

FoPS-Forschungsvorhaben Nr. 70.908/2015

Im Auftrag des Bundesministeriums
für Verkehr und digitale Infrastruktur

Innovative und systematische Ansätze für mehr Energieeffizienz im kommunalen Öffentlichen Personennahverkehr

Handlungsleitfaden



Berlin / Hamburg,
18.12.2018

FoPS-Forschungsvorhaben Nr. 70.908/2015

Im Auftrag des Bundesministeriums
für Verkehr und digitale Infrastruktur

Innovative und systematische Ansätze für mehr Energieeffizienz im kommunalen Öffentlichen Personennahverkehr

Handlungsleitfaden

Vorbemerkung

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.

Autorinnen und Autoren

Lukas Minnich, Moritz Mottschall
Öko-Institut e.V.
Miguel Wolf, Henning Palm, Lisa Baal
KCW GmbH
Thies Hinckeldeyn
BHP Unternehmensberatung

Berlin / Hamburg,
18.12.2018

Inhaltsverzeichnis

1. In aller Kürze	6
2. Einführung und Wegweiser durch den Leitfaden	10
3. Ausgewählte Energieeffizienzmaßnahmen im Detail	26
3.1. Antriebstechnik und Fahrwiderstände.....	26
Dieselhybridbus.....	26
Batterieelektrischer Bus.....	27
Chiptuning – Anpassung der Motor- und Getriebesteuerung.....	30
Nachrüstung Rückspeisefähigkeit bei Altfahrzeugen.....	31
3.2. Nebenverbraucher / sonstige Fahrzeugtechnik.....	32
Verbesserte Innenraumdämmung.....	33
Verzicht auf Klimatisierung des Fahrgastraums.....	34
Energieeffiziente Klimatisierung.....	35
Leichtbaubusse.....	36
Leichtbauschienenfahrzeuge.....	37
Bedarfsgerechtes Kneeling.....	39
3.3. Infrastruktur.....	40
Optimierung der Fahrstromverteilung.....	40
Erhöhung der Nennspannung.....	41
Stationäre Energiespeicher.....	42
Fahrzeugabstellung in geschlossenen Hallen.....	43
Wärmetauscher zur Nutzung von Tunnelabwärme.....	45
3.4. Betrieb.....	46
Buszüge zur Bewältigung von Lastspitzen.....	46
Busbeschleunigung.....	47
Anreizsystem / Wettbewerb energieeffizientes Fahrverhalten.....	48
Systematischer Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung.....	50
4. Weitere Handlungsfelder	52
4.1. Bus: Antriebstechnik und Fahrwiderstände.....	52
4.2. Straßenbahn und U-Bahn: Antriebstechnik und Fahrwiderstände.....	55
4.3. Bus, Straßenbahn, U-Bahn: Nebenverbraucher und sonstige Fahrzeugtechnik.....	55
4.4. Straßenbahn und U-Bahn: Stromversorgungsinfrastruktur.....	57
4.5. Bus, Straßenbahn, U-Bahn: Sonstige Infrastruktur und Betrieb.....	58
5. Praktische Umsetzung und Förderungen	61
5.1. Offenheit für technologische Entwicklungen.....	61
5.2. Energieeffizienzanforderungen.....	62
5.2.1. Schienengebundener ÖPNV (Straßenbahn, U-Bahn).....	62
5.2.2. Straßengebundener ÖPNV.....	62
5.3. Energieeffizienz in der Förderpraxis.....	66
5.3.1. Bestehende Förderprogramme.....	66
5.3.2. Verzahnung zwischen Investitionsförderung und wettbewerblicher Vergabe öffentlicher Dienstleistungsaufträge.....	67
6. Fazit und Handlungsbedarf	72
Praxispartner, Teilnehmende der Werkstattgespräche und der sonstigen Hintergrundgespräche	70
Forschungsteam	80
Literaturverzeichnis	82

1. In aller Kürze

Der Öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) ist eine umweltfreundliche und energiesparende Mobilitätsoption. Die Verkehrsverlagerung vom Pkw auf den öffentlichen Verkehr spielt daher eine zentrale Rolle für eine erfolgreiche Umsetzung der Mobilitäts- und Energiewende im Verkehrssektor. Doch auch das System ÖPNV selbst muss für eine vollständige Dekarbonisierung seinen **Energiebedarf weiter reduzieren und muss perspektivisch klimaneutral werden**. Vor dem Hintergrund von Kapazitätsengpässen in urbanen Räumen sowie Komfortansprüchen der Fahrgäste und weiteren Anforderungen, z.B. an die Klimatisierung, stellt dies eine enorme Herausforderung für alle beteiligten Akteure dar. Zusätzlich führt in Ballungsräumen die anhaltend hohe Belastung durch Luftschadstoffe zu weiterem Druck auf Städte und Kommunen, den Verkehr insgesamt und somit auch den ÖPNV sauberer zu gestalten.

Gleichzeitig stehen eine Reihe technischer und betrieblicher Effizienzmaßnahmen zur Verfügung, die aus verschiedenen Gründen nicht oder nur teilweise umgesetzt werden, so z.B. aufgrund

- fehlender Wirtschaftlichkeit,
- eines mangelnden Angebots technischer Lösungsangebote auf Herstellerseite,
- eines Mangels an Ressourcen und Know-How in Verkehrsunternehmen und Kommunen sowie
- ungeeigneter Ausgestaltung der Grundfinanzierung und monetären Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen im ÖPNV.

Im Omnibusbereich versprechen neue Technologien, wie Elektro- und Hybridantrieb, große Effizienzgewinne. Diese Maßnahmen amortisieren sich aus betriebswirtschaftlicher Perspektive jedoch noch nicht. Leichtbaubusse hingegen senken Verbrauch und Kosten. Auch lassen sich unter anderem durch den Einsatz von Gespannen aus Standardbus und Anhänger (Buszug), eine verbesserte Getriebesteuerung oder Anreize zu einer energiesparenden Fahrweise Energieeinsparungen erzielen, die sich auch unter Berücksichtigung notwendiger Investitionen wirtschaftlich lohnen.

Der Anteil von Heizung und Klimatisierung am Gesamtenergieverbrauch ist sowohl bei Bussen als auch bei Schienenfahrzeugen hoch. Eine effiziente Klimatisierung hat also großes Potenzial. Hier können durch Forschung und Entwicklung weitere Einsparmöglichkeiten erschlossen werden.

Bei Straßen- und U-Bahnen bietet die ganzheitliche Optimierung der Systemarchitektur entscheidende Einsparpotenziale. Hier können Effizienzgewinne z.B. durch verbesserte Fahrstromverteilung, Erhöhung der Netzspannung sowie ein effizientes und netzdienliches Fahrprofil erzielt werden.

Die Einsparpotenziale und die Wirtschaftlichkeit einzelner Maßnahmen können sich, abhängig von den jeweiligen Einsatz- und Randbedingungen in den Verkehrsunternehmen, stark unterscheiden. Dies macht eine einzelfallbezogene Detailanalyse vor Ort unverzichtbar.

Jenseits der technischen Realisierbarkeit und der betriebswirtschaftlichen Perspektive ist die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen außerdem von den Rahmenbedingungen im »Gesamtsystem ÖPNV« abhängig. Daher sollten der Blick auf die Finanzierung und Förderung des ÖPNV Allgemein und innovativer Energieeffizienzmaßnahmen im Speziellen geöffnet sowie konkrete Verbesserungen auf den Weg gebracht werden. Dabei handelt es sich um die **drei Zentralen Handlungsempfehlungen**, die in Kapitel 6 weiter ausgeführt werden:

1. *Handlungspaket für mittelständische Betreiber und Aufgabenträger im ländlichen, suburbanen und kleinstädtischen Raum zum vereinfachten Einstieg in den batterieelektrischen Busverkehr*
2. *Integration von verbindlichen Vorgaben und/oder Wertungsboni für Energieeffizienzmaßnahmen in Vergabekriterien*
3. *Förderung eines Energieeffizienz-»Add-ons« bei Nachrüstmaßnahmen*

Weitere Handlungsempfehlungen an die beteiligten Akteure sind:

Verkehrsunternehmen

- *Know-How und Kapazitäten durch Austausch zwischen Verkehrsbetrieben und Beratung schaffen, um eigene Potenziale zu beleuchten und »niedrig hängende Früchte zu ernten« (z.B. Anreizsysteme).*
- *Effizienzmaßnahmen im Fahrzeug- (z.B. Chiptuning, Rückspeisefähigkeit) und Infrastrukturbestand (z.B. Optimierung Fahrstromverteilung) prüfen.*
- *Bei Neubeschaffung das Thema Energieeffizienz intensiv adressieren und prüfen, welche Maßnahmen ggf. unter Vernachlässigung der Hersteller treue möglich sind (z.B. Leichtbau).*

Fahrzeughersteller / Zulieferer

- *Angebotspalette erweitern (Elektrobusse, Anhängerzüge).*
- *Effizienztechnologien bei Fahrzeugausschreibungen offensiv anbieten.*

Aufgabenträger

- *Investitionszyklen in den Verkehrsunternehmen bei der Festlegung der Geltungsdauern der Verkehrsverträge stärker berücksichtigen.*

Kommunen

- *Planungssicherheit für Verkehrsunternehmen durch Entwicklung eines perspektivischen Zielbildes ÖPNV in den Jahren 2030/2050 schaffen.*
- *Strategien zur Elektrifizierung des Busverkehrs gemeinsam mit Verkehrsunternehmen und Aufgabenträger entwickeln.*
- *Flächen bereitstellen und Ladeinfrastruktur aufbauen.*
- *Der Beschleunigung der ÖPNV-Geschwindigkeiten dienende Maßnahmen zeitnah initiieren und umsetzen.*

Länder

- *Finanzierung der Schieneninfrastruktur so verlässlich gestalten, dass lang laufende Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz einfacher umgesetzt werden können.*
- *Bereitgestellte Bundesmittel für den ÖPNV auch in Zukunft investiv verwenden.*

Bund

- *Bei der Ausgestaltung von Förderrichtlinien die Anforderungen kleinerer und wettbewerblicher Vergaben stärker berücksichtigen.*
- *Förderprogramme für die Erstellung von Energieeffizienz- und Klimaschutzkonzepten durch Verkehrsunternehmen und Aufgabenträger schaffen.*
- *Forschung und Entwicklung sowie Pilotanwendungen (z.B. Elektrobusse, technische EDV-Lösungen für effizientes Fahren, innovative Klimatisierung) unterstützen.*
- *Zielgerichtete Zweckbindungsmöglichkeiten der bereitgestellten Konsumtiv- und Investivmittel des Bundes schaffen.*

Europäische Union

- *Die Verpflichtung zur Vorgabe emissionsarmer oder -freier Fahrzeuge auch bei der Vergabe öffentlicher Dienstleistungsaufträge stimulieren.*

2. Einführung und Wegweiser durch den Leitfaden

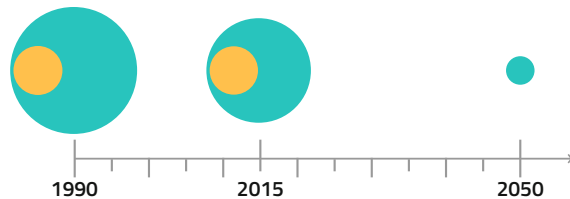
Der Verkehrssektor steht auf seinem Weg zu einer höheren Umweltverträglichkeit vor großen Herausforderungen. In diesem Sektor wurde aufgrund steigender Verkehrsleistung und Emissionen aus dem Pkw- und Straßengüterverkehr in der Summe noch kein wesentlicher Beitrag zu den **Klima-zielen** geleistet. Seit 1990 sind die Emissionen an CO₂ und weiteren Treibhausgasen (THG) praktisch unverändert, mit zuletzt ansteigender Tendenz. Dadurch bleibt der Verkehrssektor seinen Beitrag zum ursprünglichen Ziel, im Jahr 2020 die Treibhausgasemissionen um 40 % gegenüber 1990 zu senken, schuldig. Ein wesentlicher Schritt zur Verringerung der negativen Umweltauswirkungen und der Treibhausgasemissionen kann in einer **höheren Energieeffizienz** liegen.

Treibhausgasemissionen in Deutschland

Quelle: Öko-Institut, 2018

-  Verkehr
-  Gesamt

- **Schlüssel zur Zielerreichung:**
 - Nutzung energieeffizienter Verkehrsträger (z.B. ÖPNV)
 - Erhöhung der Energieeffizienz
- **Ziel Bundesregierung: Senkung Endenergiebedarf Verkehr um 40 % bis 2050 ggü. 2005**



Im Fokus dieses Handlungsleitfadens steht der mit Straßen-, U-Bahnen und Omnibussen erbrachte öffentliche Straßenpersonenverkehr (ÖSPV).¹ Dessen Anteil an den THG-Emissionen beläuft sich auf weniger als 2%. 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 ÖPNV einen hinreichenden Beitrag leistet und langfristig überhaupt keine Treibhausgase mehr emittiert.

