendeten E-Antrieb das sparsamste (wenn auch nicht fahrzeitoptimierte) Fahrverhalten, wenn das Fahrzeug zunächst voll beschleunigt und von einem optimalen Punkt an bis zur nächsten Haltestelle ausrollt. Diese Punkte werden teils mittels „Abschaltzeichen“ markiert. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass auch (in Abgrenzung zum passiven Ausrollen) aktiv eingeleitete Verzögerungsvorgänge nicht per se unvorteilhaft sind, da rekuperierte Bremsenergie sinnvoll verwendet werden kann: Zum einen im Fahrzeug zum intervallhaften Betrieb von Nebenverbrauchern wie der Heizung. Zum anderen befinden sich im selben Fahrwegnetzabschnitt i. d. R. andere Fahrzeuge, die evtl. zeitgleich anfahren und dazu Energie aus der Stromversorgungsinfrastruktur abnehmen. Abhängig von der Auslastung ändert sich zudem das Fahrzeuggewicht, was ebenfalls auf das Beschleunigungs- und Bremsverhalten wirkt. Gleichzeitig nimmt durch die wachsende Bedeutung erneuerbarer Energiequellen vermehrt auch die Fluktuation der Einspeisung ins Netz zu. Nicht zuletzt sollen jederzeit Komfort und Einhaltung des Fahrplans gewährleistet sein. Um diesen komplexen Zusammenhängen gerecht zu werden, bedarf es eines umfassenden Datenerhebungs- und -verarbeitungssystems, das eine Optimierung auf all diese Ansprüche hin vornimmt und daraus eine optimale Geschwindigkeit berechnet, die dem Fahrpersonal mittels eines Signals in der Fahrerkabine empfohlen wird. Solche umfassenden Systeme sind jedoch bisher nicht umgesetzt.

Die Musterunternehmen sehen in diesem Thema eine hohe Relevanz, es gibt jedoch bisher keine entsprechenden Umsetzungsprojekte. Die Maßnahme wurde daher basierend auf Informationen aus einem Pilotprojekt der Linz Linien betrachtet. Dort wurden 29 Straßenbahnfahrzeuge mit einem Datenerfassungs- und -auswertungssystem ausgerüstet. Das System kann neben der Energieoptimierung des Geschwindigkeitsprofils auch den Einsatz von Nebenverbrauchern, die Fahrgastauslastung und den umgebenden Straßenverkehr einbeziehen.

Tabelle 3-34: Steckbrief Maßnahme „Systematischer Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung“

Kategorie	Antrieb	
Musterunternehmen	BVG	
Verkehrsmittel	Straßenbahn	
Einsparpotenzial (Musterunternehmen)	7 %	des Endenergiebedarfs in der jeweiligen Sparte des Musterunternehmens
Anwendbarkeit ÖSPV D gesamt	50 %	bezogen auf die Fahrleistung
Technische Reife / Marktreife	Insellösungen verfügbar; Angebots- und Nachfragedefizite bei umfassenderen Systemen	
Betriebswirtschaftliche Bewertung: Barwert	15,2 Mio. €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung
Abschätzung Umweltkosteneinsparung	307.000 €	im MU bei gewählter Maßnahmenabgrenzung

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Energieeinsparpotenzial und Einflussfaktoren, Bedeutung für Gesamt-ÖSPV

Nach Auswertung der gesammelten Daten konnte durch die betriebliche Steuerung eine erhebliche Energieeinsparung erzielt werden. Eine Verbrauchsreduktion um ein Zehntel ist realistisch – bei gleichzeitiger Reduktion des Bedarfs an Betriebsmitteln wie Brems sand, des Verschleißes durch Bremsvorgänge sowie von Unfallschäden.

Durch die Umsetzung der Maßnahme könnten **im Musterunternehmen** in der gesamten Nutzungszeit rund 102 GWh Strom eingespart werden. Dies entspricht einer Einsparung in Höhe von 370 TJ (Endenergie) bzw. 824 TJ (Primärenergie) und damit 7 % des gesamten Energieverbrauchs der Straßenbahnen im Musterunternehmen.

Das abgeschätzte **Gesamtpotenzial in Deutschland** des effizienten Fahrens durch einen systematischen Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung beträgt mit rund 230 TJ/a (Endenergieverbrauch) bzw. 511 TJ/a (Primärenergieverbrauch) rund 5 % des gesamten Energieverbrauchs der Straßenbahnen. Dabei wird angenommen, dass sich die Maßnahme auf 50 % der Fahrleistung der Straßenbahnen übertragen lässt.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Die Hochrechnung auf das Musterunternehmen erfolgte auf denjenigen Teil der Flotte, der für die Nachrüstung geeignet ist. Dabei wurden im Vergleich zum Linzer Pilotprojekt doppelte AHK angesetzt, da die BVG über eine wesentlich größere Flotte verfügt. Hinzu kommt, dass das eingesetzte System bei einem anderen Musterunternehmen zukünftig nur noch als „Stand-alone“-Lösung weitergeführt werden kann, da es angesichts Nachfragemangels und damit verbundenem Vertriebsaufwand nicht mehr in die Produktarchitektur des Anbieters eingebunden sein wird. Dennoch liegen die Investitionskosten bei deutlich unter 1.000 € pro Fahrzeug, die durch die erzielten Energieeinsparungen weit überkompensiert werden.

Tabelle 3-35: Betriebswirtschaftliche Bewertung „Systematischer Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung“

Ausgaben

AHK	690	€ pro Fahrzeug
-----	-----	----------------

Nutzungsdauer	15	Jahre
---------------	----	-------

Einnahmen

Kraftstoffeinsparung	5.400	€/a pro Fahrzeug
----------------------	-------	------------------

Umfang

Straßenbahnen	210	Anzahl
---------------	-----	--------

Ergebnis

Auswirkungen auf das Betriebsergebnis	1,1 Mio.	€/a
---------------------------------------	----------	-----

Barwert über die	15,2 Mio.	€
------------------	-----------	---

Nutzungsdauer

Quelle: Öko-Institut, Kcw und Praxispartner

Perspektiven und Diskussion

Ein umfassendes System zur datengestützten energetischen Optimierung von Schienenfahrzeugen bietet hohe Energieeffizienzpotenziale. Besonders in der U-Bahn-Sparte, wo keine äußeren Störungen aufgrund von Berührungspunkten mit anderen Verkehrsmitteln auftreten, äußerten Vertreter von Musterunternehmen und Experten große Hoffnungen in Bezug darauf. Umgekehrt kann die Energieoptimierung durch Fahrassistenzsysteme bei der Straßenbahn Zusatznutzen erbringen, weil die Systeme auch zur Erkennung von Gefahren, v. a. Personen und Fahrzeugen im Bereich des Fahrwegs, und damit zur Vermeidung von Unfällen dienen.

Andere Ansätze zur energetischen Optimierung, die in Werkstatt- und Hintergrundgesprächen diskutiert wurden, sind fahrplanabhängige Signalschaltung⁴², Vorgabe des „Fahrens auf Bahnstandsstand“⁴³ und „Abschaltzeichen“ (s. Abschnitt 3.2.7.4). Diese stellen jedoch Insellösungen dar und können nicht die gewollte umfassende Optimierung bieten. Um diese zu ermöglichen, ist jedoch eine umfangreiche, hochaufgelöste Verarbeitung der verschiedenen Messdaten aus dem Betrieb sowie eine Priorisierung der teils widerstrebenden Ansprüche an das System erforderlich. Und in den oft Jahrzehnte alten Fahrzeugen fehlen dazu allein schon die nötigen Messdaten und Datenschnittstellen.

Fazit

Inselsysteme zur verbrauchsorientierten Fahrassistenz, mehr aber noch umfassende Ansätze zum Energiemanagement, können den Verbrauch signifikant reduzieren. Mit den derzeit schon am Markt verfügbaren Systemen kann ein wirtschaftlich sinnvoller Betrieb erreicht werden. Momentan mangelt es meist schon an der Erfassung der Daten. Selbst Neufahrzeuge können Energieparameter teils nicht zeitlich aufgelöst liefern. Dies sollte in Ausschreibungen konsequent eingefordert werden, denn andernfalls sind Nachrüstungen meist technisch unmöglich oder mit hohen Kosten verbunden.

Widersprüchlich erscheint, dass das Angebot an Datenerfassungs- und Auswertungssystemen offenbar sehr begrenzt ist, obwohl die Verkehrsunternehmen dem Thema eine hohe Priorität einräumen. Die Förderung im Rahmen von Pilotprojekten könnte vorhandenen Systemen helfen, sich am Markt stärker zu etablieren.

3.2.7.5. Weitere Maßnahmen

Die in Kapitel 3.2.7.2 beschriebenen Maßnahmen zur Busbeschleunigung stellen Vorstufen zu einem sogenannten **Bus Rapid Transit (BRT)-System** dar. Unter dem Begriff werden verschiedene Konzepte gefasst, die den städtischen Busverkehr störungsärmer und schneller gestalten, indem er ähnlich einem Straßenbahn- oder Stadtbahnssystem gestaltet wird. Teilmaßnahmen umfassen Fahrzeuge, Verkehrswege und Haltestelle. In Expertengesprächen im Rahmen des Projekts wurde teils der Standpunkt vertreten, dass relevante Verbrauchsvorteile erst in einem „ech-

⁴² D. h., es wird versucht, ein fahrplandreues und energieeffizientes Geschwindigkeitsprofil nicht über ein Signal in der Fahrerkabine, sondern über Lichtsignalanlagen vorzugeben.

⁴³ D. h., bei dichtem Takt wird dem Fahrpersonal beim Stehen an einer Haltestelle ein Abfahrtsignal erst dann erteilt, wenn das voraus befindliche Fahrzeug die folgende Haltestelle verlassen hat. So werden unnötige Brems- und Anfahrvorgänge vor der Einfahrt in diese Haltestelle vermieden.

ten“ BRT-System, nicht alleine mit den unter 3.2.7.2 genannten Maßnahmen erreicht werden. Insbesondere bezieht man sich dabei auf das Merkmal von BRT-Systemen, dass diese meist vollständig auf eigener Trasse und somit von anderen Verkehren getrennt verlaufen und durch den ungestörten Ablauf verbrauchsärmer fahren.

Bei Busbeschleunigungsprogrammen, wie sie beispielsweise in Hamburg durchgeführt werden, kommt es jedoch häufig zu Akzeptanzproblemen durch die damit verbundenen langwierigen Baumaßnahmen. Zudem wachsen aufgrund der Zunahme der urbanen Bevölkerung und der individuellen Mobilitätsansprüche insgesamt die Nutzungskonflikte im Straßenraum. Im städtischen Bereich steigen nicht nur die Fahrgastzahlen im ÖSPV – auch für Radfahrer und Fußgänger soll im Interesse einer ökologischen Umgestaltung der Mobilität mehr Platz im Straßenraum zur Verfügung gestellt werden. Es wird versucht, auch diese Verkehrsträger durch attraktive Ampelschaltungen zu stärken. Daher geht es im ÖSPV vielerorts zunächst darum, den bestehenden Standard zu halten und z. B. Busspuren oder besondere Bahnkörper von Straßenbahnen nicht zugunsten von Radspuren aufgeben zu müssen. Es sollte auch hinterfragt werden, ob angesichts der mittlerweile im urbanen Raum vielerorts ganztägig angespannten Verkehrslage eine tageszeitlich begrenzte Geltung von Busspuren die Anforderungen des ÖSPV noch erfüllen kann. Zudem fehlt oft das Personal für die Durchsetzung des Ordnungsrechts – Busspuren einzurichten reicht nicht, sie müssen auch von ordnungswidrig fahrenden und haltenden Pkw freigehalten werden. Zur Auflösung der Konfliktlagen um die Nutzung des Straßenraums führt also letztendlich nichts an einer **Reduktion des platzintensivsten Verkehrsträgers MIV** vorbei.

Ähnliche Konfliktlagen ergeben sich beim **Ersatz von Bus- durch Schienenverkehrslinien**, der aufgrund der höheren Effizienz des elektrischen Antriebs und der höheren Beförderungskapazität ebenfalls eine wirkmächtige Energieeffizienzmaßnahme darstellt.

Mehr Energieeffizienz lässt sich weiterhin durch eine verbesserte Differenzierung der Fahrzeuggrößen erreichen. Einerseits sind darunter **variable Fahrzeuggrößen** zu fassen, beispielsweise Doppelgelenk- vs. Solobusse. Sofern die Trassenführung und v. a. die Haltestellengrößen dies erlauben, kann so die gleiche Anzahl von Fahrgästen mit einer verringerten Fahrzeuganzahl und somit geringerem spezifischen Energieaufwand befördert werden. Andererseits lassen sich umgekehrt, v. a. in peripheren Gebieten und zu Schwachlastzeiten, geringere Verbräuche pro Personenkilometer eher durch **kleinere Fahrzeuggrößen** erreichen, z. B. Midi- und Kleinbusse. Dabei sollte Maßstab sein, dass die Bedienqualität nicht verschlechtert wird, um keine Abwanderung zum MIV zu verursachen. Gleichzeitig soll aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, des Platzbedarfs und des Ressourceneinsatzes eine übermäßige Erweiterung des Fuhrparks trotz der Differenzierung der Fahrzeuggrößen vermieden werden. Dazu bieten sich **modulare Fahrzeugkonzepte** an. Während für den Busverkehr mit den in Kapitel 3.2.7.1 genannten Buszügen eine Option vorgeschlagen wird, ging die Entwicklung bei Schienenfahrzeugen in der Vergangenheit eher dahin, lange und durchgehende Fahrzeuge einzusetzen. Zwar ist dies aus Gründen des Komforts und der technischen Zuverlässigkeit verständlich, jedoch würde eine bedarfsweise Zugbildung mittels kuppelbarer Einzelwagen mehr Flexibilität und damit mehr Effizienz erlauben. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es bei der energetischen Optimierung durch variable Gefäßgrößen mehrfach zu Konflikten mit einsatz- und instandhaltungsbedingten Erfordernissen und somit der monetären Optimierung der Fahrzeugbewirtschaftung kommt.

Entscheidend für die Energieeffizienz im ÖSPV-Betrieb wird in Zukunft sein, inwieweit die Chancen der Digitalisierung genutzt werden. Dies beginnt bei der **intelligenten Steuerung von Nebenverbrauchern** oder der **gezielten Vorkonditionierung** vor Betriebsbeginn, die vom Personal heute teils noch in jedem einzelnen Fahrzeug vorgenommen werden muss und auf diese Weise nicht genau bedarfsgerecht und damit energieoptimiert stattfindet. Der in Kapitel 3.2.7.4 beschriebene

systematische Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung bei der U- und Straßenbahn ist ein umfassenderes Beispiel. Ein weiteres, sich daraus ergebendes Element ist das in Deutschland mit wenigen Ausnahmen noch nicht umgesetzte **vollautomatisierte Fahren** im Schienenverkehr. Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz **intelligenter Bedienkonzepte**. Dies können autonome Kleinbusse sein, die momentan (Stand 2018) in Pilotprojekten erprobt werden und zukünftig im ländlichen Raum bedarfsgesteuert („on demand“, von den Nutzern per Smartphone bestellt) im Flächenbetrieb eine Ergänzung zum Busverkehr darstellen sollen.

Auch der Anteil von Leerfahrten lässt sich in begrenztem Maß optimieren. Entscheidender Faktor ist hier jedoch die Lage der Betriebshöfe. Hier wurden in den vergangenen Jahrzehnten teils wertvolle innerstädtische Flächen auf Kosten langer Anfahrtswege aufgegeben. Heute, wenn wieder vermehrt neue oder erweiterte Betriebshöfe geplant werden, die einem größtenteils elektrischen Busverkehr dienen sollen, wird es noch wichtiger sein, den Betrieb so zu optimieren, dass wertvolle Batteriereichweite nicht für lange Ein- und Aussetzfahrten verschwendet wird.

4. Ergebnisse und Fazit aus der Betrachtung der Maßnahmen

4.1. Ergebnisse

In Kapitel 3.2 wurde für ein breites Spektrum von Maßnahmen dargestellt, welche Energieeinsparung, betriebswirtschaftliche Bilanz und Umweltkosteneinsparung sich bei praxisnaher Maßnahmenabgrenzung heute jeweils erzielen lassen. Aufgrund der Verschiedenheit der energieeffizienzrelevanten Themen, der betrachteten Verkehrsunternehmen und der Rahmenbedingungen ihres Bedienungsgebiets soll hier jedoch, wie in 3.1.6 begründet, nicht ein verkürzendes Gesamturteil gebildet, sondern stattdessen eine nicht-aggregierende Übersicht der Bewertungsergebnisse geboten werden.

In Tabelle 4-1 sind die Einsparungen an End- und Primärenergie der Maßnahmen im jeweiligem Musterunternehmen innerhalb der gesamten Wirkdauer der jeweiligen Maßnahme zusammengefasst. Ergänzend wird die sich daraus ergebende Einsparung im Bezugsjahr 2016 auf den Endenergieverbrauch der jeweiligen Sparte des Musterunternehmens in jenem Jahr bezogen, um zumindest eine eingeschränkte Vergleichbarkeit zwischen Maßnahmen in verschiedenen Unternehmen und mit unterschiedlich langen Wirkdauern zu ermöglichen.

Die sich aus der Maßnahmenumsetzung ergebene Endenergieeinsparung reicht von wenigen TJ bei den Hybridbussen hin bis zu 1.000 TJ bei den Leichtbaubussen. Dieser absolute Wert stellt noch keine geeignete Vergleichsgröße dar, da sie stark von der Größe der Sparte im jeweiligen Musterunternehmen abhängt. Aus diesem Grund ist die Endenergieeinsparung in Tabelle 4-1 zusätzlich in Relation zum gesamten Endenergieverbrauch im jeweiligen Musterunternehmen im Bezugsjahr 2016 in Prozent angegeben.

Tabelle 4-1: Übersicht über Energieeinsparung der Maßnahmen innerhalb der gesamten Wirkdauer

Maßnahme	MU / Sparte	Endenergieeinsparung [TJ]	Relative Endenergieeinsparung im MU / Sparte	Primärenergieeinsparung [TJ]
Dieselhybridbus	KViP / Bus	14	4,9 %	17
Batterieelektrischer Bus	BVG / Bus	867	3,8 %	473
Chiptuning	KViP / Bus	24	6,1 %	30
Nachrüstung Rückspeisefähigkeit	DVB / Bus	400	3,1 %	891
Verzicht auf Klimatisierung	BVG / Bus	192	0,8 %	237
Energieeffiziente Klimatisierung	KViP / Bus	126	7,2 %	155
Leichtbaubusse	BVG / Bus	1.000	4,3 %	1.233
Bedarfsgerechtes Kneeling	VB Bachstein / Bus	45	11,3 %	55
Optimierung der Fahrstromverteilung	KViP / Bus	615	13,2 %	1.241
Erhöhung der Nennspannung	BVG / Bus	356	7,7 %	718
Stationäre Energiespeicherung	BVG / U-Bahn	65	3,8 %	144
Fahrzeugabstellung in Hallen	DVB / Tram	127	2,3 %	257

Nutzung von Tunnelabwärme	DVB / Tram	36	n.a.	42
Buszüge zur Bewältigung von Lastspitzen	MoBiel / Tram	14	4,2 %	18
Busbeschleunigung	DVB / Tram	227	1,0 %	280
Anreizsystem effizientes Fahrverhalten	BVG / Tram	44	5,0 %	54
Datenerhebung und -verarbeitung	BVG / U-Bahn	370	7,3 %	824

Quelle: Öko-Institut, KCW und Praxispartner

Bei den Bussen werden die höchsten Endenergieeinsparungen durch das bedarfsgerechte Kneeling erzielt (-11 %), welches jedoch nur vereinzelt anwendbar ist, da nur wenige Verkehrsunternehmen Zwangs-Kneeling betreiben (siehe Abbildung 4-2). Weiterhin werden hohe Einsparungen durch

- energieeffiziente Klimatisierung (-7 %),
- Optimierung der Motorsteuerung (Chiptuning) (-6 %)
- energieeffizientes Fahrverhalten (-5 %) und
- Einsatz von Hybridbussen (-5 %) erzielt.

Bei den Straßenbahnen und U-Bahnen verbessern

- systemische Maßnahmen bei der Fahrstromverteilung (-13 %),
- Erhöhung der Fahrdratspannung (-8 %) und
- energiesparendes Fahren mittels intelligenter Datenerfassung und -verarbeitung (-7 %)

die Endenergieeffizienz in den Musterunternehmen.

Auch diese relativen Werte weisen keine vollumfängliche Übertragbarkeit auf andere Verkehrsunternehmen und deren Rahmenbedingungen auf, da sie von den Annahmen zum Grad der Maßnahmenumsetzung im jeweiligem Musterunternehmen (z. B. Ersatz von 10 % der Busflotte durch E-Fahrzeuge im betrachteten Musterunternehmen) und den in den Verkehrsunternehmen erzielbaren Einsparungen abhängen. Diese variieren wiederum aufgrund von Parametern wie Fahrprofil und Topografie, Flottenzusammensetzung und Ausgangszustand der Stromversorgungsinfrastruktur.

Für Maßnahmen, die eine Reduktion des Dieserverbrauchs verursachen, ist die Reduktion des Primärenergiebedarfs rund 23 % höher als die Endenergieeinsparung. Verursachen die Maßnahmen eine Einsparung von Strom, liegt die Primärenergieeinsparung aufgrund der Wirkungsgradverluste insbesondere auf Seiten der Kohlekraftwerke mit +100 bis +123 % deutlich über der Endenergieeinsparung. Da sich die Zusammensetzung der deutschen Stromerzeugung mit der Zeit hin zu erneuerbaren Erzeugungsanlagen verschieben wird, nähern sich Primär- und Endenergieeinsparung bei länger wirkenden Maßnahmen langsam einander an. Die dargestellten Einsparungen hinsichtlich der Endenergie, auf die sich auch die Minderungsziele für den Energieverbrauch im Verkehrssektor beziehen, sind eine geeignete Vergleichsgröße, solange keine Elektrifizierung stattfindet. Bei einer Elektrifizierung, wie bei den Elektrobussen, ist die Primärenergieeinsparung geringer als die Endenergieeinsparung, da Strom im Vergleich zu Dieselmotoren größere Energieverluste in der Vorkette aufweist.

Tabelle 4-2 zeigt die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Maßnahmen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Reihe von Maßnahmen über die gesamte Nutzungsdauer positive Barwerte ausweisen und positive Einflüsse auf das Betriebsergebnis haben.

Tabelle 4-2: Auswirkung der Maßnahmen auf das Betriebsergebnis der MU, Barwert der Maßnahmen, hypothetische Fahrpreiserhöhung und sich daraus ergebende Nachfragerhöhung im MIV

Maßnahme	Auswirkung auf Betriebsergebnis [1.000 €a]	Barwert [1.000 €]	Hypothetische Fahrpreisauswirkung [%]	Hypothetische Nachfrageveränderung MIV [%]
Dieselhybridbus	-87	-240	3,4 %	0,09 %
Batterieelektrischer Bus	-4.033	-53.646	0,6 %	0,03 %
Chiptuning	35	431	-1,4 %	-0,04 %
Nachrüstung Rückspeisefähigkeit	-1.207	-19.296	0,2 %	0,01 %
Verzicht auf Klimatisierung	487	5.356	-0,1 %	0,00 %
Energieeffiziente Klimatisierung	327	3.611	-0,3 %	-0,01 %
Leichtbaubusse	2.698	30.252	-0,4 %	-0,02 %
Bedarfsgerechtes Kneeling	75	956	-3,0 %	-0,08 %
Optimierung der Fahrstromverteilung	719	14.314	-0,7 %	-0,02 %
Erhöhung der Nennspannung	-1.055	-28.496	1,0 %	0,04 %
Stationäre Energiespeicherung	55	808	-0,1 %	0,00 %
Fahrzeugabstellung in Hallen	-151	-5.442	0,1 %	0,01 %
Nutzung von Tunnelabwärme	-237	-2.395	0,0 %	0,00 %
Buszüge zur Bewältigung von Lastspitzen	38	201	-1,5 %	-0,04 %
Busbeschleunigung	2.025	18.806	-0,3 %	-0,01 %
Anreizsystem effizientes Fahrverhalten	31	360	n.a	n.a
Datenerhebung und -verarbeitung	1.130	15.230	-0,2 %	-0,01 %

Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Für Maßnahmen, bei denen die betriebswirtschaftliche Bewertung ergeben hat, dass sie sich in der Nutzungsdauer tendenziell nicht amortisieren und die einen negativen Barwert aufweisen, wird ergänzend eine gesamtwirtschaftliche Bewertung durchgeführt. Dafür wird abgeschätzt, welchen Einfluss die Umsetzung der Maßnahme auf die Umweltkosten besitzt.

Tabelle 4-3: Abschätzung der Umweltkosteneinsparung von tendenziell nicht amortisationsfähigen Maßnahmen in Mio. €₂₀₁₆

	MU / Sparte	Mio. € ₂₀₁₆
Dieselhybridbus	KViP / Bus	0,1
Batterieelektrischer Bus	BVG / Bus	4,8
Nachrüstung Rückspeisefähigkeit	BVG / U-Bahn	7,0
Erhöhung der Nennspannung	DVB / Tram	5,6
Fahrzeugabstellung in Hallen	DVB / Tram	2,1
Nutzung von Tunnelabwärme	BVG / U-Bahn	0,3

Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen

Die Übersicht in Tabelle 4-3 zeigt, dass alle Maßnahmen auch unter Berücksichtigung einer hypothetischen Fahrgastwanderung hin zum MIV zu einer zum Teil deutlichen Reduktion der Umweltkosten führen.

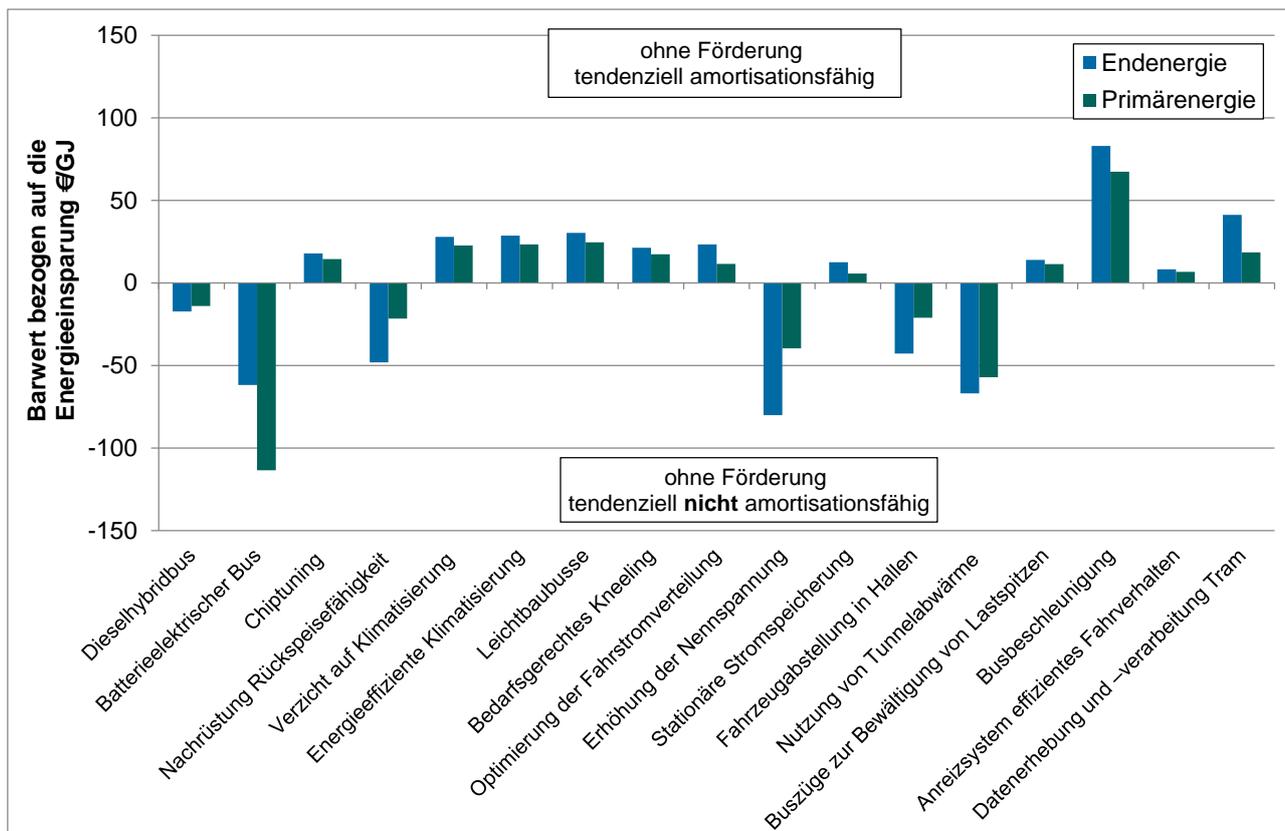
In Abweichung zur Methodenkonvention wird ein Zinsfuß in Höhe von 1,5 % p. a. auch bei nicht generationenübergreifenden Maßnahmen (Dieselhybridantrieb, Elektrobusse) herangezogen (s. Abschnitt 3.1.4). Tabelle 6-11 im Anhang zeigt eine Sensitivitätsberechnung mit einem Zinsfuß von 0 und 3 % p. a. Die Umweltkosteneinsparung würde in diesem Fall zwischen 8 und 18 % geringer (Sensitivität 3 %) bzw. zwischen 9 und 25 % höher (Sensitivität 0 %) ausfallen.

Einen noch größeren Einfluss auf die Umweltkosteneinsparungen besitzt der zugrunde gelegte Umweltkostensatz für Treibhausgasemissionen (vgl. Kapitel 3.1.3 und 3.1.4). Der bei der Anwendung der Methodenkonvention zur Verfügung stehende Spielraum bei der monetären Bewertung des Treibhauseffekts, der sich in verschiedenen Umweltkostensätzen für Treibhausgasemissionen ausdrückt, kann den in Tabelle 4-3 dargestellten Umweltkosteneffekt der betrachteten Maßnahmen um bis zu 44 % steigern oder um bis zu 18 % verringern.

4.2. Maßnahmenpriorisierung anhand der Bewertungskriterien

Eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Maßnahmen kann erreicht werden, indem das Ergebnis der betriebswirtschaftlichen Betrachtung (Barwert über die gesamte Nutzungsdauer) durch die mit der Maßnahme realisierte Energieeinsparung in Relation setzt (per Quotientenbildung). Abbildung 4-1 stellt die Ergebnisse jeweils auf die Endenergie- und Primärenergieeinsparung normiert dar. Je größer der Quotient ist, desto kosteneffizienter lässt sich mit der jeweiligen Maßnahme Energie einsparen. Maßnahmen mit einem Quotienten größer Null rechnen sich, unter den getroffenen Annahmen, innerhalb der gesamten Nutzungsdauer.

Abbildung 4-1: Kosteneffizienz der Maßnahmen, Barwert normiert anhand der Energieeinsparung



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Es wird deutlich, dass die Busbeschleunigung eine besonders kosteneffiziente Maßnahme darstellt. Die Ursache liegt im Berechnungsansatz, der die Kosten nicht dem Musterunternehmen, sondern der Kommune zuschlägt. Da auch diese Maßnahme Kosten verursacht, bedarf es entsprechender politischer Bereitschaft und Kapazität in der kommunalen Verwaltung. Eine weitere Maßnahme, die zu Energieeinsparung und niedrigeren Kosten für das Musterunternehmen führt, ist der Einsatz von Leichtbaubussen. Hier stellt vermutlich nicht die wirtschaftliche Bewertung, sondern das Angebotsdefizit und die in den Unternehmen vorhandene Herstellertreue das entscheidende Hemmnis dar. Auffällig ist, dass der Einsatz von Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten wie Hybrid- und Elektrobussen die niedrigste Kosteneffizienz aufweisen. Für die Verkehrsunternehmen ist das Erschließen dieser Energieeffizienzpotenziale mit Zusatzkosten verbunden. Tendenziell können diese Effizienzpotenziale deshalb momentan ohne eine Förderung nicht erschlossen werden. Bei Elektrobussen tritt die Besonderheit auf, dass die Kosteneffizienz bezogen auf die Primärenergieeinsparung niedriger ist als wenn sie auf die Endenergieeinsparung bezogen wird. Ursache ist der Wechsel von Dieselmotoren, bei dem die größten Umwandlungsverluste im Fahrzeug stattfinden, hin zu Strom, bei dem die Verluste bei den Kraftwerken und damit in der Vorkette auftreten.