¹ Im Interesse der Allgemeinverständlichkeit und weil sich viele Energieeffizienzmaßnahmen technisch auch auf den Schienenpersonenverkehr übertragen lassen (wenn sich auch die Akteurs- und Finanzierungssituation deutlich unterscheidet), wird im Folgenden die geläufigere Abkürzung »ÖPNV« verwendet.

Neben den Treibhausgasen verursacht der Verkehr weitere Umweltwirkungen. Im Jahr 2016 kam es zum Beispiel an 59 % der städtischen verkehrsnahen Luftmessstationen zu Überschreitungen des Jahresgrenzwertes für Stickstoffdioxid (NO_x).² Der Straßenverkehr trägt dazu mit etwa 60%,³ in Einzelfällen über 80%⁴ den größten Anteil bei. Auch für die urbane Feinstaubbelastung ist der Straßenverkehr wesentlich verantwortlich. Er belastet zudem Millionen Anwohner und deren Gesundheit durch Lärmemissionen.

Zur Reduktion der Umweltwirkungen sollten mehrere Strategien parallel verfolgt werden. 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 **Verbesserung** der verkehrsmittelspezifischen Umweltbilanz und damit das dritte wichtige Ziel dar.

Für die meisten Vergleiche – ob, wie hier, aggregiert oder auf der Ebene der Einzelmaßnahmen – bietet sich die Quantifizierung der Energieeffizienz über den **Endenergiebedarf** – also ohne Berücksichtigung der Kraftstoffherstellung – als leichter erfassbare Größe an. Ausnahmen sind die alternativen Antriebe, wenn also auf einen neuen Energieträger umgestellt wird und somit die (z.B. Strom-) Herstellung und ihr jeweiliger Wirkungsgrad einbezogen werden müssen.

² Umweltbundesamt (UBA) 2017

³ Umweltbundesamt (UBA) 2018

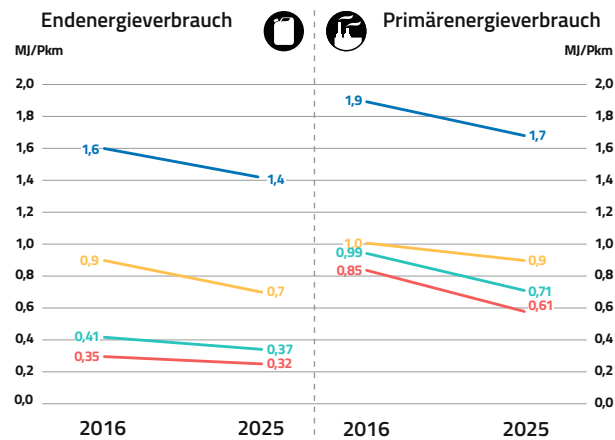
⁴ Universität Innsbruck 2017

Dieser Unterschied wird auch in der Abbildung deutlich:

Spezifischer Energieverbrauch pro Personenkilometer im Jahr 2016 und 2025

Quelle: Öko-Institut 2018 auf Basis von TREMOD 5.6

- Pkw
- Linienbus
- Tram
- U-Bahn



Die hohe Effizienz von Straßen- und U-Bahnen zeigt sich vor allem beim Endenergieverbrauch. Bei der Betrachtung der Primärenergie – also bei Einbezug der Herstellung und Bereitstellung der Energieträger – ist der Verbrauchsunterschied zwischen Bussen und Bahnen wesentlich geringer. Grund ist die im heutigen Strommix 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 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 würdigen, die in Schwachlastzeiten über eine Reduzierung der Fahrzeuggrößen Energie einsparen – so etwa bei den hier diskutierten Buszügen.

Der Verkehrsmarkt befindet sich in einer Umbruchphase. Neue Antriebstechnologien und innovative Mobilitätsangebote halten Einzug und im Vergleich zu elektrisch angetriebenen Pkw oder App-basierten Ridesharing-Angeboten ist der Umweltvorteil des ÖPNV neu zu bewerten.

Effizienz- und Umweltthemen müssen in einem *Umfeld* umgesetzt werden, das so komplex ist wie nie zuvor. Beeinflusst wird dies durch:

- *wachsende Komfortansprüche der Fahrgäste, z.B. Klimatisierung,*
- *elektronische Systeme wie Info-Bildschirme, WLAN und USB-Steckdosen,*
- *weitere Verpflichtungen der Verkehrsunternehmen, z.B. zur Barrierefreiheit,*
- *erhöhte Anforderungen an Verkehrsunternehmen und Fahrzeughersteller in punkto Brandschutz und Unfallsicherheit,*
- *strenge Regeln im Ausschreibungswesen, die beispielsweise die Kommunikation zwischen Verkehrsunternehmen und Herstellern einschränken, und*
- *eine gesteigerte Bedeutung bisher wenig beachteter Themenfelder wie des Strommarkts beim Einsatz von Elektrobussen.*

Die Akteure im ÖPNV sind daher gefordert, sich technologische Fortschritte zunutze zu machen, damit der ÖPNV sein Effizienzpotenzial vollständig ausschöpft und seinen Vorsprung vor anderen Verkehrsträgern behält. Hier geht es letztlich auch darum, das positive Umweltimage des ÖPNV zu erhalten. Zudem können einige Energieeffizienzmaßnahmen auch Möglichkeiten eröffnen, Kosten einzusparen. Damit könnten der Kostendeckungsgrad von Verkehrsunternehmen verbessert oder Mittel zur Ausweitung des Angebots verwendet werden.

In diesem Kontext hat ein Konsortium aus Öko-Institut, KCW GmbH und Becker Hinckeldeyn Partner im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen seines »Forschungsprogramms Stadt-

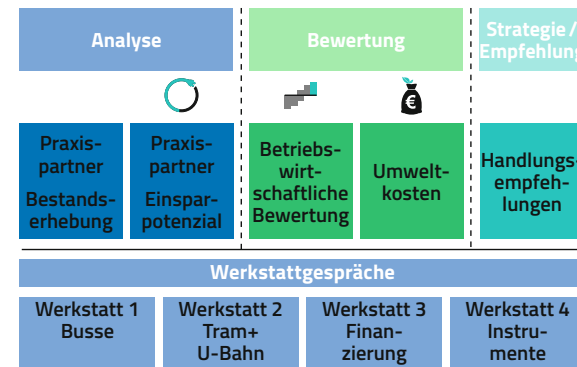
verkehr (FoPS)« das Projekt »*Innovative und systematische Ansätze für mehr Energieeffizienz im kommunalen Öffentlichen Personennahverkehr*« durchgeführt.⁵ In diesem Handlungsleitfaden finden Sie Ergebnisse aus dem vom TÜV Rheinland begleiteten Projekt. Er richtet sich an

- Verkehrsunternehmen, denen in den Kapiteln 3 und 4 einige Effizienzmaßnahmen vorgestellt werden,
- Aufgabenträger und Verantwortliche in der kommunalen Verwaltung, die in Kapitel 5 Hinweise zu Effizianzorderungen in der Ausschreibungspraxis erhalten,
- Vertreter von Bund und Ländern. Für sie wurden Hinweise zur sinnvollen Ausgestaltung von Förderrichtlinien (Kapitel 5) formuliert.
- Weitere Interessierte wie Hersteller von Fahrzeug- und Infrastrukturkomponenten sowie -systemen.

Der Handlungsleitfaden gibt Antworten auf die folgenden Fragen:

- Welche Maßnahmen kommen im ÖPNV in Frage, um die Energieeffizienz zu erhöhen?
- Welches Energieeinsparpotenzial bieten diese Maßnahmen?
- Wie sind die Maßnahmen aus betriebswirtschaftlicher und Umweltkostensicht zu bewerten?
- In welchem Umfang sind die Maßnahmen auf den gesamten ÖPNV in Deutschland anwendbar?
- Wie steht es um die Marktreife bzw. den technischen Entwicklungsstand der Maßnahmen?
- Welche Maßnahmen sollten in besonderem Maße unterstützt werden? Auf welche Weise sollte dies geschehen, insbesondere auch im Rahmen von Förderprogrammen?
- Wie steht es um betriebliche, rechtliche und politische Rahmenbedingungen und Hemmnisse für die Maßnahmenumsetzung?

⁵ Details zu den Projektergebnissen können dem Schlussbericht des FoPS-Forschungsvorhabens 70.908/2015 entnommen werden.



Überblick über das Vorhaben

Quelle: Öko-Institut, 2018

In Kapitel 3 werden eine Reihe *energieeffizienzsteigernder Maßnahmen* beschrieben und bewertet. Es wurden solche Maßnahmen in die Bewertung einbezogen, die relevante Einsparpotenziale versprochen, die zumindest in Ansätzen am Markt verfügbar sind und deren Umsetzung in einigen der betrachteten Bedienungsgebiete forciert wird oder die zum Aufzeigen von Zusammenhängen – auch in Hinblick auf die Unterstützung von Energieeffizienzmaßnahmen im Allgemeinen – besonders geeignet sind.

Jede Maßnahme wird für die Gegebenheiten eines konkreten Verkehrsunternehmens (Praxispartner) bewertet und dargestellt.



Die *betriebswirtschaftliche Bewertung* erfolgt anhand von Investitionsrechnungen. Die verkehrsbetriebswirtschaftliche Amortisationsfähigkeit der untersuchten Energieeffizienzmaßnahmen wurde für die *Praxispartner beispielhaft* untersucht.

Da sich die Einzelbeispiele aus den individuellen Randbedingungen der jeweils betrachteten Musterunternehmen ableiten, kann *nicht automatisch* von einer *Übertragbarkeit* der Aussage über die Amortisationsfähigkeit der Einzelmaßnahme auf andere Verkehrsbetriebe ausgegangen werden.

Sowohl der beispielhaft ermittelte Fördermittelaufwand als auch die fiktive Notwendigkeit zu einer Fahrpreiserhöhung dienen lediglich der *Veranschaulichung des untersuchten Einzelfalls*.

Maßnahmen, die vorhandene Lösungen ersetzen (z.B. Ersatz von Diesel- durch batterieelektrische Busse), werden im Verhältnis zur herkömmlichen Technologie betrachtet. Maßnahmen, die vorhandene Lösungen ergänzen (z.B. Nachrüstung Rückspeisefähigkeit bei U-Bahn-Fahrzeugen) werden mit dem Referenzzustand ohne Einsatz der betrachteten Technologie verglichen.

Für Maßnahmen, die aus betriebswirtschaftlicher Perspektive nicht positiv abschneiden, ist zudem die erzielbare Verringerung von Umweltkosten dargestellt.



Die *Umweltkostenabschätzung* erweitert also die betriebswirtschaftliche Kostenberechnung um die positiven Wirkungen für Gesellschaft und Umwelt, von denen weder Verkehrsunternehmen Aufgabenträger oder beim Fahrgast unmittelbar (sprich: monetär) profitieren. In der Betrachtung werden auch mögliche negative Umweltwirkungen durch eine Verkehrsverlagerung auf den MIV berücksichtigt, die im hypothetischen Fall entstünden, in dem die jeweiligen Maßnahmenkosten rein über höhere Ticketpreise refinanziert werden müssten.

Kapitel 3 dieses Handlungsleitfadens beschreibt und bewertet die ausgewählten Maßnahmen. Sie sind nach den Oberthemen *Antriebstechnik und Fahrwiderstände*, *Nebenverbraucher/sonstige Fahrzeugtechnik*, *Infrastruktur* und *Betrieb* gegliedert. In den Bewertungsdimensionen spiegeln sich die unterschiedlichen Perspektiven der Branchenakteure wider:

- *Die betriebswirtschaftliche Betrachtung entspricht der Perspektive der Verkehrsunternehmen und ihrer Gesellschafter. Aufgabenträger erhalten dagegen Anhaltspunkte für die Kostenwirkung möglicher Vorgaben, die sie den Verkehrsunternehmen setzen.*
- *Die Angaben zu den Umweltkosten helfen Aufgabenträgern und Fördermittelgebern, bei Umweltvorgaben und Fördervoraussetzungen die Schwerpunkte auf die Maßnahmen zu legen, welche die größte Umweltentlastung versprechen.*

Zu jeder Maßnahme sind Erkenntnisse aus dem Projekt und der Literatur in Form weiterer Bewertungskriterien zusammengefasst:

Das Energieeinsparpotenzial im betrachteten Anwendungsfall, jeweils bezogen auf den Gesamtenergiebedarf im (z.B. Bus-)Verkehr des entsprechenden Unternehmens, ist auf einer dreistufigen Skala angegeben:



Hierbei handelt es sich um eine Momentaufnahme: Die Einstufung basiert auf der prozentualen Energieeinsparung, die durch eine Anwendung der verfügbaren Technik zum jetzigen Zeitpunkt in allen in Frage kommenden Fahrzeugen und Infrastrukturen erzielt werden könnte. So wird z.B. beim batterieelektrischen Bus eine Anwendung auf den kürzeren innerstädtischen Linien

betrachtet, die mit den heute angebotenen elektrischen Solobussen absolviert werden können. Erneuerungszyklen bei Fuhrpark und Infrastruktur sind nicht berücksichtigt, sondern es wird eine sofortige Umsetzung der Maßnahme in allen in Frage kommenden Bereichen angenommen.