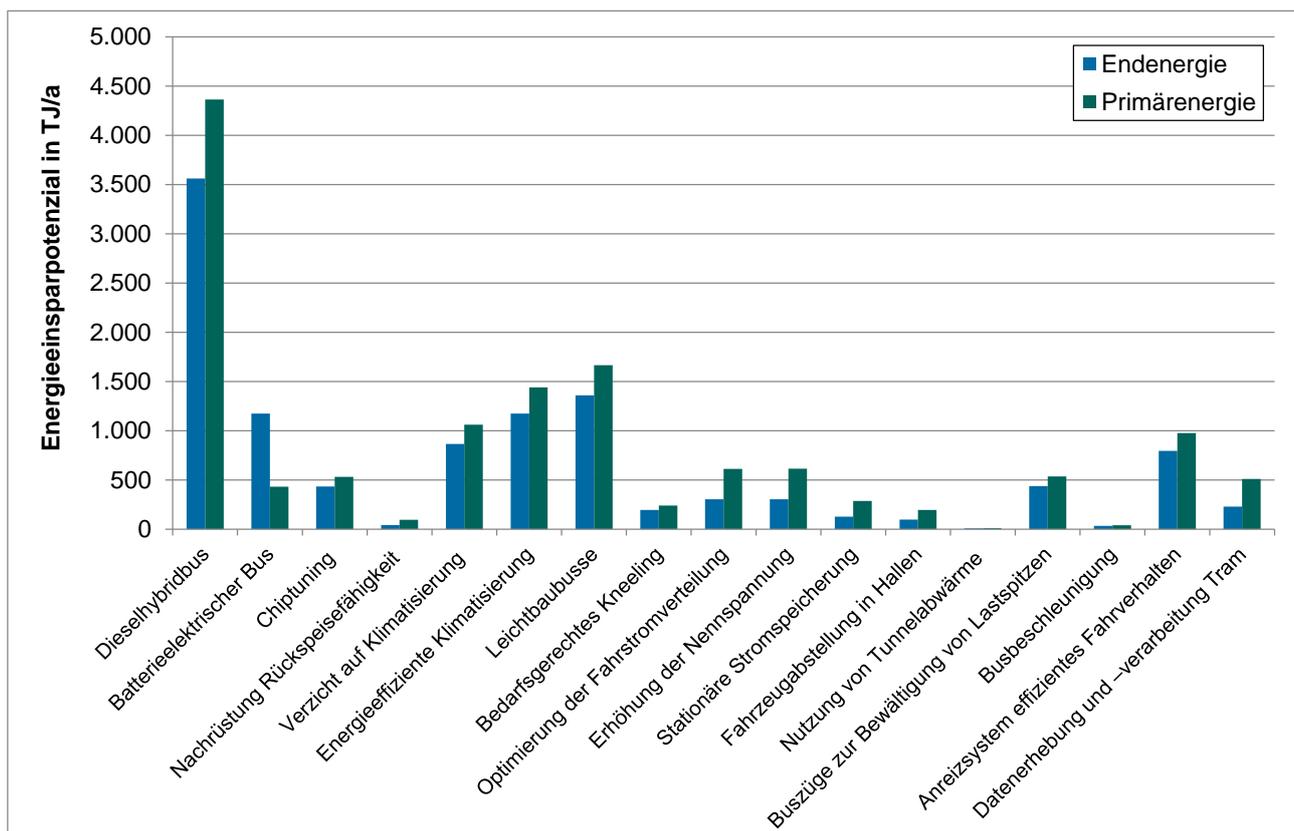
Im schienengebundenen ÖSPV zeigt sich, dass besonders der systematische Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung im Interesse einer effizienten Fahrweise eine hohe Kosteneffizienz besitzt. Ebenfalls tendenziell amortisationsfähig sind der Einsatz stationärer Energiespeicher und die optimierte Fahrstromverteilung. Die Erhöhung der Fahrdrabtspannung und die geschlossene Ab-

stellung sind allein aufgrund der Energieeinsparung tendenziell nicht amortisationsfähig, besitzen aber eine Reihe weiterer Nutzen, wie Schutz vor Korrosion und Sachbeschädigung (im Fall der geschlossenen Abstellung) sowie Netzstabilisierung und Erweiterungsreserven (im Fall der Fahrdratspannung), die nicht monetär abgebildet sind.

Um im ÖSPV relevante Energieeinsparungen zu erzielen, ist es nicht ausreichend, allein die Kosteneffizienz der Maßnahmen zu betrachten. Neben der Effizienz spielt die Effektivität eine wesentliche Rolle, also die Frage nach dem gesamten Potenzial der einzelnen Maßnahmen. Das Potenzial hängt z. B. davon ab, wie hoch der Gesamtverbrauch der jeweiligen Sparte in Deutschland ist und in welchem Grad die Maßnahme übertragbar ist. Um eine hohe Energieeinsparung im ÖSPV zu erzielen, ist das Wissen über die Kosteneffizienz der Maßnahmen nicht ausreichend, da eine hohe Effizienz auch mit einem geringen Einsparpotenzial verbunden sein kann.

Die Abbildung 4-2 zeigt die Abschätzung des Gesamtpotenzials der Maßnahmen in Deutschland. Dieselhybrid- und Leichtbaubusse stellen diejenigen Maßnahmen dar, mit denen sich, unter den getroffenen Annahmen, die höchsten Einsparungen sowohl in Hinblick auf den End- als auch den Primärenergieverbrauch erzielen lassen. Diese Maßnahmen weisen die höchste Effektivität auf.

Abbildung 4-2: Abschätzung des Energieeinsparpotenzials der Maßnahmen in Deutschland



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Aufgrund des absolut höheren Energieverbrauchs des Busbereichs und der bereits hohen Energieeffizienz im Rad-Schiene-System sind die Maßnahmen mit den höchsten Potenzialen auf Seiten der Busse angesiedelt. Das mit Abstand höchste Gesamtpotenzial besitzen die Hybridbusse, da sowohl Solo- als auch Gelenkbusse mit einem Hybridantrieb ausgestattet werden können und

die Fahrzeuge in Serienreife angeboten werden. Bei den Straßen- und U-Bahnen besitzt das Energieversorgungssystem (Optimierung der Fahrstromverteilung, Erhöhung der Fahrdrachtspannung) das höchste Gesamtpotenzial.

Die Wirkung verschiedener Maßnahmen kann im Übrigen i. d. R. nicht ohne weiteres aufaddiert werden: So hat beispielsweise der Verzicht auf Klimatisierung in Kombination mit dem batterieelektrischen Antrieb eine höhere Energieeinsparung zur Folge als im Fall des Dieselantriebs, da die Klimatisierung hier einen höheren Anteil am Gesamtverbrauch einnimmt als beim E-Bus. Jedoch errechnet sich die Einsparung in Kombination beider Maßnahmen nicht durch Addition der Einzelpotenziale. Es liegt auch auf der Hand, dass sich Maßnahmen wie Chiptuning und batterieelektrischer Antrieb ausschließen, sodass auch in diesem Fall keine Addition von Einsparpotenzialen erfolgen kann. Die Optimierung der Fahrstromverteilung verringert die Notwendigkeit der Pufferung und somit den sinnvollen Einsatzbereich entsprechender Energiespeicher. Insgesamt sind sowohl kumulierende als auch diametrale Wechselwirkungen bei den Schienenverkehrsmitteln noch stärker ausgeprägt als beim Dieselmotor: Aufgrund gegenseitiger Konnektivität mehrerer Fahrzeuge über die Stromversorgungsinfrastruktur kann es hier z. B. sogar eine Relevanz für den energieeffizienten Betrieb der Nebenverbraucher haben, ob ein Fahrzeug zur Rückspeisung rekuperierter Bremsenergie fähig ist, da intervallhafter Nebenverbraucherbetrieb und Rückspeisung in die Stromversorgungsinfrastruktur zwei „konkurrierende“ Nutzungsmöglichkeiten von rekuperierter Bremsenergie darstellen (s. z. B. Abschnitt 3.2.7.4).

Die dargestellten Potenziale stellen zudem eine Momentaufnahme aus heutiger Sicht dar. Das Potenzial des Chiptunings bezieht sich beispielsweise nur auf ältere Bestandsfahrzeuge und wird somit mit deren Ausscheiden aus dem Fahrzeugbestand in den kommenden Jahren abnehmen. Andererseits werden Elektrobusse durch ein wachsendes Fahrzeugangebot und voranschreitende technische Entwicklung vermutlich ein breiteres Anwendungsfeld bekommen, dieses Gesamtpotenzial wird damit beträchtlich steigen.

In Abbildung 4-3 werden die oben gezeigten Ergebnisse hinsichtlich

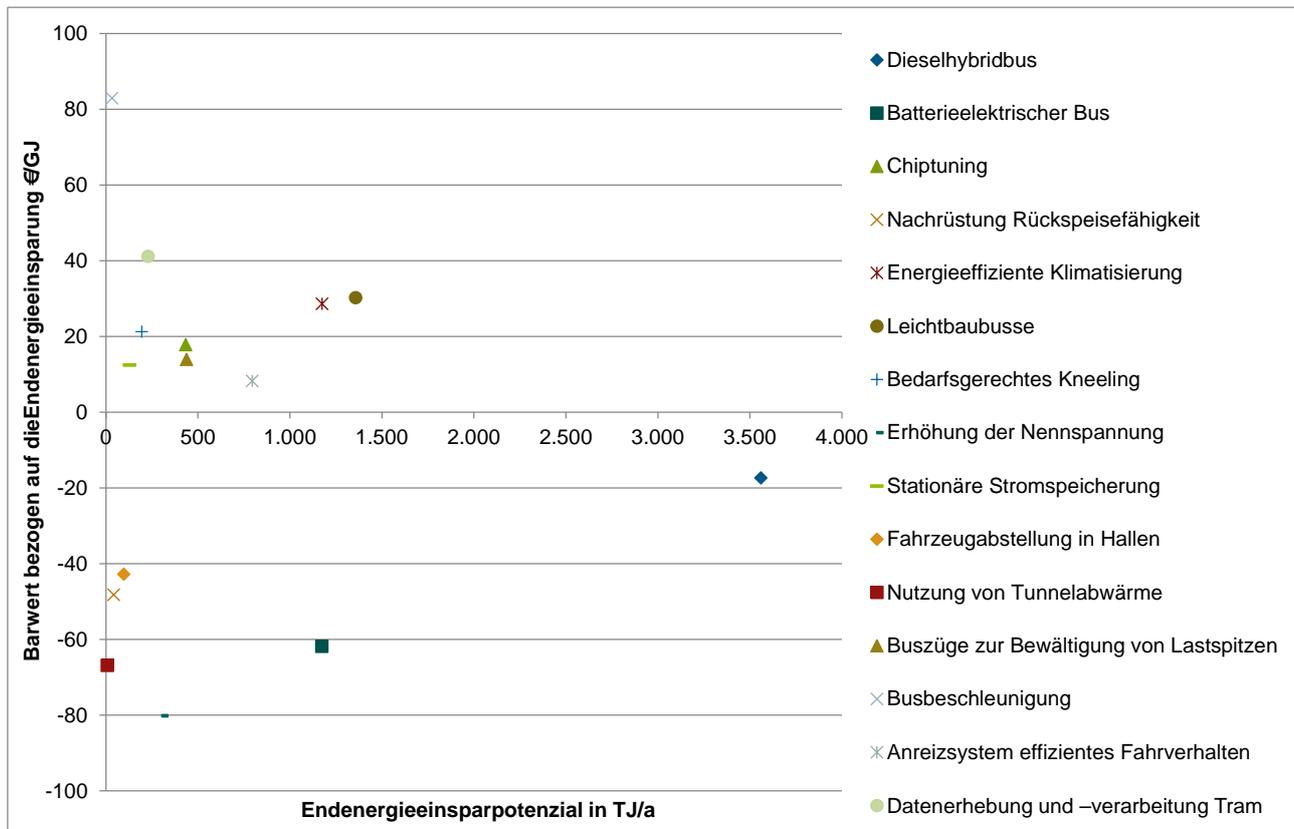
- der Kosteneffizienz der Maßnahmen (Abbildung 4-1) im Musterunternehmen und
- der Gesamteinsparpotenziale in Deutschland (Abbildung 4-2)

überlagert. Maßnahmen oberhalb der x-Achse sind (im Musterunternehmen) tendenziell amortisationsfähig, Maßnahmen darunter sind aus rein betriebswirtschaftlicher Perspektive tendenziell nicht wirtschaftlich darstellbar. Je weiter eine Maßnahme rechts im Diagramm angesiedelt ist, desto größer ist ihr heutiges für das Inland abgeschätztes Gesamtpotenzial.

Eine Priorisierung der untersuchten Einzelmaßnahmen hinsichtlich betrieblicher Kosteneffizienz und gleichzeitig hohem inländischen Gesamtpotenzial ist mittels der dargestellten Überlagerung herstellbar:

- Der Einsatz von Dieselhybridbussen stellt die Maßnahme mit dem höchsten Endenergieeffizienzpotenzial dar. Im Vergleich zu den anderen nicht amortisationsfähigen Maßnahmen ist der Förderbedarf, der zur Deckung des negativen Nettobarwertes benötigt wird, bei den Dieselhybridbussen am geringsten.
- Das zweithöchste Potenzial besitzt der Einsatz von Leichtbaubussen. Im Gegensatz zu den Dieselhybridbussen ist deren Einsatz jedoch tendenziell amortisationsfähig.
- Im schienengebundenen ÖSPV wären aus Perspektive der Kosteneffizienz und der Effektivität die Maßnahmen zur Optimierung der Fahrstromverteilung und die systematische Datenerhebung und -verarbeitung zur Umsetzung einer energieeffizienten Fahrweise zu priorisieren.

Abbildung 4-3: Kosteneffizienz und Einsparpotenziale der Maßnahmen (Endenergieverbrauch)

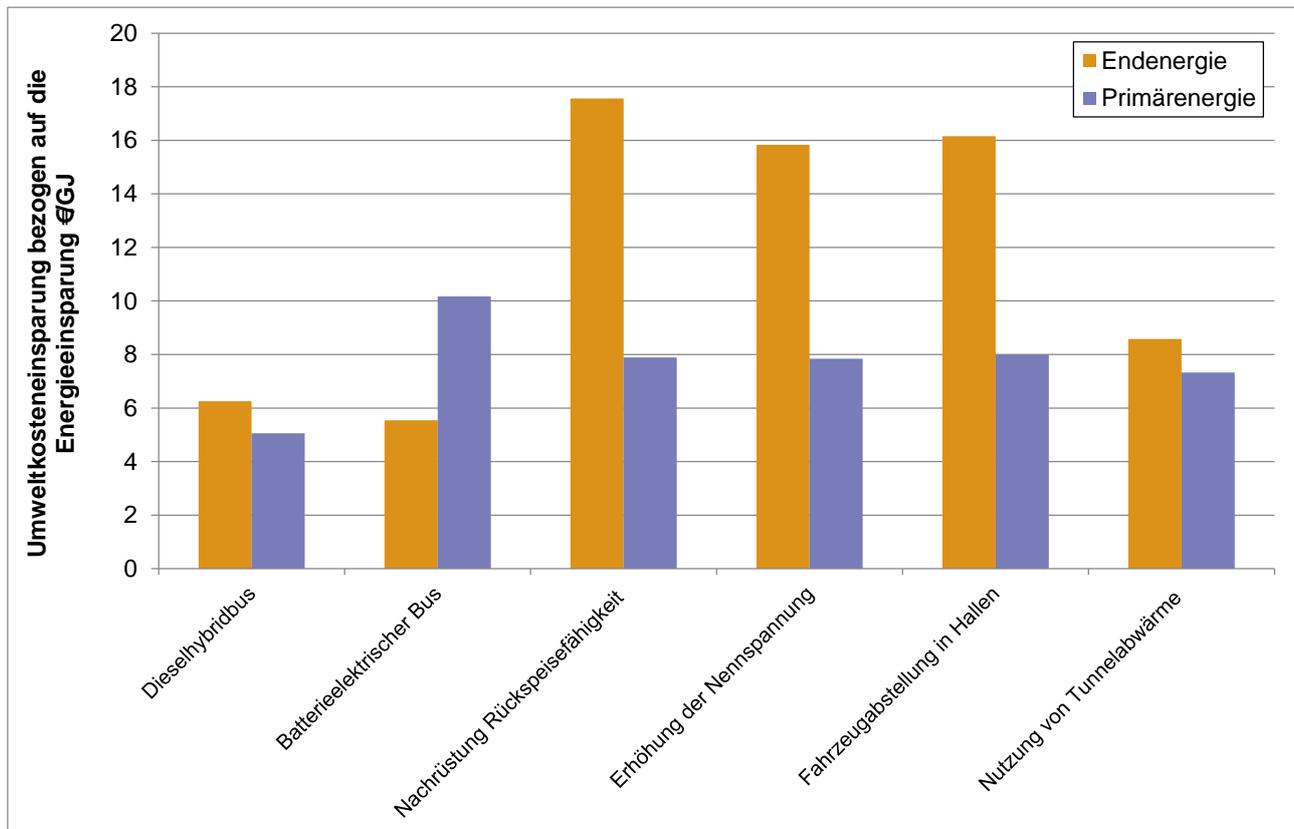


Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Eine analoge Abbildung zu Abbildung 4-3, mit Bezug auf den Primärenergie- anstelle des Endenergiebedarf, ist im Anhang dargestellt (Abbildung 6-1). Ein wesentlicher Unterschied betrifft die Elektrobusse, die aus heutiger Sicht mit Blick auf das Primärenergieeinsparpotenzial weniger stark priorisiert werden müssten.

Für die bessere Einordnung der tendenziell nicht amortisationsfähigen Maßnahmen werden diese um eine gesamtwirtschaftliche Bewertung anhand einer Umweltkostenabschätzung ergänzt. Die Umweltkosteneinsparungen (vgl. Tabelle 4-3) werden ebenfalls auf die Energieeinsparung (Tabelle 4-1) bezogen und in der nachfolgenden Abbildung 4-4 dargestellt.