Das Symbol »Anwendbarkeit auf die Gesamtflotte« ermöglicht dann die Übertragung dieser Einschätzung auf den Gesamtbestand an Fahrzeugen bzw. die gesamte erbrachte Verkehrsleistung des ÖPNV in Deutschland. Gleichzeitig werden hier Tendenzen verdeutlicht, also eine steigende oder sinkende Bedeutung von Maßnahmen aufgrund übergeordneter Trends, wie z.B. dem zu erwartenden Wandel in der Antriebstechnologie.



Maßnahme heute auf ca. ein Fünftel des Fahrzeugbestands anzuwenden, zukünftig Tendenz steigend



Maßnahme heute auf ca. die Hälfte der Verkehrsleistung anzuwenden, zukünftig gleichbleibend

Ein weiteres Symbol mit dazugehöriger Erläuterung stellt dar, in welchem technischen Entwicklungsstadium sich die Maßnahme befindet bzw. wo sie auf dem Weg zur Erlangung der Marktreife steht:

frühes Forschungs- und Entwicklungsstadium



serienmäßig verfügbar



Es ist dargestellt, für welches Verkehrsmittel die betriebswirtschaftliche und die Umweltkostenrechnung erfolgten und auf welche weiteren Verkehrsmittel sich die Erkenntnisse übertragen lassen.



Berechnungen für Bus



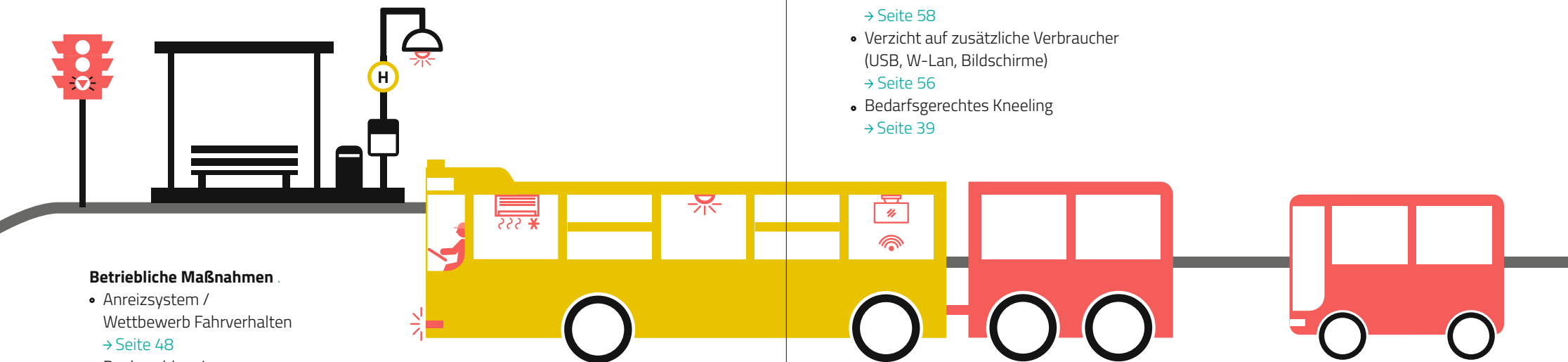
Übertragbarkeit auf Straßenbahn



Übertragbarkeit auf U-Bahn

Kapitel 4 ergänzt die vorher erläuterten Maßnahmen um weiterführende Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz, die in den Werkstattgesprächen jenseits der vertieft betrachteten Maßnahmen identifiziert wurden.

Monetäre Förderungen und weitere Unterstützungen energieeffizienzsteigernder Maßnahmen werden in Kapitel 5 behandelt. Hier erhalten Aufgabenträger Hinweise zur Verzahnung der Bestellung von Verkehrsleistungen mit der Förderung energieeffizienzsteigernder Investitionen. Es werden zudem beispielhafte Programme zur Förderung von Energieeffizienzvorhaben vorgestellt.



Betriebliche Maßnahmen

- Anreizsystem / Wettbewerb Fahrverhalten
→ Seite 48
- Busbeschleunigung: Busspuren, Vorrangschaltung, Kap-Haltestellen, Busschleuse
→ Seite 46
- BRT-System
→ Seite 46
- Flexible Fahrzeuggrößen, z.B. Anhängerzüge
→ Seite 46, 59
- intelligente Bedienkonzepte, z.B. autonome Kleinbusse
→ Seite 59
- Lage der Betriebshöfe
→ Seite 60

Alternative Antriebe

- Batterieelektrischer Antrieb
→ Seite 27
- Plug-in-Hybrid-Antrieb
→ Seite 54
- Brennstoffzellenantrieb
→ Seite 52
- Oberleitungsbus
→ Seite 53

Nebenverbraucher

- Gezielte Vorkonditionierung
→ Seite 60
- Verzicht Klimaanlage
→ Seite 33
- Energieeffiziente Klimaanlage
→ Seite 32
- Elektrifizierung des Druckluftsystems
→ Seite 56
- LED-Beleuchtung innen / außen
→ Seite 55
- Linienbezogene Programmierung der Nebenverbraucher
→ Seite 58
- Verzicht auf zusätzliche Verbraucher (USB, W-Lan, Bildschirme)
→ Seite 56
- Bedarfsgerechtes Kneeling
→ Seite 39

Konventioneller Antrieb und Fahrwiderstände

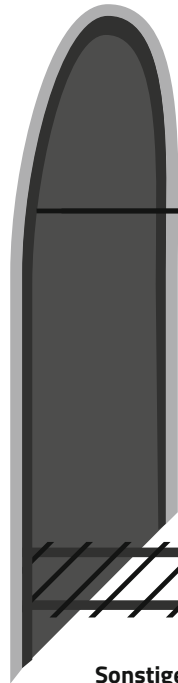
- Hybridantrieb
→ Seite 26
- Chiptuning / Getriebesteuerung
→ Seite 30
- Optimale Motorleistung und Getriebe
→ Seite 52
- Leichtlauföl
→ Seite 52
- erhöhter Reifendruck / Leichtlaufreifen
→ Seite 52
- Aerodynamik
→ Seite 52

sonstige Fahrzeugtechnik

- Leichtbau
→ Seite 36
- verbesserte Wärmedämmung
→ Seite 32

Stromversorgung, energieeffizientes Gesamtsystem

- Anhebung Spannungsniveau
→ Seite 41
- Optimierung der Fahrstromverteilung:
Durchbindung, Vermaschung,
Mehrpunktspeisung
→ Seite 40
- Datenerhebung und -
auswertung, Fahrerinformation
→ Seite 50
- Stationäre Speicherung
→ Seite 42
- Rückspeisung ins
Mittelspannungsnetz
→ Seite 57



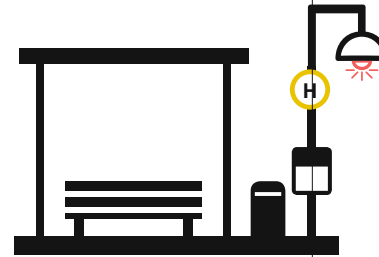
Sonstige Infrastruktur und Betrieb

- Effiziente Weichenheizung
(Fernwärme, Geothermie)
→ Seite 58
- Geschlossene Fahrzeugabstellung
→ Seite 43
- Getrennter Gleiskörper
→ Seite 59
- Fahrzeuggröße /
modulare Fahrzeugkonzepte
→ Seite 59
- Verbrauchsoptimierte Trassierung
und Tunnelbau
→ Seite 59

Nebenverbraucher und sonstige Fahrzeugtechnik

- LED-Beleuchtung
→ Seite 55
- Verzicht Klimaanlage
→ Seite 33
- Energieeffiziente Klimaanlage
→ Seite 34

- Verzicht auf zusätzliche Verbraucher
→ Seite 56
- Leichtbau
→ Seite 37
- verbesserte Wärmedämmung
→ Seite 32



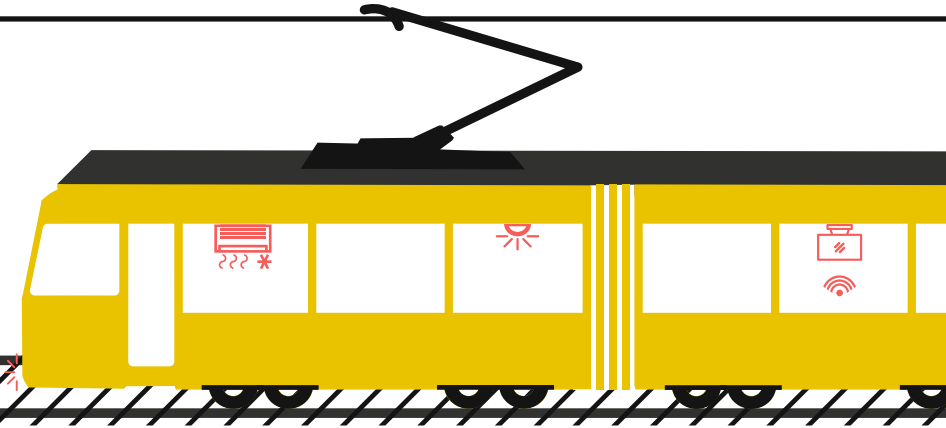
- Abwärmenutzung Tunnel
→ Seite 45
- LED-Beleuchtung Haltestelle
→ Seite 58
- Rekuperation / energieeffizienter
Betrieb Fahrtreppe
→ Seite 56
- Lage der Betriebshöfe
→ Seite 60

Antriebstechnik

- Nachrüstung Rückspeisefähigkeit
→ Seite 31
- Chopper-Steuerung,
→ Seite 55
- Permanent erregter Synchronmotor
→ Seite 55
- IGBT, Dimensionierung Stromrichter
→ Seite 55

Fahrwiderstände

- Aerodynamik:
Taschenschiebetüren vermeiden
→ Seite 55
- radial einstellbares Fahrwerk
→ Seite 55

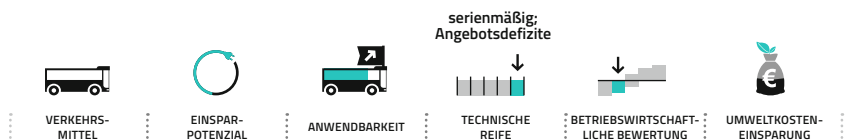


Maßnahmen	Verkehrsmittel	Kategorie	Einsparpotenzial	Anwendbarkeit & Trend	Technische Reife	Betriebswirtschaftliche Bewertung	Abschätzung Umweltkosteneinsparung
Dieselhybridbus		Antrieb			 serienmäßig; Angebotsdefizite		
Batterieelektrischer Bus		Antrieb			 seriennah		
Chiptuning – Anpassung der Motor- und Getriebesteuerung		Antrieb			 am Markt; Gewährleistungs- fragen		
Nachrüstung Rückspeisefähigkeit bei Altfahrzeugen		Antrieb			 Neufahrzeuge: Standard		
Verbesserte Innenraumdämmung		Nebenverbraucher / Sonstige Fahrzeugtechnik			 F&E-Bedarf		
Verzicht auf Klimatisierung des Fahrgastraums		Nebenverbraucher / Sonstige Fahrzeugtechnik			 serienmäßig verfügbar		
Energieeffiziente Klimatisierung		Nebenverbraucher / Sonstige Fahrzeugtechnik			 F&E-Bedarf		
Leichtbusse		Nebenverbraucher / Sonstige Fahrzeugtechnik			 wenige Serienfahrzeuge		
Leichtbau-schienenfahrzeuge		Nebenverbraucher / Sonstige Fahrzeugtechnik			 F&E-Bedarf		
Bedarfsgerechtes Kneeling		Nebenverbraucher / Sonstige Fahrzeugtechnik			 serienmäßig verfügbar		
Optimierung der Fahrstromverteilung		Infrastruktur			 Technische Lösungen verfügbar		
Erhöhung der Nennspannung		Infrastruktur			 > 750V; F&E-Bedarf		
Stationäre Energiespeicher		Infrastruktur			 F&E-Bedarf		
Fahrzeugabstellung in geschlossenen Hallen		Infrastruktur			 innovative Gebäudetechnik; F&E-Bedarf		
Wärmetauscher zur Nutzung von Tunnelabwärme		Infrastruktur			 bisher Pilot- projekte		
Buszüge zur Bewältigung von Lastspitzen		Betrieb			 verfügbar; Angebotsdefizit		
Busbeschleunigung		Betrieb			 neue digitale Möglichkeiten; F&E-Bedarf		
Anreizsystem / Wettbewerb Energieeffizientes Fahrverhalten		Betrieb			 Serienmäßig verfügbar		
Systematischer Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung		Betrieb			 Insellösungen verfügbar; F&E-Bedarf		

3. Ausgewählte Energieeffizienzmaßnahmen im Detail

3.1. Antriebstechnik und Fahrwiderstände

Dieselhybridbus



Obwohl, anders als beim Batteriebus, noch nicht der Energieträger Strom verwendet wird, bietet der Dieselhybridantrieb einen ersten Einstieg in die mit der Elektrifizierung verbundenen Umstellungen. Und ähnlich wie die im Pkw-Bereich mittlerweile etablierten (Benzin-) Hybride bieten (Diesel-) Hybridbusse deutliche Verbrauchsvorteile. Denn im Zusammenspiel mit den elektrischen Antriebskomponenten arbeitet der Verbrennungsmotor in einem günstigeren Drehzahlbereich. Durch Rekuperation, also die umgekehrte Nutzung von Antriebs-Elektromotoren als elektrische Generatoren, kann zudem bei Bremsvorgängen und im Gefälle kinetische Energie zurückgewonnen werden.