Abbildung 4-4: Umweltkostenminderung der Maßnahmen. Umweltkosten normiert anhand der Energieeinsparung.



Quelle: Öko-Institut, eigene Darstellung

Normiert auf die Endenergieeinsparung liegen die Umweltkosten zwischen 5 und 18 € pro GJ. Die größten Umweltkosteneinsparungen lassen sich bei den Maßnahmen im schienengebundenen ÖSPV erreichen, die geringsten durch den Einsatz batterieelektrischer Busse. Bezieht man die Umweltkosteneinsparungen hingegen auf die Primärenergieeinsparung, gibt es kaum Unterschiede zwischen allen Maßnahmen (Werte zwischen 7 und 9 € pro GJ).

Da es sich bei allen Berechnungsergebnissen um Momentaufnahmen für den Fall einer heutigen Umsetzung handelt, muss bei der Interpretation stets der technologische Entwicklungsstand der jeweiligen Maßnahme im Auge behalten werden. Beispielsweise ist beim batterieelektrischen Antrieb momentan noch ein dynamischer Aufbau- und Anschubprozess im Gange, der in naher Zukunft Kostenreduktion und Energieeffizienzgewinne erwarten lässt. Die laufenden Entwicklungen im Kontext der Elektromobilität werden schon im Zeithorizont weniger Jahre die in dieser Studie vorgenommene Bewertung des batterieelektrischen Antriebs deutlich modifizieren: Sie werden voraussichtlich

- die Maßnahmenabgrenzung verändern (breiteres Einsatzspektrum im Musterunternehmen und im Gesamt-ÖSPV aufgrund verbesserter Reichweiten),
- die betriebswirtschaftliche Perspektive verbessern (weniger oder kein Fahrzeugmehrbedarf mehr gegenüber dem Betrieb mit Dieselfahrzeugen) und

- die Energie- und damit auch die Umweltkostenbewertung zum Positiven beeinflussen (zusätzliche Endenergieeinsparung durch Entwicklung der Fahrzeugtechnologie sowie Senkung des Primärenergiebedarfs durch höheren Anteil Erneuerbarer Energien)

Somit ist es durchaus gerechtfertigt, wenn Verkehrsunternehmen heute (ob mit oder ohne das Argument der Energieeffizienz) ihren Fokus auf E-Busse legen und die Dieselhybridtechnologie, trotz der hier präsentierten positiveren Bewertung, „überspringen“. So werden langlaufende und für ein batterieelektrisches System unvermeidliche Infrastrukturaufbauprozesse sowie betriebliche Neustrukturierungen nicht durch die kurzfristiger und einfacher umsetzbare Maßnahme der Hybridisierung der Busflotte hinausgezögert.

5. Handlungsempfehlungen zur Steigerung der Energieeffizienz im kommunalen Öffentlichen Personennahverkehr

5.1. Vorbemerkung

Als zentrales Ergebnis dieser Untersuchung werden in diesem Kapitel drei besonders erfolgversprechende und relevante Ansätze zur Unterstützung von Energieeffizienzmaßnahmen im ÖSPV dargestellt (Abschnitte 5.2 bis 5.4). In Abschnitt 5.5 werden weitere Empfehlungen ausgesprochen, auf welche Weise die Einsparpotenziale zukünftig besser erschlossen werden könnten.

Die Vorschläge beinhalten nicht nur technische Umstellungs- oder Migrationsmaßnahmen, sondern auch an die öffentliche Hand adressierte Förderbedarfe und entsprechende Vorschläge für neu zu schaffende Förderinstrumente. Bei Auswahl der Handlungsempfehlungen waren die Sicherstellung einer hohen Wirksamkeit und die Berücksichtigung bereits bestehender Förderprogramme zentrale Leitlinien.

Flankiert werden die Empfehlungen mit Hinweisen zur Beseitigung ungünstiger Rahmenbedingungen, die die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen bzw. die Inanspruchnahme von Förderprogrammen hemmen. Auch ist umgekehrt die Wirkung „begünstigender“ Bedingungen und Entwicklungen zu berücksichtigen: So sind beim viel beachteten Thema der Elektrifizierung des Busverkehrs nicht die Förderprogramme der stärkste Treiber, sondern die in vielen Kommunen z. B. durch Gerichtsurteile zu Stickoxidgrenzwerten verursachten Zwänge, Maßnahmen zur Emissionsverringerung umzusetzen.

5.2. Zentrale Handlungsempfehlung 1: Handlungspaket für mittelständische Betreiber und Aufgabenträger im ländlichen, suburbanen und kleinstädtischen Raum zum vereinfachten Einstieg in den batterieelektrischen Busverkehr

5.2.1. Hintergrund

Viele ÖSPV-Unternehmen haben bisher noch keine Erfahrungen mit dem Einsatz elektrischer Busse oder erproben allenfalls einzelne Fahrzeuge. Es gibt bisher noch viele technische und marktseitige Hinderungsgründe für den Einstieg: So etwa den bisher unzureichenden Anbietermarkt auf Seiten der Fahrzeughersteller sowie den Umstand, dass sich die Technik laufend weiterentwickelt und daher Investitionen mit dem Risiko verbunden sind, in einigen Jahren möglicherweise nicht mehr benötigt zu werden.⁴⁴ Es mangelt zudem bisher an Interoperabilität zwischen Fahrzeugen und Ladeinfrastrukturen der verschiedenen Anbieter. Die Umstellung bedarf intensiver Planung (u. a. Anpassung der Fahrzeugumläufe an die gegebene Reichweite, Festlegung geeigneter Ladepunkte im Liniennetz) und Investitionen, die weit über die Fahrzeuge hinaus gehen (u. a. Ertüchtigung der Werkstattinfrastruktur, Schulung des Werkstattpersonals).

Vor besonderen Herausforderungen stehen mittelständische Busbetreiber, oft im ländlichen Raum, die im Ausschreibungs- und Genehmigungswettbewerb stehen, und Aufgabenträger, die wettbewerbliche Vergaben organisieren. Mindestfahrzeugzahlen bei Förderprogrammen sind ein verbreitetes Hindernis: Zahlreiche Vergaben von ÖSPV-Leistungen haben ein geringes Volumen und

⁴⁴ So ist es denkbar, dass heute aufgebaute Ladeinfrastruktur im Bedienungsgebiet (d. h. an Unterwegshaltestellen oder Linienendpunkten) nicht mehr benötigt wird, falls zukünftig aufgrund von Fortschritten hinsichtlich der Batteriereichweiten die Ladevorgänge ausschließlich während der Standzeiten im Betriebshof stattfinden sollten.

setzen den Einsatz von fünf oder weniger Fahrzeugen voraus⁴⁵. Richtlinien zur Fahrzeugförderung ermöglichen teils nur die Beschaffung von mindestens fünf Fahrzeugen und schließen dadurch eine Förderung für kleine Vorhaben aus. Ein mögliches Pooling von Nachfrageinteressen kann sich für kleine und mittlere Verkehrsunternehmen als zu aufwendig erweisen, insbesondere wenn Fahrzeugstandards und Beschaffungszeitpunkte variieren oder überregionale Kooperationen erforderlich wären.

Besondere Herausforderungen birgt die Einbeziehung von Fördermöglichkeiten in wettbewerbliche Vergaben. Vergebende Aufgabenträger, die batterieelektrische Busse vorgeben möchten, benötigen Berechenbarkeit in Hinblick darauf, dass dem erfolgreichen Bieter nach Zuschlagserteilung Förderungen zur Verfügung stehen und diese auch in Anspruch genommen werden. Dabei können Förderungen entweder von den Bietern bereits in ihre Angebotspreise einkalkuliert sein, was voraussetzt, dass den Bietern bereits vor Angebotsabgabe eine Förderungszusage vorliegt und diese nicht mit einer Verpflichtung zur Inanspruchnahme der Förderung verbunden ist. Oder der erfolgreiche Bieter beantragt die Förderung nach Zuschlagserteilung und reicht etwaige Fördermittel erst nach deren Bewilligung an den Auftraggeber weiter. Letzteres setzt wiederum voraus, dass die Erteilung des Zuschlags auf ein Angebot, das bereits batterieelektrische Busse umfasst, aus Sicht des Fördergebers nicht mit dem Verbot eines vorzeitigen Maßnahmenbeginns kollidiert.

Ohne entsprechenden politischen Willen, der in vielen größeren Städten aufgrund der Luftschadstoffproblematik existiert, fehlen den Aufgabenträgern oft die personellen Ressourcen für Planung und Umsetzung eines auf batterieelektrischen Fahrzeugen beruhenden Betriebskonzeptes. Ausschreibungswettbewerbssfahrpläne sind daher in der Regel nicht für den Umstieg auf Elektromobilität angepasst. Darüber hinaus stehen selbst Aufgabenträger, die batterieelektrischen Bussen gegenüber aufgeschlossen sind, vor der Schwierigkeit, zu Beginn einer Ausschreibung noch nicht zu wissen, ob und in welcher Höhe ein Ausschreibungsgewinner, der den Einsatz von E-Fahrzeugen anbietet, eine Förderung von anderer Seite erhalten und diese seine Haushaltsbelastung verringern wird.

Außerdem gibt es weitere Rahmenbedingungen, die die Umsetzung von Elektromobilität im ländlichen Raum erschweren können: Ein Beispiel ist der vorrangig für den Schülerverkehr eingesetzte Anteil an den Busflotten: Meist absolvieren diese Fahrzeuge relativ geringe Tagesfahrleistungen, sodass der Vorteil von E-Fahrzeugen bei den Kilometerkosten weniger zum Tragen kommt – der TCO-Vergleich mit dem Dieselbus fällt somit für den Betreiber noch ungünstiger aus. Für mittelständische Unternehmen bedeutet es ein großes Risiko, E-Busse anzuschaffen, Ladeinfrastruktur aufzubauen und Werkstätten umzustellen und diese dann nach Ende des Vergabe- bzw. Genehmigungszeitraums möglicherweise (bei einem Betreiberwechsel) weder weiterverwenden noch veräußern zu können. Auch stehen viele Fahrzeuge von im ländlichen Raum angesiedelten Betrieben nachts nicht auf voll ausgestatteten Betriebshöfen, sondern auf einfachen Abstellflächen an peripheren Standorten. Hier kann die Bereitstellung der Anschlussleistung für Ladeinfrastruktur schwierig sein. In der Technologieübergangsphase geht auch die Flexibilität in Bezug auf Betriebshof- und Werkstattstandorte verloren.

5.2.2. Handlungsempfehlung

Empfohlen wird daher als erstes Element, den Zugang zur Fahrzeugförderung zu verbessern, indem in Förderprogrammen auf Mindestfahrzeugzahlen verzichtet wird. Da auf diese Weise zusätzliche Unternehmen in den Genuss einer Förderung kommen und größeren Verkehrsunternehmen

⁴⁵ Im bundesweiten Förderprogramm des BMVI wurde diese Grenze auf zwei Fahrzeuge gesenkt.

unverminderte Fördermittel zur Verfügung stehen sollen, sollte dies eine Aufstockung der Gesamtfördersumme mit sich ziehen.

Vergebende Aufgabenträger benötigen zu Beginn des Ausschreibungsprozesses Klarheit über die zur Verfügung stehenden Fördermittel. Dies ist für sie oftmals Voraussetzung, um batterieelektrische Busse als zwingend vorgeben zu können. Ein Modell, in dem der vergebende Aufgabenträger sowohl Förderantragsteller als auch Förderempfänger ist, wäre hier zielführend. Förderbedingungen sehen dies derzeit allerdings noch nicht regelmäßig vor. Alternativ kommt ein Modell in Frage, bei dem der Aufgabenträger vom Fördergeber bereits vor Beginn des Vergabeverfahrens eine verbindliche Zusage darüber erhält, dass jener dem erfolgreichen Verkehrsunternehmen eine bereits feststehende Förderung gewähren wird, sofern das Unternehmen die Förderbedingungen einhält. Die Beantragung einer Förderung durch den erfolgreichen Bieter im Nachgang zum Vergabeverfahren birgt für den Aufgabenträger eine größere Unsicherheit. Sollte dennoch dieser Weg eingeschlagen werden, wäre eine Klarstellung in den Förderrichtlinien hilfreich, dass ein Zuschlag im Vergabeverfahren über Verkehrsdienstleistungen, der das Verkehrsunternehmen zu einer Erbringung der Leistung z. B. mit batterieelektrischen Bussen verpflichtet, nicht als förderschädlicher vorzeitiger Maßnahmenbeginn angesehen wird.

Zudem muss der Transfer von Elektromobilitäts-Know-How – aus der Wissenschaft, von internationalen Best-Practices und von den nationalen „First Movern“ – auf die kleineren Verkehrsunternehmen verbessert werden. Von der Bundesebene (z. B. Bundesverkehrsministerium) kann dies unterstützt werden, indem Dialogformate und frei verfügbare Informationen (z. B. Informationsveranstaltungen oder themenspezifische Online-Ressourcen) organisiert bzw. bereitgestellt werden. Andererseits müssen auch ausreichende personelle und finanzielle Ressourcen für Beratungsdienstleistungen vorhanden sein. Dies sollte in Förderprogrammen der Bundes- und Landesebene verstärkt Berücksichtigung finden. Adressaten einer solchen finanziellen Unterstützung sollten neben den Verkehrsunternehmen auch die Aufgabenträger sein, von deren aktiver Nachfrage die Umstellung auf Elektromobilität entscheidend abhängt. Eine Inanspruchnahme der Förderprogramme durch „kleinere“ Aufgabenträger und Verkehrsunternehmen sollte auch dadurch erleichtert werden, dass Förderkonditionen verschiedener Bundes- und Landesförderprogramme so aufeinander abgestimmt werden, dass eine Vereinheitlichung bis hin zu wiedererkennbaren Formulierungen erreicht wird.

Eine zusätzliche Verringerung von Unsicherheiten für die im Wettbewerb stehenden Verkehrsunternehmen könnte erreicht werden, wenn die Infrastruktur (Werkstattkapazitäten und Ladeinfrastruktur) durch einen neutralen Dritten bereitgestellt würde. Dies kann z. B. der Aufgabenträger oder auch ein lokaler Energieversorger sein. Hierbei könnten auch Synergieeffekte mit kommunalen Ladeinfrastrukturkonzepten für Privat-Pkw und Carsharing erreicht werden.

Sofern die Verkehrsunternehmen infolge der Umstellung auf Elektromobilität in langlebige Wirtschaftsgüter investieren (z. B. Werkstatteinrichtung, Ladeinfrastruktur), wäre es sinnvoll, diesen auch Planungssicherheit für deren langfristige Nutzung zu geben. Außergewöhnliche Investitionen können aktuell zwar die Vergabe öffentlicher Dienstleistungsaufträge rechtfertigen, die über 10 Jahre hinausgehen. Die Laufzeit der in jedem Fall ebenfalls für den Betrieb erforderlichen Liniengenehmigungen ist jedoch nach dem PBefG auf maximal 10 Jahre begrenzt. Hier wäre es sinnvoll, wenn der Bundesgesetzgeber im PBefG die Möglichkeit schufe, die maximale Genehmigungslaufzeit an die maximal zulässige Laufzeit öffentlicher Dienstleistungsaufträge anzupassen.

5.2.3. Hinweise zur Implementierung

Die vorgeschlagenen neuen Förderschwerpunkte könnten weitgehend im Rahmen existierender Förderprogramme, beispielsweise einer Fortschreibung der E-Bus-Förderung im Sofortprogramm

„Saubere Luft“ des BMU, umgesetzt werden. Über eine begleitende wissenschaftliche Evaluation der angepassten Förderrichtlinie z. B. durch ein Expertengremium wie die ressortübergreifende AG Innovative Antriebe Bus⁴⁶ kann die Zielerreichung und die Aktualität der Anforderungen langfristig sichergestellt werden.

Damit die vorgeschlagenen Verbesserungen bei Fördertatbeständen, -konditionen, Informationsangeboten etc. tatsächlich die Situation kleiner und mittelständischer Verkehrsunternehmen sowie der entsprechenden Aufgabenträger besser berücksichtigen, sollten diese im Dialog mit den Adressaten entwickelt werden. Auch Beratungsdienstleister sowie Fahrzeughersteller sollten in die Diskussion eingebunden sein, damit sie sich rechtzeitig inhaltlich auf die abgestimmten Fördertatbestände einstellen und die von Aufgabenträger bzw. Verkehrsunternehmen nachgefragten Schwerpunktthemen (z. B. Fahrzeugspezifikationen, Restwertgarantien, Wartungs- und Instandhaltungslösungen, Service-Pakete) in ihrem Angebot angemessen berücksichtigen.