Aktuell muss bei der Anschaffung eines Dieselhybridbusses mit rund 30 % Mehrkosten gegenüber einem konventionellen Dieselbus gerechnet werden. Es wird meist von Kraftstoffeinsparungen im Bereich von 15 bis 20 % berichtet, die je nach Nutzung und Einsatzzweck höher, aber auch deutlich niedriger ausfallen können.⁶ Manche Anwender bestreiten den Verbrauchsvorteil sogar vollständig. In jedem Fall sind die Einsparungen vom Nutzungsprofil abhängig: Aufgrund der bei einer hohen Zahl von Anfahr- und Bremsvorgängen verstärkten Rekuperation sind die Einsparungen innerstädtisch tendenziell höher. Die Praxispartner bestätigen zudem die in der Literatur⁷ festgestellte hohe Bedeutung eines verbrauchsoptimierten Fahrens beim Hybridbus. Darüber hinaus wären starke Unterschiede in der Geländehöhe für den Hybridbus theoretisch vorteilhaft – wegen der möglichen Rekuperation im Gefälle. Jedoch vermeiden Anwender im Gegenteil eine Nutzung auf solchen Strecken. Als Grund wird angeführt, dass die verfügbaren Fahrzeuge wegen der für ihr erhöhtes Gewicht ungeeigneten Auslegung von Motor und Bremsen weniger geeignet für das Anfahren auf Anstiegen und das Bremsen auf Gefällestrecken seien. Es gibt dementsprechend Anzeichen, dass

⁶ S. z.B. Faltenbacher et al. 2015

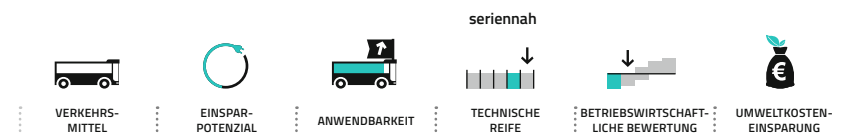
⁷ S. z. B. Haberl et al. 2015

Fahrzeughersteller künftig eher auf eine geringere Dimensionierung des elektrischen Antriebsstrangs setzen.

Anders als beim batterieelektrischen Antrieb stellt der Hybridantrieb keine technische Vereinfachung des Antriebsstrangs dar. Daher ergibt sich bei den Instandhaltungskosten nicht automatisch ein Vorteil. Aktuell werden eher ein Mehraufwand bei der Wartung und ggf. höhere Wartungspauschalen sowie ein steigender Motorölverbrauch festgestellt. Hinzu kommt in der Praxis teils ein höherer Heizölbedarf für die Innenheizung aufgrund der geringeren Motorabwärme. In der betriebswirtschaftlichen Bewertung kann damit gerechnet werden, dass Diesel- und Dieselhybridfahrzeuge hinsichtlich Nutzungsdauern und Fahrzeugrestwerten vergleichbar sind, wenn gleich die Expertenprognosen in Bezug auf letztere sehr unterschiedlich sind. Zudem ist innerhalb der gesamten Nutzungsdauer ein Akkutausch einzuplanen. Der Hybridantrieb erfordert in der Werkstatt wie der batterieelektrische Antrieb zum Teil Kompetenzen (Hochvolttechnik) und Equipment (Dacharbeitsplätze).

Insgesamt gibt es für Betreiber also Argumente, diesen Antriebstyp gleich zu »überspringen«. Ein technisch gereifter Hybridantrieb mit gesunkenen Anschaffungskosten dürfte bei Fahrprofilen, bei denen der batterieelektrische Bus noch keine geeignete Option darstellt, aber durchaus seinen berechtigten Platz haben. Und dies auch noch mittelfristig in einer »gemischten Antriebswelt«. Im Vergleich zu anderen Maßnahmen beim Dieselantrieb handelt es sich hier um die wohl wirkungsvollste Maßnahme.

Batterieelektrischer Bus



Die Umstellung vom Diesel- auf den batterieelektrischen Antrieb ist die aktuell wohl meistdiskutierte Entwicklung in der Bussparte. Der Einsatz rein elektrisch betriebener Fahrzeuge wird momentan oft für hochbelastete innerstädtische Gebiete gefordert, um Luftschadstoffemissionen zu vermeiden. Kommunale Luftreinhaltepläne machen auf bestimmten Strecken wohl schon in naher Zukunft eine kurzfristige Umstellung unverzichtbar. Es handelt sich jedoch auch um eine Energieeffizienzmaßnahme: Im betrachteten Anwendungsfall ergibt sich hinsichtlich der Endenergie ein Einsparpotenzial von knapp über 50 % gegenüber dem Dieselantrieb. Perspektivisch wird sich die

Zurückdrängung der konventionellen Stromproduktion mit ihrem geringen Wirkungsgrad auch in Form eines deutlichen Vorteils beim Primärenergieeinsatz niederschlagen. Elektrofahrzeuge benötigen große Batterien, bei deren Herstellung seltene Ressourcen verbraucht und CO₂ erzeugt werden. Trotzdem schneiden die Fahrzeuge in der Gesamtbilanz bereits heute besser ab als Dieselbusse. Batterie-Recycling wird zukünftig helfen, die Umweltauswirkungen weiter zu reduzieren.⁸ Da der elektrische Antrieb, anders als der Verbrennungsmotor, rekuperierte Bremsenergie für den Antrieb zur Verfügung stellen kann, sind die Einsparpotenziale prinzipiell umso höher, je häufiger Anfahr- und Bremsvorgänge vorgenommen werden müssen (innerstädtischer Einsatz mit hoher Haltestellenfrequenz) und tendenziell auch bei bewegter Topografie (Nutzung der Gefällestrrecken). Die zusätzliche, von Herstellern in Aussicht gestellte Einsparung laufender Kosten von etwa einem Drittel gegenüber Dieselfahrzeugen durch die erwartete geringere Wartungsintensität lässt sich heute noch nicht in der Praxis bestätigen und ist daher im betrachteten Anwendungsfall nicht berücksichtigt. Es muss jedoch momentan noch mit einem etwa doppelten Anschaffungspreis gegenüber einem Dieselbus sowie weiteren Kosten u. a. für Ladeinfrastruktur und Werkstatteneinrichtung gerechnet werden. Diese Strukturen müssen vollständig neu errichtet werden, während sie für Dieselbusse bereits bestehen. Daher schneidet der Batteriebus im Gesamtkostenvergleich schlechter ab.

Die aktuell in Deutschland eingesetzten Fahrzeuge befinden sich in einem Übergangsstadium von Prototypen zu seriennahen Fahrzeugen. Es ist zu erwarten, dass sich die Wirtschaftlichkeit verbessern wird, etwa durch die Fortschritte bei der Pkw-Batterietechnologie und durch den in anderen Ländern schon vorhandenen Massenmarkt. so dürfte der Bestand an rein elektrischen Bussen allein in China die Marke von 200.000 Stück mittlerweile überschritten haben.⁹ Zudem kann aufgrund des geringeren Verschleißes am Antriebsstrang künftig auch mit einer längeren Gesamtnutzungsdauer der Fahrzeuge gerechnet werden.

Eine elektrische Reichweite von 200 km ist auch mit heute verfügbaren Fahrzeugen realisierbar, solange übergangsweise eine zusätzliche Innenraumheizung mit Flüssigkraftstoff wie Diesel, Heizöl oder Bio-Ethanol in Kauf genommen wird. Bei rein elektrischer Klimatisierung kann die Heizung (sowie in geringerem Maße auch die Kühlung) des Innenraums den monatlichen Gesamtverbrauch gegenüber dem verbrauchsschwächsten Monat um etwa 50 % erhöhen und damit die Reichweite entsprechend reduzieren. Luftwärmepumpen befinden sich noch nicht im Serienstadium, stellen aber perspektivisch eine hocheffiziente Lösung für den vollständig emissionsfreien Betrieb dar.

⁸ Öko-Institut e.V. 2018

⁹ Shengyang 2017

Aufgrund der Reichweitenbeschränkung wurde in der vorliegenden Bewertung angesetzt, dass die heute verfügbaren Fahrzeuge zunächst auf kurzen Linien eingesetzt werden. In der betriebswirtschaftlichen Betrachtung wurde ein Konzept mit Depotladen und induktiven Nachladestationen an den Linienendpunkten angenommen. Denn bei starker Nutzung von Ladestationen an Unterwegs-Haltestellen bestehen große Unsicherheiten bzgl. der Umsetzbarkeit im Straßenraum und Zyklusfestigkeit der Batterie bei sehr hohen Ladeleistungen. Hinzu kommen die schwierigere Gewährleistung von Ersatzverkehren und Umleitungen bei Betriebsstörungen sowie das Risiko von Fehlinvestitionen, falls steigende Reichweiten in den nächsten Jahren den Ausbau von Ladeinfrastruktur entlang der Linie überflüssig machen. Die Praxispartner gehen in der heutigen frühen Marktphase teils noch von einem relevanten Fahrzeugmehrbedarf aus. Dieser hängt von Linienprofil, Ladekonzept, Batteriekapazität und Konfiguration der Nebenverbraucher ab und kann zwischen 10 und 50 % liegen, wenn vollständige Emissionsfreiheit auch der Nebenverbraucher verlangt ist. Die betriebswirtschaftliche Unsicherheit hinsichtlich der Akku-Lebensdauer kann durch Mehrkosten einer Batteriegarantie des Herstellers abgedeckt werden.

Es ist zu beobachten, dass die Verkehrsunternehmen E-Busse zunächst auf Solobuslinien mit eher kürzeren Umläufen im Innenstadtbereich bei nicht zu kurzen nächtlichen Ruhezeiten einsetzen. Beim nun im größeren Maßstab anlaufenden Rollout von E-Bussen ist es von zentraler Bedeutung, die erforderlichen Umstellungen auf den Betriebshöfen und im Einsatzkonzept mit einzuplanen: Dazu gehören die Errichtung von Dacharbeitsplätzen in den Werkstätten, die Ausbildung des Personals u. a. im Umgang mit Hochvolttechnik, die systematische Abstimmung und Einsatzplanung der Fahrzeuge mit verschiedenen Antrieben, die Schaffung der Netzanschlusskapazitäten 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.

Bei der Förderung für Elektromobilität im Busbereich sollte deshalb neben der Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturbeschaffung auch die Erstellung von Implementierungsstrategien einen hohen Stellenwert haben. Besonders kleinere Busbetreiber können für dieses Thema nicht ausreichend Personal abstellen und entsprechend qualifizieren. Zudem ist für sie die Teilnahme an Förder- und Beschaffungsprogrammen aufgrund von Mindeststückzahlen und zusätzlichen Risiken bei der wettbewerblichen Vergabe schwierig.

Darüber hinaus fehlen weiterhin Serienfahrzeuge v.a. der in Deutschland etabliertesten Hersteller. Neben kommunalpolitischen und gerichtlichen Ent-

scheidungen sind gemeinsame Beschaffungsinitiativen die Treiber für die in den kommenden Jahren erwartete Marktentwicklung. Diese sollten gleichzeitig zur Schaffung einheitlicher technischer Standards genutzt werden.