5.3. Zentrale Handlungsempfehlung 2: Wertungsbonus für oder verbindliche Vorgabe von Energieeffizienzmaßnahmen bei Vergabekriterien

5.3.1. Hintergrund

Viele technische Lösungen für mehr Energieeffizienz – wie etwa Buszüge, Leichtbaufahrzeuge oder Fahrzeuge mit umfassenden Datenerhebungssystemen, energieeffizienter Druckluftanlage und Klimatisierung – sind zwar verfügbar, werden aber im (verglichen mit dem Lkw- oder Pkw-Fahrzeugmarkt) relativ kleinen ÖSPV-Fahrzeugmarkt nicht zu attraktiven Konditionen angeboten. Ein Grund dafür ist, dass technologisch fortgeschrittene, aber teurere Fahrzeuge bei Vergaben von Verkehrsleistungen benachteiligt sind, wenn lediglich eine Preiswertung erfolgt. Können Verkehrsunternehmen in Ausschreibungen aber nicht mit besonders effizienten Fahrzeugen „punkten“, lohnt es sich für die Hersteller auch nicht, die technischen Lösungen weiterzuentwickeln, die Produktion zu skalieren und die Angebotspreise zu senken.

Auftraggeber von Verkehrsdienstleistungen haben jedoch die Möglichkeit, durch die Ausgestaltung der Vergabeunterlagen Einfluss darauf zu nehmen, mit welchen Fahrzeugen bzw. welcher Technik die Verkehrsunternehmen die Verkehrsleistung anbieten. Hierfür bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

1. Der Auftraggeber gibt den Einsatz einer bestimmten Effizienztechnologie oder eines bestimmten Antriebs (z. B. PHEV- oder batterieelektrische Busse) zwingend vor.
2. Der Auftraggeber setzt im Rahmen der Wertungskriterien Anreize dafür, dass Verkehrsunternehmen die Leistung mit bestimmter Technik oder Antriebsart anbieten. Diese Anreize müssen – um wirksam zu sein – so ausgestaltet sein, dass ein „energieeffizientes Angebot“ trotz möglicherweise hiermit verbundener Mehrkosten im Wettbewerb erfolgreich sein kann.

Die Untersuchung bisheriger Ausschreibungen zeigt, dass Energieeffizienzgesichtspunkte bislang bei Ausschreibungen kaum eine Rolle spielen. Regelmäßig ist der Preis das alleinige oder überwiegende Wertungskriterium, neben das allenfalls noch qualitative Wertungskriterien (Pünktlichkeitsquoten, Ersatzfahrzeugkonzepte etc.) treten. Zwingende Vorgaben zum Einsatz einer bestimmten Energieeffizienztechnik, -bauweise oder eines bestimmten Antriebs finden sich nur in geringer Zahl: Vereinzelt wird insbesondere der Einsatz von Hybridbussen vorgegeben, zwingende

⁴⁶ Initiiert durch Bundesumwelt- sowie Bundesverkehrsministerium; Teilnehmer: Verkehrsbetriebe, Hersteller und Zulieferer, Verbände, Forschungsinstitute und Beratungsunternehmen

Vorgaben zum Einsatz batterieelektrischer Busse fanden sich in abgeschlossenen Ausschreibungen bis 2017 nicht.

Soweit der Einsatz einer bestimmten Technik oder Antriebsart fakultativ vorgesehen ist und durch einen Anreiz im Rahmen der Wertung stimuliert werden soll, sind die Anreize häufig nicht groß genug, um die gewünschte Wirkung (ein Angebot mit energieeffizienter Technik, das über die Mindestvorgaben hinausgeht) zu erzielen.

Speziell bei den Maßnahmen, die sich für die Anwender bereits aufgrund der durch sie erzielten Energieeinsparungen amortisieren und nicht zu Mehrkosten bei der öffentlichen Hand führen, sollten Aufgabenträger von den bei Vergaben bestehenden Gestaltungsmöglichkeiten in größerem Umfang Gebrauch machen.

5.3.2. Handlungsempfehlung

Im Fall eigenwirtschaftlicher Verkehre können Energieeffizienzmaßnahmen in Nahverkehrsplänen verankert werden.

Bei Ausschreibung und Direktvergabe von Verkehrsleistungen sind Auftraggeber im Hinblick auf ihre Möglichkeit, die (Energieeffizienz-)Qualität der eingesetzten Fahrzeuge festzulegen oder zu beanreizen, zu sensibilisieren. Sie können das gewünschte Energieeffizienzniveau oder den Einsatz bestimmter Technik zwingend vorgeben oder durch Auswahl und Gewichtung der Wertungskriterien für Bieter attraktiv machen.

Verbindliche Vorgaben für den Einsatz einer bestimmten Technik können insbesondere in Betracht kommen, wenn der Auftraggeber einer Verkehrsleistung

- absehen kann, dass sich eine Maßnahme aus sich selbst heraus amortisiert und er somit keine Mehrkosten zu erwarten hat, oder
- weiß, dass er etwaige Mehrkosten ggf. unter Abschöpfung bestehender Fördermöglichkeiten finanzieren kann, oder
- aufgrund rechtlicher Vorgaben (z. B. Luftreinhalteplan) oder politischer Beschlusslagen den Einsatz einer bestimmten Technik oder Antriebsart sichergestellt haben will.

Für **fakultative Vorgaben** einer bestimmten (Antriebs-)Technik bzw. für eine Berücksichtigung der Energieeffizienz im Rahmen der Wertung gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Eine Möglichkeit ist das Vorgehen nach dem **Modell „Zahlungsbereitschaft“**: Dazu wird das erwünschte qualitative Kriterium (z. B. „Elektrofahrzeug“) monetär bewertet. Hierzu gibt der Auftraggeber an, wie viel ihm die Erbringung der Leistung mit dem besonderen qualitativen Merkmal „Elektrofahrzeug“ mehr wert ist gegenüber der Erbringung der Leistung mit Fahrzeugen entsprechend der Mindeststandards (z. B. „Dieselfahrzeug Euro VI“). In den Vergabeunterlagen wird dies dadurch umgesetzt, dass der Auftraggeber im Rahmen der Angebotswertung bei den Angeboten, die Elektrofahrzeuge vorsehen, einen rechnerischen Abschlag in der den Bietern mitgeteilten Höhe auf den Angebotspreis vornimmt.

Beispiel: *„Angebote, die den ausschließlichen Einsatz von Elektrofahrzeugen für die gesamte Laufzeit beinhalten, erhalten im Rahmen der Angebotswertung einen einmaligen Abschlag in Höhe von 100.000 € je Fahrzeug in der Fahrplanspitze.“*

- Eine weitere Möglichkeit für den Auftraggeber kann in der Durchführung einer so genannten **Budgetvergabe** mit alleinigem Wertungskriterium CO₂-Emissionen bestehen.

Dabei gibt der Auftraggeber einen Festpreis vor und bestimmt das wirtschaftlichste Angebot ausschließlich nach einem oder mehreren vorher bekannt gegebenen Qualitätskriterien. Die Vorgabe eines festen Auftragswertes führt bei Budgetvergaben grundsätzlich dazu, dass finanzielle Einsparungen, wie sie infolge wettbewerblicher Verfahren grundsätzlich möglich sein können, nicht realisiert werden. Der Auftraggeber kann einen Wettbewerb stattdessen in der Weise durchführen, dass er einen Preis festsetzt, zu dem die ausgeschriebene Leistung zu erbringen ist und vorgibt, dass der Bieter den Zuschlag erhält, dessen Angebot nachweislich zum Beispiel die geringste CO₂-Emission beinhaltet. Dabei besteht auch die Möglichkeit, ein Mindestmaß an Emissionsreduktion verbindlich für alle Bieter vorzugeben. Der Bieter hat dann hierfür unter Angabe der konkreten Verbrauchsdaten anzugeben, welche Fahrzeuge er einsetzen wird, welches sein Flottenmix ist und welchen Strommix er verbindlich zusichert.

Für zukünftig abzuschließende, langlaufende öffentliche Dienstleistungsaufträge kann es sinnvoll sein, die Möglichkeit von Umbestellungen oder Revisionsklauseln vertraglich zu etablieren, um hierdurch während der vertraglichen Laufzeit energieeffizienzrelevante Innovationen einfordern und umsetzen zu können. Der Einsatz dieser Instrumente ist jedoch auch unter vergaberechtlichen Gesichtspunkten sorgfältig zu prüfen.

5.3.3. Hinweise zur Implementierung

Die hier gegebene Handlungsempfehlung richtet sich primär an Aufgabenträger bei der Ausschreibung von Verkehrsleistungen. Erst im Anschluss an diese werden die Vorgaben Eingang in Fahrzeugbeschaffungsvorgänge finden.

Soweit eine Verkehrsleistung wettbewerblich oder direkt vergeben wird, legt der Aufgabenträger in den Vergabeunterlagen fest, welche Qualität die zum Einsatz kommenden Fahrzeuge haben müssen und wie gegebenenfalls Mehrqualitäten im Rahmen der Wertung honoriert werden. Die Beschaffung der Fahrzeuge liegt in der Zuständigkeit der Verkehrsunternehmen. Soweit es sich um kommunale Verkehrsunternehmen handelt, sind auch sie verpflichtet, die Beschaffung der Fahrzeuge im Wettbewerb nach den Regeln des Sektorenvergaberechts zu vergeben.

In der Folge sind Verkehrsunternehmen bei der Fahrzeugbeschaffung an die verbindlichen Vorgaben der – wettbewerblich oder direkt vergebenen – Verkehrsleistung gebunden. Im Übrigen können sie im Rahmen der Fahrzeugbeschaffung Energieeffizienzvorgaben gegenüber dem Hersteller aufstellen und hierdurch Kostenersparnisse erzielen.

Die Beanreizung von Energieeffizienzkriterien in der Wertung kann **ungewollte Effekte**, insbesondere höhere Angebotspreise oder eine Verengung des Bietermarktes, zur Folge haben. Zur Vermeidung von Angebotspreisen, die die verfügbaren Haushaltsmittel übersteigen, hat der Auftraggeber seine Zahlungsbereitschaft für die Mehrqualität festzulegen und sodann die Gewichtung der Energieeffizienzkriterien oder Art und Umfang der Energieeffizienzvorgaben unter Abschätzung der Auswirkung auf die Angebotspreise und zugängliche Förderung festzulegen. Er wird daher ggf. unter Zuhilfenahme externer Unterstützung die Perspektive eines potenziellen Bieters einnehmen, um zu ermitteln, was die gewünschten Kriterien an Mehrkosten mit sich bringen können.

Bei Gestaltung der Vergabeunterlagen ist darauf zu achten, sowohl durch die Anforderungen als auch durch deren Beschreibung kleine und mittlere Bieter nicht zu überfordern. Soweit möglich, sind den Bietern Kalkulationshilfen zur Verfügung zu stellen und durch entsprechend lange Angebotsfristen die Möglichkeit zu schaffen, sich extern unterstützen zu lassen. Gleichzeitig sollten die Kann-Vorgaben so gesetzt werden, dass sie mit realistischen und spürbaren Vorteilen in der Angebotswertung einhergehen und so die Kreativität der Bieter stimulieren.

Die **Rechtssicherheit** entsprechender Vorgaben der Auftraggeber ist gegeben. Das Vergaberecht erlaubt die Berücksichtigung von mit dem Auftragsgegenstand zusammenhängenden Energieeffizienzanforderungen sowohl bei Beschreibung der Leistung, bei der Wertung der Angebote als auch bei Bestimmungen zur Ausführung der Leistung (vgl. §§ 97 Abs. 3, 127 Abs. 1 S. 3 und 128 Abs. 2 S. 3 GWB⁴⁷, §§ 31 Abs. 3, 58 Abs. 2 VgV⁴⁸).

5.4. Zentrale Handlungsempfehlung 3: Förderung von Energieeffizienz-„Add-ons“ bei Arbeiten an der Schienenverkehrsinfrastruktur sowie bei der Generalüberholung von Schienenfahrzeugen

5.4.1. Hintergrund

Sowohl größere Fahrzeugbeschaffungen als auch Errichtung oder Umbau von Infrastrukturen wie neuer Betriebshöfe binden über Jahre große Investitionssummen der Verkehrsunternehmen. Öffentlichkeit und Kontrollinstanzen, wie Gesellschafter der Verkehrsunternehmen und Rechnungshöfe, erwarten höchste Kosteneffizienz bei der Vergabe. Gleichzeitig bieten sich bei der Beschaffung oder Modernisierung solch langlebiger Wirtschaftsgüter vielfach Möglichkeiten zur Berücksichtigung energieeffizienzsteigernder Zusatzinvestitionen oder Nachrüstlösungen. Aktuelle Beispiele bei der Überholung von Fahrzeugen sind Rückspeisefähigkeit, effiziente Klimatisierung, Leichtbaumaterialien im Innenraum, Wärmedämmung und LED-Beleuchtung. Bei der Neuerrichtung von Infrastrukturen sind geschlossene Fahrzeugabstellhallen und die Nutzung von Tunnelabwärme Beispiele für energieeffizienzsteigernde Zusatzinvestitionen.

Außerhalb der genannten „Gelegenheitsfenster“ – Neubau, Neubeschaffung, Generalüberholung – können derart aufwendige Maßnahmen im Regelfall nicht durchgeführt werden. Wenn die erforderlichen Zusatzinvestitionen zu jenen Zeitpunkten nicht aufgebracht werden können, werden also wertvolle Chancen für eine Erhöhung der Energieeffizienz verpasst, selbst wenn zumindest ein Teil der Investition durch Einsparungen bei Energiekosten und Wartung über die mitunter noch erhebliche Restnutzungsdauer kompensiert werden könnte.

5.4.2. Handlungsempfehlung

Es besteht ein Mangel an adäquaten Förderinstrumenten, die Lücken zwischen erzielbaren Einsparungen und zusätzlichen Investitionsbedarfen bei Umsetzung ambitionierter Energieeffizienztechnologien schließen können. Die Förderprogramme der Länder – ggf. mit Unterstützung des EFRE – könnten um entsprechende Fördertatbestände erweitert werden. Dabei sollte nicht nur bei Neuanschaffungen und Neubau der Stand der Technik umgesetzt werden, sondern soweit wie möglich auch bei Umbau und Generalüberholung.

Alternativ könnte ein Programm entwickelt werden, bei dem die Förderung an abstrakte Tatbestände geknüpft ist:

- Es handelt sich um ein langlebiges Wirtschaftsgut.
- Die Maßnahme ist eine optionale, d. h. für die Verwendbarkeit nicht zwangsläufig erforderliche Ergänzung.

⁴⁷ Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen

⁴⁸ Verordnung über die Vergabe öffentlicher Aufträge

- Im wirtschaftlich vertretbaren Rahmen ist sie nur im Zuge einer Neubau-, Neubeschaffungs- oder Überholungsinvestition umsetzbar.

Für derartige Maßnahmen sollten Verkehrsunternehmen und ggf. Aufgabenträger förderungswürdige Projekte unter Angaben zu Investition und Energieeinsparung durch das „Add-on“ beantragen können. Sinnvoll wäre auch die Förderung von aus mehreren „Add-ons“ bestehenden Maßnahmenbündeln. Die Allokation der Fördermittel sollte danach erfolgen, welche Projekte die höchsten Einsparungen je Förder-Euro (ggf. unter Berücksichtigung einer Mindesteinsparung) bieten.

5.4.3. Hinweise zur Implementierung

Fahrzeughersteller und -zulassungsbehörden (bei Maßnahmen an Fahrzeugen) sowie Genehmigungsbehörden (bei Infrastrukturen) sollten frühzeitig in die genaue Konzeption einer solchen Fördermaßnahme eingebunden werden, damit Fragen der Zulassungsfähigkeit bei Errichtung bzw. Nachrüstung neuer Komponenten ausreichend berücksichtigt werden.

Bei manchen der betrachteten Maßnahmen wie der Nutzung von Tunnelabwärme stehen – zumindest bei aktuellem Stand der Technik – große Mehraufwände sehr kleinen Effizienzpotenzialen gegenüber. Daher erscheinen die Definition einer betrieblichen Mindestenergieeinsparung und deren bestmögliche Vorabschätzung durch Hersteller oder Gutachter sinnvoll.

5.5. Weitere Handlungsansätze im Interesse einer verbesserten Energieeffizienz im ÖSPV

5.5.1. Vorbemerkung

In den Abschnitten 5.2 bis 5.4 wurden die **drei zentralen Handlungsempfehlungen** vorgestellt, denen das Projektteam nach Diskussionen mit Vertretern der Musterunternehmen sowie mit Experten und Stakeholdern die gegenwärtig höchste Relevanz einräumt. Für diese drei Ansätze wurde in den genannten Unterkapiteln eine möglichst konkrete Ausgestaltung und Implementierung ausgearbeitet.

Darüber hinaus wurden durch das Projektteam und die weiteren Beteiligten zahlreiche **weitere** aus Energieeffizienzsicht **unvorteilhafte Rahmenbedingungen** identifiziert, **Anforderungen** an verschiedene Akteure formuliert sowie **Ideen** entwickelt, wie effizienzsteigernde Maßnahmen besser umgesetzt werden können. Diese werden nachfolgend stichwortartig genannt. Es sollen damit Ansätze in die Diskussion eingebracht werden, deren weitere Ausarbeitung außerhalb des Projektkontexts empfohlen wird.

Die Ansätze sind jeweils einem primären Adressaten zugeordnet. In den meisten Fällen ist jedoch ein Zusammenspiel verschiedener Akteure erforderlich.

5.5.2. Weitere Handlungsansätze für Verkehrsunternehmen

- Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz, die neben reduzierten Umweltwirkungen auch betriebswirtschaftliche Vorteile für die Verkehrsunternehmen erbringen, sind verfügbar. Bei jeder Fahrzeugneubeschaffung und -überholung sowie bei jeder Infrastrukturmaßnahme gilt es zu prüfen, welche Optionen umgesetzt werden können, die durch die zu erwartenden Einsparungen in der Lage sind, die meist höheren Anfangsinvestitionen zu kompensieren. Beispiele sind Leichtbaufahrzeuge, optimierte Fahrstromverteilung und Assistenzsysteme zum energieeffizienten Fahren.

- Manche Technologien, wie etwa Leichtbaubusse, sind nur bei einer begrenzten Anbieteranzahl verfügbar. Eine Beschaffung bei diesen Herstellern steht gerade bei kleineren Fuhrparks oft der angestrebten Herstellertreue entgegen. Verkehrsunternehmen sollten in Erwägung ziehen, diese ggf. zu vernachlässigen.
- Individuelles Fahrverhalten spielt aus Sicht der Beteiligten eine zentrale Rolle für den Energieverbrauch. Im Busbereich, zumal beim Verbrennungsmotor, sind die Regeln eines sparsamen Fahrstils in der Theorie hinreichend bekannt und die Umsetzung ist bei ansonsten wenig gestörtem Betrieb grundsätzlich auch unter Einhaltung des Fahrplans möglich. Vertreter der Verkehrsunternehmen sehen jedoch die mangelnde Umsetzung durch das Fahrpersonal in der Praxis als ein prioritär zu behandelndes Energieeffizienzthema an (s. Abschnitt 6.1). Die in Abschnitt 3.2.7.3 vorgestellten energiesparenden Assistenzsysteme (ggf. in Kombination mit innerbetrieblichen Wettbewerben zur Energieeinsparung), können als Lösung empfohlen werden – sie können Akzeptanz durch das Fahrpersonal finden und eine Amortisation der Einführungskosten ist i. d. R. innerhalb kürzester Zeit möglich.
- Auch im Schienenverkehr bietet eine verbrauchsoptimierende Fahrassistenz große Einsparpotenziale, stellt jedoch im komplexen Gesamtsystem eine anspruchsvolle Herausforderung dar. Innovative Datenverarbeitungslösungen sind am Markt verfügbar und können ebenfalls deutliche betriebswirtschaftliche Vorteile erbringen. Gleichzeitig leidet der Markt angesichts beschränkter Größe unter einer für die weitere Entwicklung nicht ausreichenden Nachfrage potentieller Anwender. Es besteht also dringender Bedarf, dass Verkehrsunternehmen noch stärker Systeme zur umfassenden energetischen Optimierung von Fahrverhalten, Nebenverbrauchersteuerung etc. nachfragen und diese gemeinsam mit den Systemanbietern und ggf. auch in Kooperation mehrerer Verkehrsbetriebe weiterentwickeln.
- Elementare Grundlage für solche Systeme ist die Verfügbarkeit der energierelevanten Daten. Dies beinhaltet spezifische und hochaufgelöste Verbrauchsdaten einzelner Fahrzeuge und einzelner Nebenaggregate innerhalb des Fahrzeugs sowie die zugehörigen Randbedingungsdaten wie fahrgastbedingtes Zuladungsgewicht, Temperaturen und Daten aus der Infrastruktur. Da bei Fahrzeugen und Infrastrukturen des Schienenverkehrsbereichs lange Investitionszyklen herrschen, sollten zum Zeitpunkt von Anschaffung bzw. Errichtung sowie Überholung von Fahrzeugen bzw. Infrastrukturen dahingehende technische Möglichkeiten unbedingt voll ausgeschöpft werden. Ausschreibungen für Fahrzeugbeschaffungen und -modifikationen sollten diesen Anspruch unbedingt beinhalten.
- Viele Experten bemängeln einen unzureichenden Austausch zu energieeffizienzrelevanten Themen zwischen Verkehrsunternehmen und Anbietern von Fahrzeugen und Komponenten. Dies betrifft technische Fragen, aber auch betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen der Unternehmen, wie etwa Energiekosten. Seitens der Fahrzeughersteller wurde der Wunsch geäußert, ein besseres Verständnis der in der Praxis auf Seiten der Verkehrsbetriebe anfallenden Energiekosten zu bekommen. Dies würde die Abwägung erleichtern, welche Maßnahmen in der betriebswirtschaftlichen Betrachtung voraussichtlich positiv bewertet werden. Für einen produktiven Informationsaustausch ist hier ein geeignetes Format zu finden, das den Herstellern belastbare Anhaltspunkte bietet und gleichzeitig den Schutz vertraulicher Informationen der Verkehrsbetriebe gewährleistet. Lösungen können z. B. die Vereinbarung von Innovationspartnerschaften sein⁴⁹. Dabei können im Interesse eines besseren Technologietransfers auch wissenschaftliche Einrichtungen einbezogen werden.

⁴⁹ Aktuelles Beispiel: „Innovationspartnerschaft“ von Stadtwerke München und Münchner Verkehrsgesellschaft (SWM/MVG) mit Valeo, EBUSCO und MAN.

- Ebenso ist ein verbesserter Know-How-Transfer über Energieeffizienzansätze aller Art zwischen unterschiedlichen Verkehrsbetrieben erforderlich, damit die Unternehmen Hinweise auf eigene Potenziale bekommen. Hier können Landes- oder Bundesinstitutionen, aber auch Verbände, noch stärker aktiv werden. Auch neutrale Dritte, z. B. Beratungsunternehmen, können vermitteln und den Austausch (z. B. mittels Benchmarking) fördern. V. a. auch kleinere Verkehrsunternehmen und Aufgabenträger mit geringen personellen Kapazitäten werden so in die Lage versetzt, Einsparpotenziale auszuschöpfen.
- Durch gemeinsame und überbetriebliche Fahrzeug- und Komponentenbeschaffungen können sowohl Verkehrsunternehmen als auch Hersteller profitieren. Beispiele sind Beschaffungsinitiativen für alternativ angetriebene Busse, aber auch Kooperationen von (v. a. kleineren) Betrieben, insbes. im Straßenbahnbereich⁵⁰. Letztere können größere Fahrzeugzahlen mit aufeinander abgestimmten Anforderungen zu günstigeren Konditionen beschaffen. Im Gegenzug gewinnen die Fahrzeuganwender als Abnehmer umfangreicherer Losgrößen an Einfluss auf die Hersteller, was die Anforderung innovativer Technologien angeht. Es ist hilfreich, wenn sich Aufgabenträger hinsichtlich der Fahrzeugspezifikationen zuvor untereinander abstimmen (vgl. Abschnitt 5.5.4). Durch harmonisierte Anforderungen ermöglichen sie den Verkehrsunternehmen verstärkte überregionale Kooperationen.

5.5.3. Weitere Handlungsansätze für Fahrzeughersteller und Zulieferer

- Grundsätzlich bereits verfügbare Effizienztechnologien verbreiten sich im ÖSPV im Vergleich zu den deutlich größeren Absatzmärkten für Pkw und Lkw naturgemäß oft langsamer. Hersteller und Zulieferer können sich Wettbewerbsvorteile im ÖSPV-Markt verschaffen, indem sie lokal emissionsfreie Antriebs- sowie innovative Effizienztechnologien bei Nebenverbrauchern (z. B. Klimaanlage) mit hoher Priorität auf den Bus- und Schienenverkehrsbereich übertragen und diese bei Fahrzeugausschreibungen offensiv anbieten.
- Bei mehreren relevanten Effizienztechnologien, wie dem elektrischen Antrieb, flexiblen und bedarfsgerechten Fahrzeuggrößen (Anhängerrümpfe) und Leichtbau, ist ein Angebotsdefizit seitens der Fahrzeughersteller festzustellen. Erst in einem voll ausgebildeten Angebotsmarkt werden anspruchsvolle Vorgaben in Ausschreibungen ermöglicht und Kostensenkungspotenziale erschlossen.

5.5.4. Weitere Handlungsansätze für Aufgabenträger

- Effiziente Ausgestaltung von Klimatisierung sowie bedarfsgerechtes Kneeling stellen wirksame und kosteneffiziente Energieeffizienzmaßnahmen dar. Wie in den Abschnitten 3.2.4.2, 3.2.4.3 und 3.2.4.6 dargestellt, werden sie von Fahrgästen vielerorts nicht in Frage gestellt und reduzieren bei sensibler Umsetzung den Fahrgastkomfort nicht. Andernorts bewegen sie sich in einem sensiblen Spannungsfeld. Aufgabenträger können bei der Setzung von Standards von einem engen Dialog mit den Verkehrsunternehmen profitieren, die aus dem täglichen Kontakt die Perspektive der Fahrgäste kennen. Bei guter Kenntnis dieser Sichtweise können sie vermehrt Verantwortung auch für den energieeffizienten Betrieb übernehmen. Auch bei der anschließenden Durchführung und Kommunikation derartiger Maßnahmen hilft eine enge Kooperation zwischen Verkehrsunternehmen und Aufgabenträgern.

⁵⁰ Aktuelles Beispiel: Gemeinsame Beschaffung von Straßenbahnfahrzeugen durch die Verkehrsbetriebe Brandenburg a. d. Havel, Cottbus und Frankfurt (Oder) (Kurpjuweit 2018).

5.5.5. Handlungsansätze für Verwaltung und politische Entscheidungsträger auf der kommunalen Ebene

- Von der kommunalen Verwaltung und von politischen Entscheidungsträgern erwarten die Verkehrsunternehmen in erster Linie Planungssicherheit. Auf Aufgabenträgerseite sollte ein möglichst verbindliches Zielbild für den ÖPNV z. B. im Jahr 2030 existieren und eine Perspektive für die langfristige Sicht bis z. B. 2050.
- Diese Planungssicherheit beinhaltet als eine der vorrangigen Aufgaben eine Strategie zur Elektrifizierung des Busverkehrs, die Verkehrsunternehmen, Aufgabenträger und kommunale Verwaltung gemeinsam entwickeln sollten.
- Eine wichtige Aufgabe der Kommune besteht in der Vermittlung der Vorteile von Effizienzverbesserungen im ÖPNV – die teils gleichzeitig Angebotsverbesserungen sind – für die Allgemeinheit. In der Praxis scheitern Maßnahmen zur Privilegierung und Beschleunigung des ÖSPV häufig an wachsenden und konkurrierenden Ansprüchen an den Straßenraum, kritischer Beurteilung durch lokale Medien und geteilten behördlichen Zuständigkeiten (v. a. schwieriges Zusammenspiel zwischen den Bedürfnissen des Verkehrsunternehmens und der kommunalen Verkehrs- / Bauleitplanung). Hier ist die Kommune in der Pflicht, der Öffentlichkeit Planungen zu vermitteln, Konflikte zwischen verschiedenen Verkehrsträgern und auch mit Anwohnern zu moderieren und so zu einer effizienten und akzeptierten Umsetzung beizutragen.
- Umgesetzte Beschleunigungsmaßnahmen leiden teils an mangelnder Durchsetzung und Aufrechterhaltung: So werden z. B. Vorrangschaltungen für Busse und Straßenbahnen nach Baumaßnahmen nicht wieder eingespielt. Vor allem aber mangelt es vielerorts an der konsequenten Freihaltung von Busspuren, Straßenbahntrassen und Haltestellenbereichen. Hier ist die Kommune in der Pflicht, selbst konsequent zu handeln, den Verkehrsbetrieb zur Durchsetzung zu bevollmächtigen⁵¹ oder aber die von Bussen und Straßenbahnen genutzten Flächen baulich vom übrigen Verkehr zu trennen.

5.5.6. Handlungsansätze für Verwaltung und politische Entscheidungsträger auf der Landesebene

- Verkehrsunternehmen werden in ihren Bestrebungen zu mehr Energieeffizienz seitens der Bundesländer am besten durch eine verlässliche Grundfinanzierung unterstützt. Aufgrund des großen Investitionsvolumens gilt die Forderung nach langfristiger Planungssicherheit ganz besonders für lang laufende Maßnahmen im Schienenverkehr⁵². Die bereitgestellten Bundesmittel für den ÖPNV müssen durch die Länder auch in Zukunft investiv verwendet werden.
- Sowohl bei Förderprogrammen (z. B. Förderquoten bei Beschaffung von E-Bussen), als auch bei der Grundfinanzierung (z. B. Existenz von Landesmitteln für die Beschaffung von Schienenfahrzeugen⁵³) könnte eine bundesweite Harmonisierung der Förderungs- und Finanzierungsbedingungen die Planungssicherheit für alle Beteiligten erhöhen. Umgekehrt könnten als Konditionen für den Zugang zu diesen Mitteln anspruchsvolle Effizienzstandards definiert werden, z. B. bei E-Fahrzeugen (Verbrauchsvorgaben) und bei Betriebshöfen (geschlossene Abstellung).

⁵¹ Beispielsweise darf nach dem Mobilitätsgesetz des Berliner Senats von 2018 die BVG selbst Fahrzeuge abschleppen, ohne dass dies polizeilich angeordnet wird (Neumann 2018).

⁵² Dies gilt i. Ü. auch für den SPNV und SPFV, vgl. z. B. Stockhausen et al. 2017

⁵³ Diese war in manchen Bundesländern zeitweilig komplett ausgesetzt und wurde aktuell beispielsweise in Baden-Württemberg wieder eingeführt (s. z. B. Schwarz 2017).

5.5.7. Handlungsansätze für Verwaltungen und politische Entscheidungsträger auf der Bundesebene

- Der langfristige Durchbruch des E-Antriebs im Busverkehr wird kaum mehr in Frage gestellt. Verkehrsbetriebe stehen jedoch vor erheblichen Einmalinvestitionen und Fahrzeughersteller können noch keine Skaleneffekte in der Produktion erzielen. Um den Umbruch zu beschleunigen, sollte der Bund weiter durch geeignete finanzielle Förderung helfen, den Übergang der Branche in die Elektromobilität zu beschleunigen, damit die Zusatzkosten nicht durch Verkehrsunternehmen oder sogar Fahrgäste getragen werden müssen. Ein Ansatzpunkt ist die Ausgestaltung von Förderprogrammen, die z. B. in der zentralen Handlungsempfehlung 1 (Abschnitt 5.2) thematisiert wird.
- Andere Handlungsansätze zielen darauf ab, die *laufenden* Anwenderkosten von E-Bussen zu vermindern. So werden etwa auf Landesebene Zuschüsse zu Betriebskosten von BEV- und HEV-Bussen gegeben (Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg 07.05.2018). Eine auf Oberleitungsbusse angeglichene Berechnung der Stromsteuer gilt bereits und eine Reduktion der EEG-Umlage auf den für Schienenbahnen üblichen (um 80 % reduzierten) Satz wird diskutiert und ist im aktuellen Koalitionsvertrag der im Bund regierenden Parteien enthalten. Diese Ansätze sind übergangsweise als Anschubförderung für eine aus Effizienzsicht vorteilhafte Technologie geeignet. Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass geringe Energiekosten die durch verbrauchssenkende Technologien erzielbaren Wirtschaftlichkeitsvorteile vermindern. Dies kann zur Folge haben, dass energieeffizienzsteigernde technische Entwicklungen bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen gehemmt werden.
- Einzelne Energieeffizienzmaßnahmen könnten durch Detailanpassung der Rechtslage auf Bundesebene gefördert werden. Neben der Energiebesteuerung (u. a. auch die Behandlung von rückgespeistem Strom) sind Regulierungen zur Straßenzulassung von Fahrzeugen mit effizienzsteigernden Technologien optimierungsbedürftig. So wäre Voraussetzung für die stärkere Verbreitung von Anhängerzügen eine bundeseinheitliche dauerhafte Straßenzulassung der Gespanne. Dies würde Verlässlichkeit für Verkehrsbetriebe bei Investitionsentscheidungen schaffen und dazu beitragen, dass ein funktionierender Markt für gebrauchte Anhänger entsteht, so dass sich Restwerttrisiken mindern.
- Ansonsten wird die Rolle des Bundes weiterhin in der Unterstützung von Forschung und Entwicklung sowie von Pilotanwendungen gesehen. In entsprechenden Förderprogrammen verstärkt adressiert werden sollten dabei
 - bedarfsgerechte und flexible Fahrzeuggrößen (Anhängierzüge, aber auch neue Bedienkonzepte mittels autonomer Kleinfahrzeuge),
 - verbesserte Datenerhebung und -verarbeitung (s. Abschnitt 3.2.7.4) zur Erreichung einer erhöhten Effizienz von Schienenverkehrssystemen, Speichertechnologien und verbesserte Kopplung von Stromerzeugung und -nachfrage inklusive der Versorgung batterieelektrischer Busse,
 - Klimatechnik und Wärmedämmung der Fahrzeuge,
 - Abwärmenutzung aus Tunnelstrecken
 - sowie die effizientere Nutzung des Straßenraums, (u. a. auch durch neue digitale Technologien), beispielsweise durch vergleichende Analysen der Wirksamkeit verschiedener Konzepte zur Beschleunigung des ÖSPV.
- Bei vielen Energieeffizienzthemen, nicht nur der Elektromobilität, fehlen kleinen und mittelständischen Verkehrsunternehmen die personellen und finanziellen Kapazitäten, mögliche Maß-

nahmen selbst zu erarbeiten. Niederschwellige Informationsplattformen könnten hier hilfreich sein.