Chiptuning – Anpassung der Motor- und Getriebesteuerung



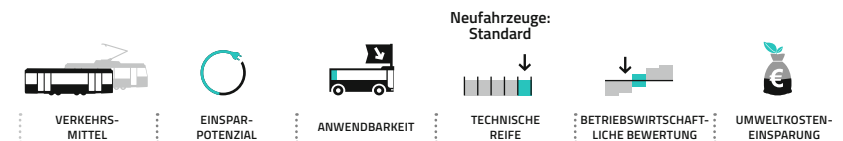
In Bussen eingesetzte Dieselmotoren ähneln in ihrer Auslegung und Steuerung häufig Lkw-Motoren. Beide Anwendungen unterscheiden sich jedoch deutlich hinsichtlich ihrer Geschwindigkeitsprofile. Beim sogenannten »Chiptuning« oder auch »Eco-Tuning« passen meist externe spezialisierte Dienstleister nachträglich die elektronische Motorsteuerung an die individuelle Nutzung an. Hier kann ein Vorteil des Busverkehrs genutzt werden: Das Einsatzprofil ist – anders als z.B. beim Pkw – in der Regel klar definiert. Diese Maßnahme dient meist dem primären, aber nicht unbedingt ausschließlichen Ziel eines minimierten Kraftstoffverbrauchs. Chiptuning begrenzt und optimiert das Drehmoment, zudem werden Einspritzmenge und Förderbeginn optimiert. Grundsätzlich kann durch Chiptuning die Leistung gehoben oder gesenkt werden. Eine verwandte Maßnahme ist die Änderung der Getriebesteuerung.

Die Anbieter von Chiptuning werben mit weiteren Vorteilen wie geringerem Verschleiß und weniger Schaltvorgängen. Im betrachteten Anwendungsfall konnte der Dieselkraftstoffverbrauch um 8 % gesenkt werden – bei Systemkosten von wenigen Tausend Euro pro Fahrzeug. In anderen Fällen wurden jedoch keine Einspareffekte erkannt. Die im Projekt vertretenen Praxispartner und die Teilnehmenden der Werkstattgespräche bewerteten nicht nur das Einsparpotenzial sehr unterschiedlich. Als Kritikpunkte wurden auch ungewollte Nebeneffekte wie Vibrationen oder unzureichendes Beschleunigungsvermögen genannt. Bedenken potenzieller Anwender hinsichtlich der Gewährleistung werden durch die Anbieter relativiert. Diese übernehmen im Zuge der Umrüstung auch die nötige Neuzertifizierung der Fahrzeuge in Hinblick auf die Schadstoffgrenzwerte.

Eine einhellige Empfehlung für die (hier primär betrachtete) Modifikation der Motorsteuerung für alle Fahrzeuggenerationen und Einsatzzwecke kann nicht ausgesprochen werden. Die Verkehrsunternehmen sollten aber, schon wegen der möglichen Kostenersparnis, diese und ähnliche Maßnahmen im Blick behalten.

Denn in vielen Fällen, insbesondere bei Fahrzeugen der Generation vor Euro VI, kann ein sehr gutes Verhältnis aus Investition und Einsparung erreicht werden. Diese Tatsache kann auch als Hinweis an die Fahrzeughersteller – die der Maßnahme meist kritisch gegenüberstehen – aufgefasst werden: Eine auf den jeweiligen Anwendungszweck zugeschnittene Antriebskonfiguration kann für den Anwender große Vorteile aufweisen – über das Chiptuning hinaus gedacht gilt dies voraussichtlich zukünftig auch beim elektrischen Antrieb.

Nachrüstung Rückspeisefähigkeit bei Altfahrzeugen



In Gleichstromnetzen, etwa für die Straßen- und U-Bahn, kann die für Bremsvorgänge nötige Energie mit hohem Wirkungsgrad rekuperiert werden. Dadurch wird der Verschleiß an Rädern, Schienen und mechanischem Bremssystem ebenso reduziert wie der Einsatz von Brems sand. 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 Speichern erhalten oder durch rückspeisefähige Unterwerke ins Mittelspannungsnetz zurückgespeist werden. Alle Anwendungen außerhalb des Fahrzeugs erfordern aber, dass dieses technisch überhaupt zur Rückspeisung fähig ist. Bei Neufahrzeugen ist dies der Standard. Bei Altfahrzeugen kann die Nachrüstung mit den benötigten leistungselektronischen Komponenten und Regeltechnik im Rahmen einer turnusgemäßen Überholung erwogen werden.

Die damit erzielbaren Einsparungen wie auch die Kosten sind jedoch stark von der Ausgangslage abhängig. Die Strommenge, die dem Netz ohne Rückspeisefähigkeit der Fahrzeuge entgeht, kann mehr als einem Drittel des Gesamtbedarfs des Fahrzeugs entsprechen. Beim betrachteten Praxispartner wären jedoch für eine Senkung des Fahrstrombedarfs um etwa ein Fünftel Kosten in Höhe von mehr als 150 Tsd. Euro je Fahrzeug entstanden. Diese hätten sich über die erwartete Restlaufzeit von 15 Jahren nicht amortisiert.

Es ist bedenklich, wenn ein so massives Einsparpotenzial durch Verkehrsunternehmen aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit nicht gehoben wird. Eine ohnehin turnusmäßig anstehende Generalüberholung, bei der die Fahrzeuge weitgehend »entkernt« und Antriebskomponenten ausgetauscht werden, sollte diese auf einen mit Neufahrzeugen vergleichbaren technischen Standard bringen. Auch wenn das Thema Rückspeisefähigkeit an sich – wegen der sukzessiven Erneuerung der Fahrzeugflotten – nur noch wenige Jahre relevant sein dürfte: Das Beispiel zeigt, dass eine finanzielle Förderung der Energieeffizienz auch bei der Nachrüstung stattfinden sollte. Andernfalls droht der ökologische Vorteil der langen Lebensdauer von Schienenfahrzeugen zu einem Nachteil zu werden.

3.2. Nebenverbraucher / sonstige Fahrzeugtechnik

Verbesserte Innenraumdämmung



Der Energiebedarf für die Innenheizung einer Straßenbahn ist bei null Grad Außentemperatur ähnlich hoch wie der für den Antrieb. Im Jahresdurchschnitt kann davon ausgegangen werden, dass ein Viertel der aus der Oberleitung entnommenen elektrischen Energie für Heizung und Kühlung verwendet wird.

Strategien zur Reduzierung des Heizenergiebedarfs ähneln meist den Maßnahmen, die unter »Energieeffiziente Klimatisierung« mit Blick auf die Kühlung genannt werden. Zusätzlich kommt eine verbesserte Dämmung in Frage, die ebenfalls sowohl bei sehr hohen als auch bei sehr niedrigen Außentemperaturen wirkt. Bei der in diesem Zuge diskutierten Doppelverglasung gibt es jedoch einen Zielkonflikt mit dem dadurch entstehenden Fahrzeugmehrgewicht. Es besteht die Herausforderung, die fahrwegbedingten maximal zulässigen Achslasten des einzuhalten – bei gleichzeitig gewünschter hoher Beförderungskapazität, neuen Einbauten wie Klimaanlage und Fahrgastinformation sowie gestiegenen Anforderungen zur Crash-Sicherheit. Die Experten äußerten die Befürchtung, dass die eingesparte Heizenergie aufgrund des Fahrzeugmehrgewichts durch zusätzliche Antriebsenergie in etwa kompensiert wird. Zudem wird das Energieeinsparpotenzial dadurch reduziert, dass v.a. im Stadtverkehr viel Wärme

durch die häufigen 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 von dämmenden Materialien in den Außenwänden bestehen Einschränkungen durch die gleichzeitige Einhaltung von Brandschutzvorschriften und die Vermeidung eines wegen der größeren Wandstärken verringerten Innenvolumens. Ihre Wirkung entfalten die Materialien zudem erst, wenn der Wärmeübergang ganzheitlich (inkl. der tragenden Konstruktion und der dazwischenliegenden Grenzflächen) optimiert wird.

Eine betriebswirtschaftliche Betrachtung konnte bei dieser Maßnahme nicht durchgeführt werden. Ein Fahrzeugkonzept mit konsequenter Isolierung und ein ansonsten vergleichbares Referenzfahrzeug sind auf dem Markt nicht verfügbar, weshalb kein sinnvoller Vergleich möglich war.

Die Erforschung und Entwicklung konsequenter Gesamtkonzepte durch Hersteller und wissenschaftliche Institutionen sollte daher forciert werden – unter Berücksichtigung von Sonneneinstrahlung, Fensterflächen, Karosserie und Wandmaterialien. Dabei kann möglicherweise aus dem Gebäude-, Schienenfern- oder Luftverkehrsbereich eingesetzten Technologien gelernt werden. Regulatorisch kommen erhöhte Fördermittel in Frage, aber auch die höhere Gewichtung der realen Wärmedurchgangszahl als Bewertungskriterium in Ausschreibungen, ohne dass dadurch die Einhaltung sonstiger Anforderungen an das Fahrzeug in Frage gestellt wird.

Verzicht auf Klimatisierung des Fahrgastraums



Die Energiebedarfe zur Kühlung des Fahrzeuginnenraums lassen sich technisch am einfachsten vermeiden, wenn auf eine aktive Klimatisierung verzichtet und stattdessen mit einem leistungsfähigen Lüftungssystem gearbeitet wird. Neben den direkten Einsparungen bei warmen Außentemperaturen schlägt sich ganzjährig die Reduktion des Fahrzeuggewichts positiv auf den Verbrauch nieder. Insgesamt lassen sich beim hier primär betrachteten Dieselomnibus 12 bis 15 % Kraftstoff einsparen. An Spitzentagen kann die Einsparung sogar fast 50 % betragen. Bei den Praxispartnern sind unklimateisierte Fahrzeuge auch bei Straßen- und U-Bahnen verbreitet, bei denen

zusätzlich auch Bordnetzumrichter entfallen. Es wird hier eine ähnliche prozentuale Verbrauchseinsparung wie beim Bus erreicht. Bei der U-Bahn mit ihrem baulich vorgegebenen Tunnelquerschnitt reduziert eine Klimaanlage zudem das Platzangebot im Innenraum, da sie nicht auf dem Dach angeordnet werden kann. 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. Betriebswirtschaftliche Vorteile ergeben sich nicht nur durch die Energieeinsparung, sondern auch durch eine Kostenreduktion bei Fahrzeuganschaffung, Wartung und Betriebsmitteleinsatz.

Bei der Maßnahmenbewertung durch die Vertreter unterschiedlicher Verkehrsunternehmen und anderen Stakeholder herrschte ein Dissens bei der Bewertung dieser Maßnahme. Auf der einen Seite berichtete die DVB – ein Verkehrsunternehmen, das im Straßenbahnbereich auf Klimatisierung verzichtet und damit in Sachen Energieeffizienz Spitzenwerte erzielt – von einer hohen Akzeptanz durch die Fahrgäste. Im Jahr 2017 habe es beispielsweise keine einzige Kundenanfrage zu dem Thema gegeben. Andererseits wurde mehrfach Skepsis hinsichtlich der Machbarkeit eines Ersatzes klimatisierter durch nichtklimatisierte Fahrzeuge geäußert: Energieeffizienz dürfe nicht auf Kosten des gebotenen Fahrgastkomforts gehen und Kunden seien es heutzutage gewöhnt, sich in klimatisierten Räumen und Fahrzeugen, v. a. auch im konkurrierenden Pkw, aufzuhalten. Die Gefahr eines hitzebedingten Kreislaufkollapses, insbesondere älterer Fahrgäste, sei ernst zu nehmen. Hinzu kommen technische Entwicklungen wie die bessere Dämmung der Fahrzeuge, der verstärkte Einsatz elektronischer Geräte mit Abwärmeentwicklung und der erhöhte Anteil von Glasflächen an der Außenhaut von Straßenbahnen, die den Innenraum erwärmen und damit den Kühlungsbedarf erhöhen. Aus Gründen wie diesen ist die Anforderung, klimatisierte Fahrzeuge einzusetzen, bei Ausschreibungen und Direktvergaben heute weit verbreitet.

Durch Verzicht auf Klimatisierung kann eines der größten Energieeffizienzpotenziale gehoben werden. Er lässt sich offensichtlich auch den Fahrgästen vermitteln. Der Verzicht auf Klimatisierung scheint aber hauptsächlich dort denkbar, wo bereits heute unklimateisierte Fahrzeuge genutzt werden. Wo man das Ziel einer Verlagerung von Wegen des MIV auf den ÖPNV gefährdet sieht, sollten im Interesse der Attraktivität im Zweifel stattdessen Effizienzpotenziale bei der Klimaanlage genutzt werden.