- Daneben würde eine verstärkte Bundesförderung für die Erstellung von Energieeffizienz- und Klimaschutzkonzepten durch Verkehrsunternehmen und Aufgabenträger, in Zusammenarbeit mit externen Beratern (z. B. auch durch „Beratungsgutscheine“), eine systematische Herangehensweise an das Thema Energieeffizienz fördern.

5.5.8. Handlungsansätze für politische Entscheidungsträger auf der europäischen Ebene

- Auf EU-Ebene werden Rahmenbedingungen für die Vergabe öffentlicher Dienstleistungsaufträge definiert. So können auch Verpflichtungen zur Vorgabe emissionsarmer oder -freier Fahrzeuge vorgenommen werden.
- Ansonsten könnte ein wesentlicher Hebel zu mehr Energieeffizienz künftig voraussichtlich in der Festlegung von CO₂-Flottenzielwerten für schwere Nutzfahrzeuge liegen. Ab 2022 sollen die momentan für Lkw in Aufstellung befindlichen Ziele auf Busse ausgeweitet werden. Dabei müssen aufgrund der hohen Bedeutung des Energiebedarfs von Nebenverbrauchern deren realitätsnahe Berücksichtigung und die Vermeidung von damit verbundenen „Schlupflöchern“ im Testzyklus im Fokus stehen.
- Ein Impuls zur Implementierung von Energieeffizienzanforderungen in der Vergabepraxis kann auch vom europäischen Gesetzgeber ausgehen. Der Richtlinienvorschlag der EU-Kommission zur Überarbeitung der sog. Clean Vehicles Richtlinie 2009/33/EG sieht für Verkehrsleistungen mit Bussen vor, dass bis zum Jahr 2025 in Deutschland der Anteil „sauberer“ Fahrzeuge mindestens 50 % der von Behörden oder Betreibern von Verkehren im Sinne der VO (EG) Nr. 1370/2007 beschafften Fahrzeuge (gekauft, geleast oder gemietet) betragen muss. Selbiges gilt auch für öffentliche Dienstleistungsaufträge über Verkehrsdienste. Diese verbindliche Einführung einer Mindestquote für saubere Fahrzeuge dürfte geeignet sein, Aufgabenträger zu veranlassen, entsprechende Anforderungen in ihren Vergabeunterlagen zu verankern. Entscheidend wird dabei sein, die Definition von „Clean Vehicles“ (Einbezug und ggf. Anrechnungsfaktor von Hybrid-, biogasbetriebenen Fahrzeugen etc.) und den CO₂-Grenzwert ambitioniert zu gestalten.

6. Anhang

6.1. Werkstattgespräche

6.1.1. Werkstattgespräch zum Thema „Energieeffizienzmaßnahmen beim Omnibus“

Am 22.09.2017 fand am Berliner Standort des Öko-Instituts ein Werkstattgespräch zum Thema „Energieeffizienzmaßnahmen beim Omnibus“ statt. Es nahmen 17 Personen teil: Fünf Vertreter des Projektkonsortiums, fünf Vertreter der teilnehmenden Verkehrsunternehmen, zwei Vertreter von Fahrzeugherstellern, drei Vertreter von Forschungseinrichtungen sowie je eine Person aus dem VDV und dem UBA.⁵⁴

Dabei bewerteten die Teilnehmer die besprochenen Energieeffizienzthemen und -maßnahmen beim Omnibus. Jeder Teilnehmer mit Ausnahme des Projektteams und der Vertreter von Auftraggeber und Projektbegleitung vergab je zwei Wertungspunkte für die hinsichtlich des Einsparpotenzials und der Durchführbarkeit am höchsten bewerteten Maßnahmen.

Die hinsichtlich des **Einsparpotenzials** am häufigsten bepunkteten Maßnahmen waren:

1. Fahrerschulung in Verbindung mit Anreizsystem
2. BEV-Bus
3. Eigene Fahrspuren + Busbeschleunigung
Energieeffizienzsteigerung Heizung / Lüftung / Kühlung; Wärmepumpe
4. Buszüge, angepasste Gefäßgrößen
Leichtbau, Gewichtsreduktion
Elektrifizierung / Steigerung Energieeffizienz weiterer Nebenverbraucher
5. Besetzungsgrad / Auslastungssteigerung
Hybridantrieb
Euro VI-Dieselmotor
Chiptuning / Optimierung der Motorsteuerung

Die übrigen zur Auswahl gestellten Maßnahmen / Themen sah kein Teilnehmer als eine der zwei besten Maßnahmen im Hinblick auf das Einsparpotenzial an.

Die hinsichtlich der **Durchführbarkeit** am häufigsten bepunkteten Maßnahmen waren:

1. Fahrerschulung in Verbindung mit Anreizsystem
2. BEV-Bus
Eigene Fahrspuren + Busbeschleunigung
Buszüge + angepasste Gefäßgrößen
Leichtbau, Gewichtsreduktion
3. Energieeffizienzsteigerung Heizung / Lüftung / Kühlung; Wärmepumpe

⁵⁴ Vertreter von Auftraggeber und Projektbegleitung, die bei den Werkstattgesprächen teilweise anwesend waren, sind jeweils nicht mitgezählt.

4. Elektrifizierung / Energieeffizienzsteigerung weiterer Nebenverbraucher
5. Hybridantrieb

Chiptuning / Optimierung der Motorsteuerung

Die übrigen zur Auswahl gestellten Maßnahmen / Themen sah kein Teilnehmer als eine der zwei besten Maßnahmen im Hinblick auf die Durchführbarkeit an.

6.1.2. **Werkstattgespräch zum Thema „Energieeffizienzmaßnahmen bei Straßenbahn, Stadtbahn und U-Bahn“**

Am 25.10.2017 fand auf dem Straßenbahnbetriebshof der BVG in Berlin-Lichtenberg ein Werkstattgespräch zum Thema „Energieeffizienzmaßnahmen bei Straßenbahn, Stadtbahn und U-Bahn“ statt. Es nahmen 18 Personen teil: Sechs Vertreter des Projektkonsortiums, fünf Vertreter der teilnehmenden Verkehrsunternehmen, ein Vertreter eines weiteren Verkehrsunternehmens, zwei Vertreter von Fahrzeugherstellern, zwei Vertreter von Forschungseinrichtungen sowie je eine Person aus dem Verband der Bahnindustrie und dem UBA.

Dabei bewerteten die Teilnehmer die besprochenen Energieeffizienzthemen und -maßnahmen bei Straßenbahn, Stadtbahn und U-Bahn. Jeder Teilnehmer mit Ausnahme des Projektteams und der Vertreter der Projektbegleitung vergab je zwei Wertungspunkte für die hinsichtlich des Einsparpotenzials und der Durchführbarkeit am höchsten bewerteten Maßnahmen.

Die hinsichtlich des **Einsparpotenzials** am häufigsten bepunkteten Maßnahmen waren:

1. Optimierung Heizung, Klimatisierung & Belüftung
2. effiziente Fahrweise / Bonussystem
3. Straßenbahn: Kommunikation Lichtsignalanlagen – Fahrzeug
4. Durchkopplung Speisebereiche & Überprüfung der Auslegung der Bahnstromversorgung
 ÖV-Priorisierung im Verkehrsfluss
 GoA4 Betrieb U-Bahn (autonomer Betrieb)
 Fahrzeugdesign

Die übrigen zur Auswahl gestellten Maßnahmen / Themen sah kein Teilnehmer als eine der zwei besten Maßnahmen im Hinblick auf das Einsparpotenzial an.

Die hinsichtlich der **Durchführbarkeit** am häufigsten bepunkteten Maßnahmen waren:

1. Optimierung Heizung, Klimatisierung & Belüftung
2. effiziente Fahrweise / Bonussystem
3. Straßenbahn: Kommunikation Lichtsignalanlagen – Fahrzeug
 Durchkopplung Speisebereiche & Überprüfung der Auslegung der Bahnstromversorgung
4. Bremsenergiespeicherung

Die übrigen zur Auswahl gestellten Maßnahmen / Themen sah kein Teilnehmer als eine der zwei besten Maßnahmen im Hinblick auf die Durchführbarkeit an.

6.1.3. Werkstattgespräch zum Thema „Finanzierung – Optionen für eine Unterstützung energieeffizienzsteigernder Investitionen“

Am 14.12.2017 fand am Berliner Standort des Öko-Instituts ein Werkstattgespräch zum Thema „Finanzierung – Optionen für eine Unterstützung energieeffizienzsteigernder Investitionen“ statt. Es nahmen 16 Personen teil: Fünf Vertreter des Projektkonsortiums, zwei Vertreter der teilnehmenden Verkehrsunternehmen, zwei Vertreter von Bundes- und Landesministerien, zwei Vertreter von Aufgabenträgern sowie je eine Person aus einem weiteren Verkehrsunternehmen, der KfW, dem VDV, dem UBA und einem fachkundigen ÖPNV-Beratungsunternehmen.

6.1.4. Werkstattgespräch zum Thema „Entwicklung eines Instrumentariums zur Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen“

Am 19.02.2018 fand im Bundesverkehrsministerium in Berlin ein Werkstattgespräch zum Thema „Entwicklung eines Instrumentariums zur Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen“ statt. Es nahmen 19 Personen teil: Vier Vertreter des Projektkonsortiums, fünf Vertreter der teilnehmenden Verkehrsunternehmen, drei Vertreter von Bundes- und Landesministerien, je zwei Vertreter von Aufgabenträgern und weiteren Verkehrsunternehmen sowie je eine Person aus dem VDV, dem UBA und einem ÖPNV-Beratungsunternehmen.

6.2. Datengrundlage der betriebswirtschaftlichen Berechnungen

Tabelle 6-1: Kreuzpreiselastizitäten der Musterunternehmen

Unternehmen	Einheit	Wert
BVG	%/%	0,046
DVB	%/%	0,036
KVIP	%/%	0,026
VB Bachstein	%/%	0,026
MoBiel	%/%	0,036

Quelle: Werte vergleichbarer Regionen/Städte entnommen aus „Metropolitan Transport Simulator (transport in London)“ und „The demand for public transport - a practical guide“ S.10- bis 105 durch Bildung von Mittelwerten aus den gefunden Vergleichswerten anteilig je Betriebszweig bzw. direkt für die Unternehmen mit nur einem Betriebszweig Bus.

6.3. Datengrundlage der Umweltkostenabschätzung

Tabelle 6-2: Umweltkostensätze Luftschadstoffemissionen und Treibhausgasemissionen im Jahr 2016 in €₂₀₁₆/t

Bereich	Einheit	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	NMHC	NO _x	Partikel	SO ₂	Staub
Innerorts	€ ₂₀₁₆ /t	2.155	86	25.682	1.831	16.590	392.228	14.220	
Verkehr Außerorts	€ ₂₀₁₆ /t	2.155	86	25.682	1.831	16.590	132.287	14.220	
Industrie (Kraftstoffbereitstellung)	€ ₂₀₁₆ /t	2.155	86	25.682	1.831	16.590	60.326	14.220	42.767

Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen auf Basis von (Schwermer 2012) und den harmonisierten Verbraucherpreisindexes (HVPI)

Tabelle 6-3: Umweltkostensätze Strom – deutscher Erzeugungsmix 2016-2045

Einheit	2016	2020	2030	2040	2045
€-Cent ₂₀₁₆ /kWh	8,6	7,5	7,2	8,0	8,0

Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen auf Basis von (Schwermer 2012), (BReg 2017) und den harmonisierten Verbraucherpreisindex (HVPI)

Tabelle 6-4: Beispielkostensätze für Busse und Pkw im Jahr 2016

Fahrzeug	Fahr-situation	Ein-heit	CO ₂ e direkt	Luftschad-stoffe direkt	Abrieb	Lärm	Bau/ Wartung/ Entsor-gung	Energie-bereitstel-lung	Natur und Land-schaft	Insge-ge-samt
Solobus EURO VI	IO	€ Ct ₂₀₁₆ / vkm	8,1	1,1	2,9	10,4	1,5	3,0	0,2	27,3
Solobus EURO VI	AO	€ Ct ₂₀₁₆ / vkm	6,4	0,4	0,3	0,0	1,5	2,4	0,2	11,2
Gelenkbus Euro-VI	IO	€ Ct ₂₀₁₆ / vkm	10,4	1,0	3,5	10,4	1,8	3,9	0,2	31,3
Gelenkbus Euro-VI	AO	€ Ct ₂₀₁₆ / vkm	8,2	0,5	0,4	0,0	1,8	3,0	0,2	14,1
Pkw	IO	€ Ct ₂₀₁₆ / vkm	1,8	0,9	0,3	2,0	0,6	0,9	0,1	6,7
Pkw	AO	€ Ct ₂₀₁₆ / vkm	1,2	0,5	0,0	0,0	0,6	0,6	0,1	3,1

Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen auf Basis von (Schwermer 2012), TREMOD v5.6 und den harmonisierten Verbraucherpreisindex (HVPI)

Tabelle 6-5: Entwicklung der Umweltkostensätze im deutschen Pkw-Bestand (im In-land absolvierte Fahrleistung)

Fahrzeug	Fahr-situation	Einheit	2016	2020	2030	2040	2045
Pkw	IO	€Ct ₂₀₁₆ /vkm	6,7	6,6	6,1	6,8	7,1
Pkw	AO	€Ct ₂₀₁₆ /vkm	3,1	3,2	3,0	3,5	3,8

Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen

Tabelle 6-6: Modal Split in den Bedienungsgebieten der Musterunternehmen

	MIV	ÖPNV	Fahrrad	zu Fuß	Bezugsjahr
Berlin	28 %	27 %	13 %	32 %	2013
Dresden	38 %	21 %	17 %	24 %	2013
Pinneberg (Hamburg Umland)	63 %	8 %	11 %	17 %	2008

Tabelle 6-7: Annahmen zu den Wegelängen in den Bedienungsgebieten der Musterunternehmen in km

	MIV	ÖPNV
Berlin	9,4	8,8
Dresden	12,6	5,3
Pinneberg (Hamburg Umland)		8,0

Quelle: Öko-Institut

Tabelle 6-8: Umrechnungsfaktoren Tank-to-Wheel (TTW) Well-to-Wheel (WTW)

	TTW	WTW	Einheit	Hinweis	Quelle:
Diesel	35,7	44	MJ/l	Diesel (5 % Biodiesel)	EN 16258
Heizöl	35,9	42,7	MJ/l	Diesel ohne Beimischung	EN 16258
Raumwärme	1,184	1,386	kWh/kWh	Ölheizung	Gemis v. 4.93
Strom, Maßnahmen- betrachtungszeitraum 12 Jahre	1	2,27	kWh/kWh		WTW-Faktoren: (Schmied und Mottschall 2014)
Strom 15 Jahre	1	2,23	kWh/kWh		Kraftwerkspark: Projektionsbericht
Strom 25 Jahre	1	2,02	kWh/kWh		
Strom 100 % Wind	1	1,03	kWh/kWh		(Schmied und Mottschall 2014)

Quelle: Öko-Institut, eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-9: Spezifischer End- und Primärenergieverbrauch im ÖSPV und MIV