Energieeffiziente Klimatisierung



Um die Klimatisierung der Fahrzeuge energieeffizienter zu gestalten, dürfen 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 ein Kompressor mechanisch mit dem Motor gekoppelt ist, hin zu elektrischen Aufdach-Geräten. Bei Bussen und Schienenfahrzeugen gibt es weitere technisch vielversprechende Ansätze: Die Nutzung von CO₂- und Feuchtigkeits-Sensoren, die eine vom Besetzungsgrad abhängige Frischluftzufuhr ermöglichen, der Verzicht auf die energieaufwändige Luftentfeuchtung, die Vorkühlung der Zuluft durch Luftrückführung und eine intelligente Luftführung im Fahrgastraum. Im Schienenverkehrsbereich wird diskutiert, Motoren mit einer Wasserkühlung zu versehen und die Abwärme durch eine Kopplung der Kreisläufe für die Klimaanlage nutzbar zu machen.

Ansonsten liegen die Potenziale in einer optimierten Anlagensteuerung. Obwohl die VDV-Vorschrift 236 ausführliche Richtlinien für den Betrieb enthält, fallen sowohl die heutige Praxis als auch die Bewertung der Wirksamkeit einzelner Ansätze sehr unterschiedlich aus. Die 4°C-Delta-Regelung (Innenraum max. 4 °C wärmer als Außentemperatur) kann nicht in allen Fahrzeugen softwareseitig umgesetzt werden.¹⁰ Ein weiterer Ansatz ist die Erhöhung der unteren Einsetzschwelle der Klimaanlage auf mehr als die heute üblichen Temperaturen (z. B. 24 °C Außentemperatur) und stattdessen reine Belüftung.

Im Stadtverkehr mit häufigen Türöffnungsvorgängen und Fahrzeugen, die über sehr viele Türen verfügen, erschwert der häufige Austausch mit der Umgebungsluft einen energieeffizienten Betrieb. Die von vielen Experten angeführte Lösung durch Aussetzung der Frischluftzufuhr an den Haltestellen und Luftschleier im Türbereich wurden von den Verkehrsbetrieben jedoch mehrfach als unwirksam bewertet. All diese Lösungen erfordern übrigens, dass zumindest die Temperatur des Fahrgastraums automatisch geregelt wird – ggf. mit der Ausnahme einer weiterhin individuell regulierbaren Fahrerkabine. Auch dies wird jedoch nicht in jedem Verkehrsunternehmen praktiziert.

¹⁰ Seitens eines Praxispartners wurde zudem ihre Wirksamkeit auf den Kraftstoffverbrauch angezweifelt.

Im hier betrachteten Praxisfall werden durch Ersatz voll- durch teilklimatisierter Busse eine intelligent und bedarfsgerecht gesteuerte Anlage sowie eine höhere natürliche Lüftung in der Summe 7 bis 9 % Kraftstoff eingespart. Busse mit Teilklimatisierung sind zudem kostengünstiger in der Anschaffung.

Angesichts der für die Fahrgäste mehr und mehr selbstverständlichen Fahrzeugklimatisierung und der hohen Bedeutung für den Energiebedarf sollte die Wirksamkeit der weitergehenden technischen und betrieblichen Lösungen noch besser erforscht und verbessert und Standards überprüft werden – dies gilt besonders im Busbereich, wo sich eine ineffiziente Klimaanlage deutlich auf die Reichweite in der voraussichtlich elektromobilen Zukunft auswirkt.

Leichtbaubusse



Grundsätzlich gibt es verschiedene Ansätze zur 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. Bestimmte Leichtbauteile werden von allen Herstellern eingesetzt und gelten als Stand der Fahrzeugtechnik. Der Formleichtbau gewinnt an Bedeutung, da z.B. durch 3D-Druck-Verfahren intelligente Bauteilgeometrien realisiert werden können.

Einzelne Hersteller gehen über die Optimierung nur einzelner Teile hinaus und bieten Solobusse mit einem um ein Viertel reduzierten Fahrzeuggewicht an. Dieses wird v.a. durch eine Aluminiumkarosserie erreicht. Die Angaben von Experten und Anwendern zur dadurch bei Dieselnissen erzielten Kraftstoffeinsparung schwanken zwischen 5 % und 20 %. Leichtbaumaßnahmen sind auch bei elektrischen Bussen weit verbreitet, um das Mehrgewicht durch die Batterien zu kompensieren und die Reichweite zu erhöhen. 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. Trotz konservativer Annahmen zur Kraftstoffeinsparung beurteilt ein Praxispartner Leichtbaubusse in der betriebswirtschaftlichen Bewer-

tung positiv, denn die Anschaffungskosten können sogar leicht unterhalb jener eines konventionellen Fahrzeugs liegen. Aufgrund der geringen Hersteller- und Modellvielfalt im Leichtbaubereich ist ein solcher Vergleich vorläufig jedoch mit Vorsicht zu betrachten. Potenzielle Anwender äußern zudem Skepsis hinsichtlich der Gesamtenergiebilanz, denn die Herstellung von Aluminium ist energieaufwändiger als die Stahlproduktion.

Es werden zudem Mehrkosten bei der Unfallschadensbehebung erwartet, da beschädigte Bereiche von Stahl- im Gegensatz zu Aluminiumkarosserien leichter ohne Demontage mit Schweiß- und Biegetechniken repariert werden können. Diese Skepsis wurde jedoch zumindest auf mittelfristige Sicht nicht von allen Praxispartnern geteilt. Zudem kann die parallele Reparatur von Stahl- und Aluminiumfahrzeugen zu Korrosionsschäden führen. Deshalb sind getrennte Werkstätten für Aluminium- und Stahlfahrzeuge nötig. Eine weitere Unsicherheit beim Leichtbau stellt aufgrund der Verwendung von Werkstoffen mit anderen Eigenschaften und der oft verringerten Fahrzeuggeometrien die Lebensdauer dar. Hier gibt es zwar erste ermutigende Erfahrungen, eine breitere Datenbasis fehlt jedoch in Deutschland noch.

Trotz einzelner offener Fragen handelt es sich beim Leichtbau klar um eine verbrauchsreduzierende Maßnahme, die sich betriebswirtschaftlich in der Regel ohne monetäre Förderung lohnen dürfte. 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.

Leichtbauschienenfahrzeuge



Ein Vergleich zweier Fahrzeugtypen mit unterschiedlichem Fahrzeuggesamtgewicht bei ansonsten gleichen Kennwerten war für Straßen- oder U-Bahnen nicht möglich. Dazu sind die eingesetzten Fahrzeuge zu individuell auf die Anforderungen des jeweiligen Bedienungsgebietes und der Verkehrsunternehmen zugeschnitten. So haben Busse weitgehend standardisierte Fahrzeugmassen. Im Schienenverkehrsbereich orientiert sich das Gewicht jedoch an der durch einzelne Bauwerke wie Hochbahnstrecken und Brücken vorgegebenen maximalen Achslast und der durch minimale Kurvenradien definierten Fahr-

gestellanzahl. Gleichzeitig sind die Fahrzeuge in der Vergangenheit aufgrund gesteigerter Stabilitätsanforderungen bei Unfällen 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.

Leichtbaumaßnahmen jedweder Art sind unverzichtbar, um all diesen Ansprüchen gerecht zu werden. In Hinsicht auf Aluminium-Wagenkästen wird neben der Unfallschadensbehebung (s. Leichtbaubusse) jedoch häufig angewendet, dass heutige Straßenbahnfahrzeuge mehr Gewicht auf dem Dach tragen müssen (z.B. Klima- und Hochvoltanlagen). Die dazu erforderliche Stabilität auch mit leichten Aluminiumkonstruktionen zu erreichen, ist anspruchsvoll. Sowohl Schadensbehebung als auch Traglast spielen bei U-Bahnen eine geringere Rolle, da sie aufgrund der Lichtraumprofile keine Dachaufbauten tragen können und keine unfallgefährlichen Kreuzungspunkte mit anderen Verkehrsmitteln haben.

Abgesehen vom Aluminium-Wagenkasten gibt es – ähnlich wie beim Omnibus – auch an anderen Stellen Potenziale zur Gewichtsreduktion: Masseneinsparungen können durch Sandwichbauweise und andere intelligente Konstruktionen sowie Verbundmaterialien und Kunststoffe in Boden, Außenwänden und Mobiliar erreicht werden. Im Fahrwerksbereich kann z.B. durch geänderte Antriebskonzepte die Anzahl der Motoren, Getriebe und Wechselrichter reduziert werden.

Leichtbau verringert unzweifelhaft den Verbrauch von Schienenfahrzeugen, auch wenn bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ein Teil der gesparten Beschleunigungsenergie durch ein ebenfalls geringeres Rekuperationspotenzial kompensiert wird (wie auch beim E-Bus). 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 Standard sind, sollten dann auch hier umgesetzt werden.

Bedarfsgerechtes Kneeling



»Kneeling« bezeichnet das seitliche Absenken des Busses, das den Höhenunterschied zwischen der Bordsteinkante und dem Fahrzeugboden verringert oder aufhebt. Dies erleichtert Fahrgästen mit Rollstuhl, Gehbehinderung, Kinderwagen oder Gepäck den Einstieg. Dieser Vorgang geschieht über ein Druckluftsystem, das über 10 % des Kraftstoffverbrauchs ausmachen kann und zudem wartungsintensiv ist.

In der Praxis wird das Kneeling unterschiedlich gehandhabt. Bei einem Praxispartner wird der Absenkvorgang rein bedarfsgerecht durch die Fahrgäste gesteuert (Anforderungstaste innen und außen am Fahrzeug). Andernorts hat das Fahrpersonal die Anweisung, standardmäßig an jeder Haltestelle manuell das Kneeling auszulösen. Im Extremfall wird der Vorgang automatisiert bei jeder Türöffnung ausgelöst ohne dass das Fahrpersonal Einfluss nehmen kann – sogar beim Rangieren auf dem Betriebshof.

Durch eine Umstellung vom letzt- auf das erstgenannte Modell können sehr kosteneffizient Einsparpotenziale erschlossen werden. Dabei kommt nicht nur der seltenere Wiederaufbau des Drucks im pneumatischen System zum Tragen, sondern auch die Zeitersparnis an den Haltestellen. Da die Praxis aber jeweils aufgrund von lokalen Diskussionen mit Fahrgastverbänden und Vertretern von Menschen mit Behinderungen entstanden ist, wird auch die Akzeptanz einer solchen Änderung der Praxis sehr unterschiedlich eingeschätzt. Die Unternehmen, die bedarfsgerechtes Kneeling praktizieren, berichten kaum von Fahrgastbeschwerden. In Berlin wurde die Maßnahme wegen Kritik durch Verbände nach kurzer Zeit zurückgenommen.

Die Maßnahme »Umstellung von ‚Zwangs-‘ auf bedarfsgesteuertes Kneeling« ist nur bei einzelnen Unternehmen von Bedeutung, da es vielerorts schon bedarfsgerecht gehandhabt wird. Zusätzlich verliert sie tendenziell an Bedeutung, da Haltestellen schrittweise auf Hochborde umgestellt werden und moderne Busse über eine niedrige Flurhöhe verfügen. Auch können elektrisch betriebene Druckluftsysteme den Energieaufwand senken. Trotzdem ist das Thema ein gutes Beispiel, wie eine sehr weitgehende Auslegung anderer, zweifellos unabdingbarer Anforderungen die Energieeffizienz konterkarieren kann. Eine energieeffizientere Lösung, die ohne Abstriche die Anforderung der Barrierefreiheit erfüllt, ist in Form des bedarfsgerechten Kneelings verfügbar.

3.3. Infrastruktur

Optimierung der Fahrstromverteilung



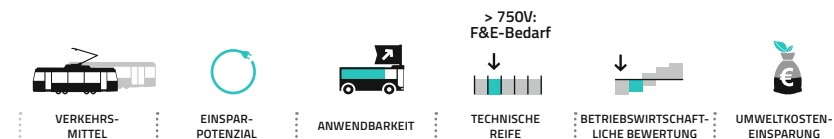
Bei oberleitungsbasierter Energiezufuhr sollen die eingespeisten Strommengen möglichst zu annähernd 100 % von den Fahrzeugen genutzt werden und nicht aufgrund von Leitungsverlusten oder fehlenden Abnehmern rekuperierter Bremsenergie verloren gehen. Um dies zu gewährleisten, gibt es unterschiedliche technische Optimierungsmöglichkeiten: Die zweiseitige Speisung oder Durchbindung bezeichnet die elektrische Verbindung von vorher getrennten Speiseabschnitten der Oberleitungsinfrastruktur (Längsrichtung). Dies ermöglicht die Nutzung des rückgespeisten Stroms durch andere Fahrzeuge in weiter entfernten Netzabschnitten. Vermaschung bezeichnet hingegen die Schaffung von Querverbindungen. Bei der Oberleitungsinfrastruktur bedeutet dies v. a. die Schaffung elektrischer Verbindungen zwischen beiden Fahrrichtungen. Dies erhöht die Sicherheit gegen Netzausfälle 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 eines Praxispartners betrachtet, der über einen Zeitraum von sechs Jahren eine verbesserte Durchbindung von Speiseabschnitten und Mehrpunktspeisung umsetzte, was zu einer Senkung des Fahrstrombedarfs um 13 % führte. Zudem konnte eine Glättung von Strombedarfsspitzen und damit die Vermeidung von Spitzenstrompreisen erreicht werden. Die erforderlichen Infrastrukturinvestitionen umfassten die Installation zusätzlicher Anlagen und Software in den jeweiligen Gleichrichterunterwerken (GUW). Außerdem waren neue Schutzvorrichtungen erforderlich – getrennte Netzabschnitte sind schließlich ein Schutz vor Stör- und Ausfällen. Insgesamt entstanden Kosten von unter 10 Tsd. Euro je GUW, die bei evtl. nötigen Tiefbauarbeiten im Straßenraum jedoch höher sein können.

Das Einsparpotenzial hängt entscheidend davon ab, inwieweit die Infrastruktur schon heute nach den entsprechenden Kriterien gestaltet ist. So gibt es in den U-Bahn-Netzen nur noch wenig Potenzial. Auch wenn sich eine Optimie-

rung 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.

Erhöhung der Nennspannung



Die Entscheidung für eine bestimmte Nennspannung ist immer eine Entscheidung, die das Gesamtsystem betrifft: Die Stromversorgungsinfrastruktur muss vollständig umgerüstet werden und alle Fahrzeuge müssen für das Spannungsniveau geeignet sein. Altfahrzeuge müssen also ausgemustert oder ertüchtigt werden. Insofern müssen die Vor- und Nachteile sorgfältig gegeneinander abgewogen sein.

Entscheidet ein Verkehrsunternehmen, die Fahrdrabtspannung zu erhöhen, z.B. um den Faktor 1,25 im Fall einer Erhöhung von 600 auf 750 V, geht dieser Faktor bei der zu erwartenden Verringerung der Leitungsverluste im Quadrat ein. Im Beispiel ergibt sich der Faktor 1,56, d. h. die Übertragungsverluste werden um etwa 36 % sinken. Da die Leitungsverluste jedoch insgesamt nicht der einzige Faktor sind, kann das Motiv für diese Maßnahme i. d. R. nicht alleine diese Effizienzsteigerung sein. Bei einem Musterunternehmen fiel die Entscheidung für die Erhöhung auf 750 V auch, weil eine höhere übertragbare Leistung sowie ein bessere Spannungsstabilität erwartet werden und weil ein größerer Abstand zwischen den einzelnen Gleichrichterwerken möglich wird. Hinzu kommen eine Erhöhung des Rückspeisungsgrads wegen der Vergrößerung des nutzbaren Spannungsbereiches und eine Minderung der Streustromkorrosion. Zudem kann die Steigerung der Kapazitätsgrenzen der Energieübertragung auch für Taktverdichtungen genutzt werden. Den in diesem Fall aufgewendeten 1,5 Mio. Euro für die Umrüstung der GUW mit neuen Transformatoren und Sicherheitstechnik sowie für zusätzliche stromführende Trageile in der Oberleitungsinfrastruktur steht eine geschätzte Verringerung des Strombedarfs von im Mittel ca. 7 % gegenüber.

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.

Perspektivisch kommt auch eine Erhöhung über die vielerorts verwendete Spannung von 750 V hinaus in Frage. Dazu gibt es in Deutschland bisher nur sehr wenige Anwendungsbeispiele aus dem Bereich von Straßen-, Stadt- und U-Bahn. Angesichts der nötigen umfangreichen Umrüstung oder Erneuerung des Fahrzeugparks und der Infrastruktur können dabei jedoch Jahrzehnte bis zur Amortisation vergehen. Erforderlich sind eine dauerhaft gesicherte Perspektive und finanzielle Grundausstattung des Verkehrsunternehmens. Zudem ist eine gute Abstimmung zwischen Herstellern sowie Betreibern von Fahrzeugen, Komponenten und baulicher bzw. elektrotechnischer Infrastruktur nötig.

Stationäre Energiespeicher



Durch die Rekuperation beim Bremsen vor Haltestellen oder Signalanlagen sowie beim Bergabfahren entstehen zeitlich und örtlich begrenzte Stromüberschüsse. Für die Energiemengen, die nicht im Fahrzeug durch eine intelligente Steuerung der Nebenverbraucher oder durch gleichzeitig im Netzabschnitt befindliche andere Fahrzeuge mit erhöhtem Fahrstrombedarf für die Beschleunigung genutzt werden, kommt eine stationäre Speicherung entlang der Strecke in Frage. Auch Dienstleistungen für das Stromsystem wie Netzstabilisierung und Spitzenlastkappung können dadurch erbracht werden. Je mehr Energie im bisherigen Zustand 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 kein Abnehmer des rekuperierten Stroms vorhanden ist. Derartige Zustände sind am ehesten auf peripheren Abschnitten eines Straßenbahnnetzes gegeben. Hier sind aufgrund des geringen Takts, größerer Haltestellenabstände oder auch wegen nicht verbundener Oberleitungsnetzabschnitte oft keine anderen Fahrzeuge als Verbraucher vorhanden. Als Standorte können Wendeschleifen an Streckenendpunkten geeignet sein, auch weil dort oft geeignete Flächen zur Verfügung stehen.

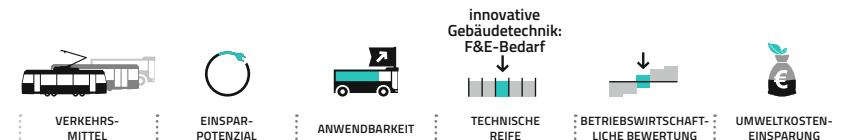
Da die beteiligten Praxispartner in ihren Netzen momentan keine geeigneten Anwendungsorte sehen, wurde als Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsabschätzung ein Pilotprojekt mit einem Schwungradspeicher in einem anderen Straßenbahnbetrieb herangezogen. Technische Alternativen zum Schwungrad sind Batteriespeicher oder Doppelschichtkondensatoren (ggf. in Verbindung mit einem Batteriespeicher). Da

die Lithium-Ionen-Akkutechnologie, getrieben u. a. durch die Marktentwicklung von E-Fahrzeugen, deutliche Fortschritte macht und auch ausrangierte Batterien aus dem Fahrzeugbereich genutzt werden könnten, wird der Batteriespeicher voraussichtlich an Bedeutung gewinnen.

Ein weiteres Argument gegen den Schwungradspeicher ist, dass die Speicherung von Rotationsenergie trotz des einfachen physikalischen Wirkungsprinzips nicht unkompliziert (Abfederung von Vibrationen, Kühlung) und die Verfügbarkeit der gespeicherten Energie zeitlich begrenzt ist.

Speicherkapazitäten werden künftig auch aufgrund des steigenden Anteils fluktuierender erneuerbarer Energien im Netz eine größere Rolle spielen. Der in vielen Fällen bereits gegebene betriebswirtschaftliche Nutzen wird sich weiter verbessern, weil durch stationäre Speicher zukünftig Preisspitzen vermieden werden können. 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. Besonders kleinere Straßenbahnbetriebe, die prozentual höhere Einsparungen erreichen könnten als die oft schon hochoptimierten Netze in größeren Städten, sollten mit Know-how und finanziellen Mitteln unterstützt werden.

Fahrzeugabstellung in geschlossenen Hallen



Das teils bis zu 30 Minuten lange Vorheizen von Straßenbahnfahrzeugen vor Fahrtbeginn ist im Interesse des Fahrgastkomforts. Es dient aber auch dem störungsfreien Betrieb elektronischer Anzeigen im Fahrzeug. Wenn diese im Freien abgestellt werden, kann die Strominfrastruktur an einem frostigen Morgen durchaus an ihre technischen Grenzen gelangen.

Das starke Absinken der Innenraumtemperatur im Winter lässt sich verhindern, indem die Fahrzeuge auf einem Betriebshof nicht im Freien, sondern in geschlossenen Hallen abgestellt werden. Bei einem beispielhaften großen Hallenbauwerk für ca. 70 Fahrzeuge von je 30 m Länge müssen jedoch Baukosten von über 8 Mio. Euro

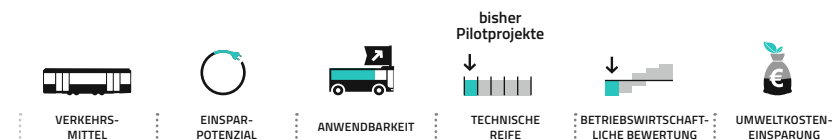
alleine für die Hallenkonstruktion erwartet werden. Auch lässt sich der Heizbedarf nicht vollständig reduzieren, da auch die Halle zumindest leicht temperiert werden muss. Ein Musterunternehmen quantifizierte für Extremtage die Einsparung auf bis zu 50 % der am gesamten Tag benötigten Heizenergie.

Eine Abstellhalle bietet jedoch 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 Überdachung einbezogen wird, können die energetisch sehr aufwändigen Weichenheizungen auf dem Betriebshofgelände vermieden werden. Zudem benötigt die Halle in diesem Fall nur wenige 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 auf den ökologischen Nutzen hin optimiert sein durch klimafreundliche Baustoffe, photovoltaische Nutzung der Dachflächen, Solarthermie und Begrünung sowie geothermische Heizung oder Anschluss an ein bestehendes Fernwärmenetz. Diese »Add-Ons« scheitern jedoch in der Praxis oft an einer zu knappen Grundfinanzierung.

Initiativen zur Stärkung der geschlossenen Abstellung sollten immer auch auf die bestehenden Höfe blicken. Sie sind ohnehin oft stark ausgelastet und der zusätzliche Platzbedarf erhöht den Druck. 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.

Wärmetauscher zur Nutzung von Tunnelabwärme



Unterirdische U- und Stadtbahn-Strecken weisen stets einen Temperaturunterschied zur oberirdischen Außenluft auf. Er entsteht einerseits durch die natürlicherweise konstantere Bodentemperatur, andererseits durch die Wärmeabgabe von Fahrzeugen und beförderten Fahrgästen.

Wie groß dieser ggf. technisch nutzbare Gradient ist, wird u. a. durch Höhenlage, Abschirmung nach außen, Querschnitt und Bedienungsfrequenz beeinflusst, aber auch durch technische Eigenschaften der Fahrzeuge. Ältere Baureihen produzieren möglicherweise mehr Abwärme, weil sie nicht rückspeisefähig sind – und daher mechanisch bremsen. Zusätzlich sind sie noch schlechter wärmegeklämt als Neufahrzeuge. Umgekehrt kann der Trend zur Klimatisierung und neuen elektronischen Verbrauchern im Fahrzeug eine erhebliche Wärmeentwicklung im Tunnel verursachen. Beim Neubau von Tunnelstrecken bestehen konstruktive Möglichkeiten, diesen Gradienten energetisch nutzbar zu machen. Doch auch in bestehenden Systemen lassen sich Potenziale heben. So installierte ein Praxispartner mehrere Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen, die die Gebäudeheizung angrenzender Liegenschaften unterstützen. Bei der nun laufenden Potenzialstudie für weitere Anlagen ist ein entscheidendes Kriterium, 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. Längere Leitungsnetze und Tiefbauarbeiten v. a. im öffentlichen Straßenraum führen zu einer Verschlechterung der Bewertung aus betriebswirtschaftlicher Sicht. Die Positionierung der Anlage im Tunnel wird dadurch eingeschränkt, dass existierende Zugänge wie Versorgungsschächte genutzt werden sollten. Ansonsten wird die unterirdische Strecke um eine schlecht zugängliche Brandlast erweitert sowie um eine Schwachstelle, an der das Eindringen von Wasser verhindert werden muss.

Auch zukünftig werden Tunnelstrecken ein relevantes Abwärmepotenzial aufweisen. Umfangreichere Pilotanwendungen und weitere Technologieentwicklung sollten dazu führen, dass die Effizienz von Wärmetauschanlagen erhöht wird.