Kenngröße	Verkehrsmittel	Einheit	2000	2005	2010	2015	2017
Endenergieverbrauch	Pkw (innerorts)	<i>MJ/Pkm</i>	2,2	2,1	2,0	1,9	1,9
	Dieselbus (zGG <= 15 t)	<i>MJ/Pkm</i>	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4
	Dieselbus (zGG >15 -18t)	<i>MJ/Pkm</i>	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
	Dieselbus (zGG >18t)	<i>MJ/Pkm</i>	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
	U-Bahn	<i>MJ/Pkm</i>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
	Tram	<i>MJ/Pkm</i>	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4
Primärenergieverbrauch	Pkw (innerorts)	<i>MJ/Pkm</i>	2,6	2,5	2,4	2,3	2,3
	Dieselbus (zGG <= 15 t)	<i>MJ/Pkm</i>	1,9	1,9	1,9	1,8	1,7
	Dieselbus (zGG >15 -18t)	<i>MJ/Pkm</i>	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	Dieselbus (zGG >18t)	<i>MJ/Pkm</i>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	U-Bahn	<i>MJ/Pkm</i>	1,4	1,2	1,0	0,7	0,8
	Tram	<i>MJ/Pkm</i>	1,5	1,4	1,1	0,9	0,9
Endenergieverbrauch	Pkw (innerorts)	<i>MJ/vkm</i>	3,2	3,1	3,0	2,8	2,8
	Dieselbus (zGG <= 15 t)	<i>MJ/vkm</i>	10,3	10,0	9,6	9,2	8,9
	Dieselbus (zGG >15 -18t)	<i>MJ/vkm</i>	13,3	12,9	12,7	12,5	12,3
	Dieselbus (zGG >18t)	<i>MJ/vkm</i>	16,4	16,2	15,7	15,5	15,1
	U-Bahn	<i>MJ/Platz-km</i>	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06
	Tram	<i>MJ/Platz-km</i>	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08
Primärenergieverbrauch	Pkw (innerorts)	<i>MJ/vkm</i>	3,8	3,7	3,6	3,4	3,3
	Dieselbus (zGG <= 15 t)	<i>MJ/vkm</i>	11,8	11,7	11,7	11,2	10,8
	Dieselbus (zGG >15 -18t)	<i>MJ/vkm</i>	15,2	15,0	15,6	15,2	15,0
	Dieselbus (zGG >18t)	<i>MJ/vkm</i>	18,8	18,8	19,2	18,8	18,4
	U-Bahn	<i>MJ/Platz-km</i>	0,23	0,21	0,17	0,13	0,14
	Tram	<i>MJ/Platz-km</i>	0,28	0,26	0,22	0,17	0,18
Auslastung	Pkw (innerorts)	<i>#Personen</i>	1,49	1,49	1,49	1,49	1,47
	Dieselbus (zGG <= 15 t)	<i>#Personen</i>	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
	Dieselbus (zGG >15 -18t)	<i>#Personen</i>	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6
	Dieselbus (zGG >18t)	<i>#Personen</i>	18,9	18,9	19,0	19,0	19,0
	U-Bahn	<i>%</i>	16,6	17,1	17,7	17,7	17,7
	Tram	<i>%</i>	18,0	18,8	19,0	19,1	19,1

Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen auf Basis von TREMOD v5.64

Tabelle 6-10: Abschätzung der Umweltkosteneinsparung von tendenziell nicht amortisationsfähigen Maßnahmen unter Berücksichtigung niedriger, mittlerer und hoher Umweltkostensätze für Treibhausgasemissionen in Mio. €₂₀₁₆

		UK THG niedrig	UK THG mittel	UK THG hoch
Dieselhybridbus	KViP / Bus	0,05	0,09	0,12
Batterieelektrischer Bus	BVG / Bus	4,0	4,8	5,5
Nachrüstung Rückspeisefähigkeit	BVG / U-Bahn	3,9	7,0	10,0
Erhöhung der Nennspannung	DVB / Tram	3,1	5,6	8,1
Fahrzeugabstellung in Hallen	DVB / Tram	1,1	2,1	2,9
Nutzung von Tunnelabwärme	BVG / U-Bahn	0,17	0,31	0,44

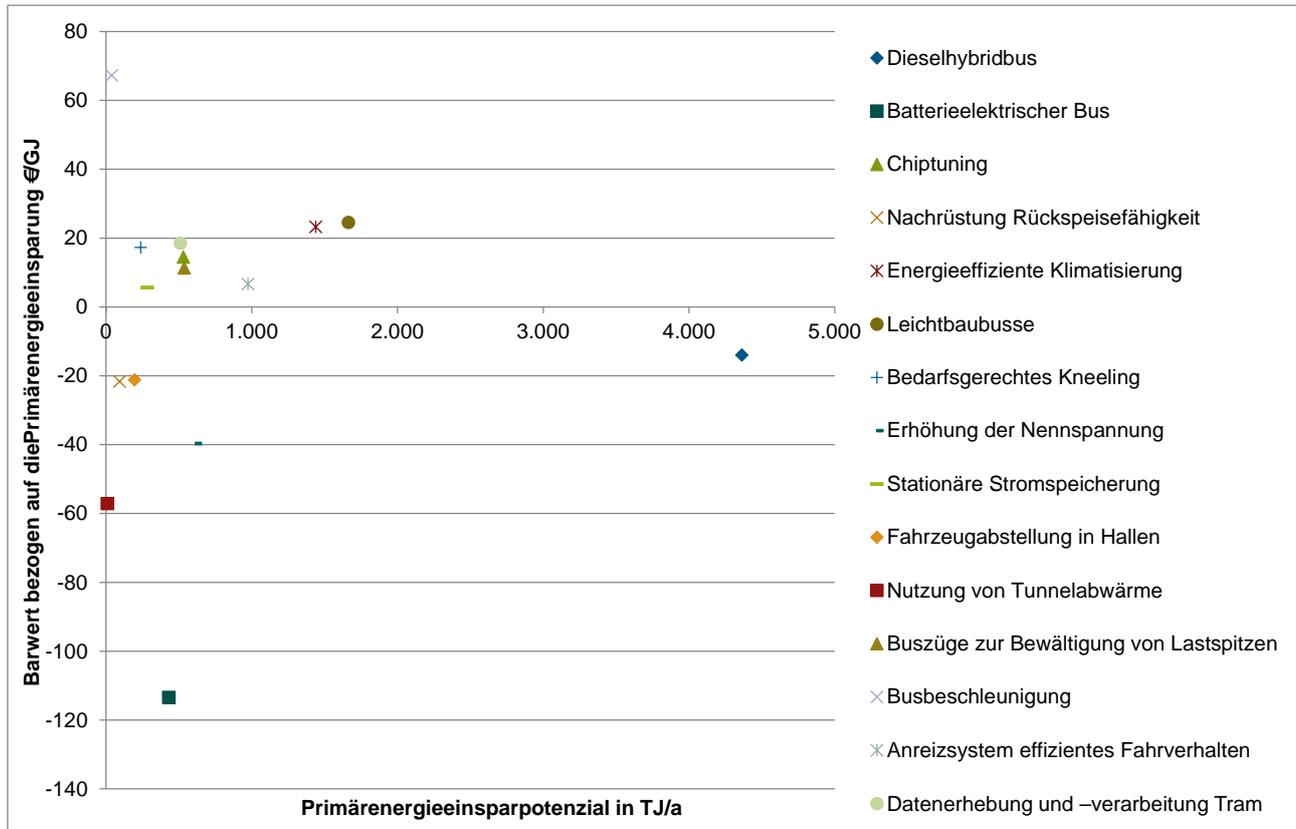
Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen

Tabelle 6-11: Abschätzung der Umweltkosteneinsparung von tendenziell nicht amortisationsfähigen Maßnahmen unter Berücksichtigung verschiedener Zinssätze in Mio. €₂₀₁₆

		Abzinsung 0 %	Abzinsung 1,5 %	Abzinsung 3 %
Dieselhybridbus	KViP / Bus	0,09	0,09	0,08
Batterieelektrischer Bus	BVG / Bus	5,4	4,8	4,3
Nachrüstung Rückspeisefähigkeit	BVG / U-Bahn	7,9	7,0	6,3
Erhöhung der Nennspannung	DVB / Tram	6,8	5,6	4,7
Fahrzeugabstellung in Hallen	DVB / Tram	2,6	2,1	1,7
Nutzung von Tunnelabwärme	BVG / U-Bahn	0,33	0,31	0,28

Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen

Abbildung 6-1: Kosteneffizienz und Einsparpotenziale der Maßnahmen (Primärenergieverbrauch)



Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnungen

7. Literaturverzeichnis

- ALSTOM (2011): STEEM - promoting energy savings for tramways. Online verfügbar unter <http://www.alstom.com/press-centre/2011/5/STEEM-promoting-energy-savings-for-tramways/>, zuletzt geprüft am 20.07.2018.
- Bloomberg New Energy Finance (2018): Electric Buses in Cities. Driving Towards Cleaner Air and Lower CO2. Online verfügbar unter <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2018/05/Electric-Buses-in-Cities-Report-BNEF-C40-Citi.pdf>.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Bekanntmachung Förderrichtlinie für die Nachrüstung von Diesel-Bussen der Schadstoffklassen Euro III, IV, V und EEV im Öffentlichen Personennahverkehr. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/foerderrichtlinie-nachrustung-dieselbusse.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (BReg) (2017): Projektionsbericht 2017 für Deutschland. gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013.
- Calvo Ambel, Carlos (2017): Renewable electricity is a must to decarbonise land freight transport. Online verfügbar unter <https://www.transportenvironment.org/newsroom/blog/renewable-electricity-must-decarbonise-land-freight-transport>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- European Environment Agency (EEA) (2016): Air quality in Europe. 2016 report. Copenhagen (EEA Report, 28/2016).
- Faltenbacher, Michael; Vetter, Olga; Grafetstätter, Julian; Eckert, Stefan; Ruhl, Martin; Unger, Michael et al. (2015): Prüfprogramm „Effizienz-, Kosten- und Einsatzanalyse für den Linienbetrieb von Diesel-Hybridbussen“.
- Funk, Petra (2013): Wärme im U-Bahn-Tunnel als Energie einsetzen. Online verfügbar unter <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/waerme-im-u-bahn-tunnel-energie-einsetzen/>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Gsell, Martin; Wolff, Franziska (in Veröffentlichung): Ökonomisierung der Umwelt und ihres Schutzes. Berlin.
- Haberl, Michael; Fellendorf, Martin; Kies, Anton (2015): Energiebetrachtung von Hybridbussen unter Einfluss des Fahrverhaltens. In: *Straßenverkehrstechnik* (9), S. 575–583.
- Kappus, Jürgen; Klußmann, Andrea; Schmied, Martin; Mottschall, Moritz; Hecht, Markus; Eschweiler, Patrick (2013): Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie und Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Personennahverkehr. Schlussbericht. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/1236/2013-375-de.pdf>.
- Kiesel, Florentine (2017): Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern. Hg. v. AG Energiebilanzen e.V., zuletzt geprüft am 19.07.2018.
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2018): Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen (FZ 13), zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Kurpjuweit, Klaus (2018): Der 120-Millionen-Euro-Auftrag für neue Straßenbahnen. In: *Der Tagesspiegel*, 27.02.2018. Online verfügbar unter <https://www.tagesspiegel.de/berlin/brandenburg-der-120-millionen-euro-auftrag-fuer-neue-strassenbahnen/21002570.html>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.

- Meyer, Philip (2016): Rolltreppen als kleine Kraftwerke helfen der SBB beim Stromsparen. Online verfügbar unter <https://www.srf.ch/news/schweiz/rolltreppen-als-kleine-kraftwerke-helfen-der-sbb-beim-stromsparen>, zuletzt geprüft am 20.07.2018.
- Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg (07.05.2018): Zukunft des öffentlichen Personennahverkehrs wird elektrisch. Online verfügbar unter <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/zukunft-des-oeffentlichen-personennahverkehrs-wird-elektrisch/>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Neumann, Peter (2018): Zugeparkte Busspuren - Jetzt will auch die BVG abschleppen. In: *Berliner Zeitung* 2018, 29.06.2018. Online verfügbar unter <https://www.berliner-zeitung.de/berlin/verkehr/zugeparkte-busspuren-jetzt-will-auch-die-bvg-abschleppen-30705326>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Öko-Institut e.V. (2018): Elektromobilität- Faktencheck. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FAQ_Elektromobilitaet_Oeko-Institut_2017.pdf.
- Pippert, Matthias (2011): Energieeffizienz- und Umweltkriterien in Vergabeverfahren des Schienenpersonennahverkehrs. Leitfaden für SPNV-Aufgabenträger in Europa. Online verfügbar unter <https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2015/10/ecorails-leitfaden-deutsch.pdf>.
- Porsch, Lucas; Sutter, Daniel; Maibach, Markus; Preiss, Philipp; Müller, Wolf (2015): Leitfaden zur Nutzen-Kosten-Abschätzung umweltrelevanter Effekte in der Gesetzesfolgenabschätzung. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Ecologic Institut (Ecologic); Infras; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER). Dessau-Roßlau (Texte, 01/2015).
- Projekträger Jülich (2018): Aufruf zur Antragseinreichung zur Förderung von Fahrzeugen / Ladeinfrastruktur (06/2018). gemäß 2.1.1 der Förderrichtlinie Elektromobilität des BMVI vom 05.12.2017. Online verfügbar unter https://www.now-gmbh.de/content/4-bundesfoerderung-elektromobilitaet-vor-ort/1-foerderrichtlinie/foerderaaufruf_bmvi_fahrzeuge_lis_2018_06_neu.pdf.
- Rebein, Stefan (2013): Bogestra überwacht elektronisch Fahrstil der Busfahrer. In: *Der Westen*, 01.09.2013. Online verfügbar unter <https://www.derwesten.de/staedte/nachrichten-aus-herne-und-wanne-eickel/bogestra-ueberwacht-elektronisch-fahrstil-der-busfahrer-id8387091.html>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Romare, Mia; Dahllöf, Lisbeth (2017): The life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions from lithium-ion batteries. A study with focus on current technology and batteries for light-duty vehicles. IVL Swedish Environmental Research Institute (IVL).
- Schmied, Martin; Mottschall, Moritz (2014): Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Öko-Institut e.V.; Infras AG. Berlin, zuletzt geprüft am 19.07.2018.
- Schwarz, Konstantin (2017): Zuschüsse für Stadtbahnzüge in Sicht. In: *Stuttgarter Zeitung*, 17.01.2017. Online verfügbar unter <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.nahverkehr-zuschuesse-fuer-stadtbahnzuege-in-sicht.f2ec637e-7489-4f1a-8430-974fd4bf384e.html?reduced=true>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Schwermer, Sylvia (2012): Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten. Ökonomische Bewertung von Umweltschäden. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau.
- Shengyang, Sun (2017): Electrification of urban buses. China on the way. Berlin, 2017.
- Stockhausen, Ulrich von; van der Weem, Jürgen; Steinhorst, Frank; Stephan, Arnd (2017): Auf dem Weg zum "1-Liter-Zug". Energieoptimaler Bahnverkehr: Grundlagen, Motivation und Ergeb-

nisse der VDE-ETG-Studie für ÖPNV-Schienenfahrzeuge mit elektrischem Antrieb. In: *Der Nahverkehr* (1+2), S. 25–30.

SWM/MVG: Elektrobusse: Valeo, SWM und MVG vereinbaren Innovationspartnerschaft, zuletzt geprüft am 31.08.2018.

Umweltbundesamt (UBA) (2017): Stickstoffdioxid-Belastung. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/stickstoffdioxid-belastung#textpart-2>, zuletzt geprüft am 20.07.2018.

Umweltbundesamt (UBA) (2018a): National Inventory Reports for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 to 2016 (as of 01/2018) and initial forecast for 2017. Emission of greenhouse gases covered by the UN Framework Convention on Climate.

Umweltbundesamt (UBA) (2018b): Neun Fragen und Antworten zum Diesel. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/neun-fragen-antworten-diesel>, zuletzt geprüft am 20.07.2018.

Universität Innsbruck (2017): Stickoxide: Verkehr als Ursache drastisch unterschätzt. Online verfügbar unter <https://www.uibk.ac.at/public-relations/presse/archiv/2017/846/>, zuletzt geprüft am 20.07.2018.

Unmüßig, Barbara; Sachs, Wolfgang; Fatheuer, Thomas: Kritik der grünen Ökonomie. Impulse für eine sozial und ökologisch gerechte Zukunft. Online verfügbar unter https://www.boell.de/sites/default/files/Kritik_der_gruenen_Oekonomie_kommentierbar.pdf.

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (2013): Energieoptimaler Bahnverkehr. auf dem Weg zum 1-Liter-Zug.

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) (Hg.) (2010): Nachhaltiger Nahverkehr. Beiträge des ÖPNV zum Umwelt- und Klimaschutz (1).

Wagner, Thomas (2018): Van Hool sichert sich Großauftrag. Köln und Wuppertal setzen auf Wasserstoff. Online verfügbar unter <https://www.eurotransport.de/artikel/wuppertal-setzt-auf-die-brennstoffzelle-van-hool-sichert-sich-grossauftrag-9951207.html>, zuletzt geprüft am 20.07.2018.

Werwitzke, Cora (2018): Optare steuert 31 E-Doppeldecker für London-Flotte bei. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2018/08/11/optare-steuert-31-e-doppeldecker-fuer-london-flotte-bei/>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.

Wetzel, Daniel (2018): VKU-Präsident warnt deutsche Autoindustrie. In: *Welt*, 22.02.2018. Online verfügbar unter https://www.welt.de/print/die_welt/wirtschaft/article173833342/VKU-Praesident-warnt-deutsche-Autoindustrie.html, zuletzt geprüft am 20.07.2018.