3.4. Betrieb

Buszüge zur Bewältigung von Lastspitzen



Im ländlichen und suburbanen Raum bestehen besonders ausgeprägte Nachfragespitzen im morgendlichen Schüler- und Berufspendlerverkehr und in den späten Nachmittagsstunden, die oft mit Gelenkbussen abgefangen werden. Diese Fahrzeuge sind in Randzeiten und um die Mittagszeit vielerorts schlecht ausgelastet. Wenn die Beförderungskapazität flexibler an die Nachfrage angepasst wird, ohne Abstriche bei der Angebotsqualität zu machen, erhöht dies die Energieeffizienz: Verringerter Verbrauch pro Fahrgastkilometer ohne die Gefahr, dass Fahrgäste zum MIV abwandern. Eine mögliche Lösung stellen Gespanne aus einem Solobus und einem Personenanhänger, der entsprechend der Nachfrage an- und abgekuppelt wird, dar. Das Zugfahrzeug »erkennt« den Anhängerbetrieb und kann so die Motorsteuerung entsprechend der aktuellen Fahrzeugmasse anpassen. Im hier betrachteten Praxisbeispiel ersetzt ein Unternehmen im ländlichen Bedienungsgebiet vier Gelenkbusse und zwei Solobusse durch vier Gespanne. Diese werden untertäglich abgekuppelt und im Einsatzgebiet abgestellt. In der Hauptverkehrszeit bieten die Gespanne mit 130 Plätzen deutlich mehr Kapazität als die Gelenkbusse mit 100 Plätzen. In anderen Praxisbeispielen geschieht Kuppeln nicht untertäglich, sondern z.B. nur am Wochenende, u.a. weil das Fahrgastaufkommen in Großstädten gleichmäßiger und das innerstädtische Abstellen der Anhänger problematischer ist.

Das Angebot an Anhängern und kompatiblen Zugfahrzeugen ist zurzeit klein und Nutzer bemängeln hohe Ausfallzeiten und technische Rückständigkeit der Fahrzeuge. Betriebswirtschaftlich werden bei noch nicht erprobten Fahrzeugkonzepten Risikoauflagen angesetzt, denn es ist nicht sicher, dass die Anhänger, wie aus technischer Sicht zu erwarten, geringere Instandhaltungskosten und eine höhere Lebensdauer als die Zugfahrzeuge vorweisen. Zweites zentrales Hemmnis ist, dass Buszüge heute nicht mehr über eine generelle Straßenzulassung verfügen. Der Ermessensspielraum wird durch die zuständigen lokalen Behörden unterschiedlich ausgelegt. Teils werden streckenbezogene, teils pauschale Sondergenehmigungen erteilt – jedoch immer nur für wenige Jahre. Dies macht die Anschaffung der Fahrzeuge für die Betreiber zu einem hohen betriebswirtschaftlichen Risiko.

Durch den Abbau rechtlicher Hindernisse und eine Förderung des Einsatzes bedarfsgerechter Fahrzeuggrößen könnte ein Prozess in Gang gesetzt werden. Eine anspringende Marktentwicklung sollte besser 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 Antriebsakkus ausgestattete Anhänger zudem den Vorteil haben, dass analog zur Fahrzeuggröße auch die gewichtsintensive mitgeführte Batteriekapazität an den Bedarf angepasst wird.

Busbeschleunigung



Die Effekte von Beschleunigungsmaßnahmen im Straßenraum, die einer effizienteren Abwicklung des Busverkehrs dienen, müssen kritische Schwellen überschreiten: Es müssen relevante Zeiteinsparungen erreicht und möglichst ganze Umläufe eingespart werden. Daher wirken Beschleunigungsmaßnahmen meist nur in einem sinnvollen Gesamtkonzept. Im hier betrachteten Fall richtete die Kommune auf einer hochfrequentierten innerstädtischen Linie eines Praxispartners zusätzliche Busspuren ein und dehnte die Geltungsdauer bestehender Busspuren aus. Die Anordnung von Parkplätzen wurde geändert, um den Lade- und Lieferverkehr besser abzuwickeln. Zahlreiche Ampelschaltungen wurden verbessert und intelligent gesteuert und man richtete 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. Ein Nebeneffekt ist, dass aufgrund der bei Umbauten vorzunehmenden Errichtung von Hochbord-Haltestellen auch das Kneeling entfallen kann. Die Maßnahmen sollen zu einer ungestörteren und damit tendenziell verbrauchsärmeren Fahrt führen. Durch Fahrtzeitgewinne wird die Attraktivität für potenzielle Fahrgäste erhöht. Vorrangig zielen die Maßnahmen jedoch auf eine geringere Anzahl verspäteter Fahrten und erforderlicher Verstärkerfahrten ab und damit auf eine Reduzierung des Fahrzeugbedarfs.

Aufgrund der unterschiedlichen Zielsetzungen, die alle auf die Energieeffizienz wirken, ist eine Quantifizierung der Einsparungen schwierig. Zudem handelt es sich immer um langwierige Planungs- und Umsetzungsprozesse, während derer es ein verändertes Verkehrsaufkommen geben kann, was die Vergleichbarkeit erschwert. Ein tatsächliches Erreichen der geplanten Beschleunigung erfordert nicht zuletzt die Durchsetzung des Vorrangs des Busverkehrs gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern, die Hindernisse auf Busspuren darstellen können. Wo aber 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.

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 ÖPNV-Vorrangschaltungen wieder einzuprogrammieren.

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. Zu deren Durchsetzung sind aber umfassende Planung und konstanter Dialog zwischen Verkehrsunternehmen, kommunaler Verwaltung und Öffentlichkeit unerlässlich – in der Planungs- und Bauphase und darüber hinaus.

Anreizsystem / Wettbewerb energieeffizientes Fahrverhalten



Das Fahrverhalten wird regelmäßig als relevantester Einflussfaktor auf den Energieverbrauch von Bussen eingestuft, so auch in den Expertengesprächen im Rahmen des Projekts. Das Personal kann durch vorausschauendes Fahren Brems- und Beschleuni-

gungsvorgänge sowie Höchstgeschwindigkeiten und Motorlauf im Stillstand reduzieren. Gegenüber einer »straffen« Fahrweise wird der Kraftstoffeinsatz dabei im Realbetrieb um bis zu 10 % gesenkt. Parallel können die Zahl von Bagatellschäden gesenkt und der Fahrgastkomfort erhöht werden. Jedoch besteht gleichzeitig der Druck, unter allen Umständen den Fahrplan einzuhalten. Die Grundsätze zur Verbrauchseinsparung – die nicht zwangsläufig zu Zeitverlusten führen müssen – werden nach Ansicht vieler Teilnehmer in betrieblichen Schulungen nur unzureichend vermittelt.

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« 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. Idealerweise werden hierzu aus Datenschutzgründen Teams gebildet. Vergleichbarkeit und Gerechtigkeit werden durch streckenbezogene und tageszeitabhängige Auswertungen geschaffen. Alternativ werden nur personen- bzw. »teamspezifisch« Verbrauchsänderungen gegenüber dem vorherigen Zeitraum ausgewertet. Es ist auch denkbar, dass ein Teil der Einsparung, die durch das verbrauchsarme Fahren für das Gesamtunternehmen entsteht, als Prämien an das Fahrpersonal ausgeschüttet wird. Eine ebenfalls wirksame Lösung, die arbeitsrechtliche Konflikte vermeidet, ist eine Verwendung des Geldes für wohltätige Zwecke. Ein Praxispartner erreichte durch Datenerhebung, -auswertung und Teamwettbewerb mehr als 5 % Verbrauchseinsparung bei Kosten von nur ca. 500 Euro pro Jahr und Fahrzeug. Es handelte 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. Zusätzlich wurde eine jährliche halbtägige Zusatzschulung eingeführt.

Der Einfluss des individuellen Fahrverhaltens wird trotz neuer Entwicklungen in Richtung automatisiertem Fahren in absehbarer Zeit nicht abnehmen. Vielmehr wurde im Projekt mehrfach geäußert, dass dieser Einfluss durch Hybrid- und batterieelektrischen Antrieb sogar steigt. Eine monetäre Unterstützung scheint nicht erforderlich, denn über Bewusstseins-schaffung, sinnvolle technische Unterstützung und gut kommunizierte Anreizsysteme kann erreicht werden, dass das Fahrpersonal aktiv mitwirkt.

Systematischer Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung



Auch im schienengebundenen ÖPNV 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 beim E-Antrieb das sparsamste Fahrverhalten, wenn das Fahrzeug voll beschleunigt und dann bis zur nächsten Haltestelle ausrollt. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass auch aktive Bremsvorgänge nicht per se unvorteilhaft sind. Hierbei rekuperierte Bremsenergie kann sinnvoll verwendet werden: Zum einen im Fahrzeug zum intervallhaften Betrieb von Nebenverbrauchern wie der Heizung. Zum anderen befinden sich i. d. R. im selben Netzabschnitt andere Fahrzeuge, die evtl. zeitgleich anfahren und dazu Energie aus der Oberleitung abnehmen. Gleichzeitig schwankt vermehrt auch die Einspeisung ins Netz. Zudem ändert sich das Fahrzeuggewicht abhängig von der Anzahl der Fahrgäste, was sich ebenfalls auf das Beschleunigungs- und Bremsverhalten auswirkt. Nicht zuletzt sollen jederzeit Komfort der Fahrgäste und Einhaltung des Fahrplans gewährleistet sein.

Ein intelligentes Datenverarbeitungs- und Fahrassistenzsystem würde eine Optimierung auf all diese Ansprüche hin vornehmen und dem Fahrpersonal jeweils die optimale Geschwindigkeit empfehlen. Es könnte Insellösungen wie fahrplanabhängige Signalschaltung, Vorgabe des »Fahrens auf Bahnabschnitt« und »Abschaltzeichen« ersetzen. Allerdings fehlen dazu in den oft Jahrzehnte alten Fahrzeugen Datenschnittstellen und Messdaten. Zum anderen wären auch bei Verfügbarkeit aller Daten eine umfangreiche, hochaufgelöste Verarbeitung der verschiedenen Messdaten aus dem Betrieb sowie eine Priorisierung der teils widerstrebenden Ansprüche an das System erforderlich. Bei den Praxispartnern sind solche Systeme weder bei der U-Bahn noch bei der Straßenbahn in Gebrauch. Erkenntnisse aus der Anwendung ähnlicher Systeme in anderen Bahnnetzen zeigen aber, dass eine Verbrauchsreduktion um ein Zehntel realistisch ist – bei gleichzeitiger Reduktion des Betriebsstoffverbrauchs, des Verschleißes durch Bremsvorgänge sowie von Unfallschäden. Zusätzlich kann ein solches System auch Geschwindigkeit, Einsatz von Nebenverbrauchern, Auslastung und den umgebenden Straßenverkehr einbeziehen. Die Einbindung der Fahrzeuge in ein solches Erfassungssystem für Energiedaten ist mit einmaligen Investitionskosten von lediglich 500 bis 1.000 Euro pro Fahrzeug verbunden.

Sowohl Inselsysteme als auch umfassende Ansätze zur systematischen Datenerhebung und -verarbeitung im Rahmen eines Energiemanagements können den Verbrauch signifikant reduzieren. Mit den am Markt verfügbaren Systemen kann eine Amortisation erreicht werden. Momentan mangelt es jedoch meist schon an der Datenerfassung. Selbst Neufahrzeuge können Energieparameter teils nicht zeitlich aufgelöst liefern, weil dies in Ausschreibungen nicht immer gefordert wird. Nachrüstungen sind unmöglich oder mit hohen Kosten verbunden. Widersprüchlich erscheint, dass das Angebot an Datenerfassungssystemen trotz der vorhandenen Nachfrage der Verkehrsbetriebe offenbar sehr begrenzt ist. Die Förderung im Rahmen von Pilotprojekten und Verankerung in Ausschreibungen könnten vorhandenen Systemen helfen, sich am Markt zu etablieren und weiterzuentwickeln.

4. Weitere Handlungsfelder

4.1. Bus: Antriebstechnik und Fahrwiderstände

Beim Dieselmotor beginnt das Thema Energieeffizienz mit der Wahl der für den Einsatzort *optimierten Leistungsauslegung und des geeigneten Getriebes*. Die am Projekt teilnehmenden Praxispartner berichteten übereinstimmend von geringeren Verbrauchern beim Einsatz von Motoren mit größerem Hubraum aufgrund des Fahrens in einem durchschnittlich günstigeren Drehzahlbereich. 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 ÖPNV auszahlen, innerstädtisch sind die Reifen sehr hohen Beanspruchungen ausgesetzt und das konkurrierende Interesse an der Erhöhung der Nutzungsdauer überwiegt. 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 nur eine untergeordnete Rolle.

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

nicht gegebener Zukunftsperspektiven außer Betrieb genommen. Da mit Wasserstoff größere Reichweiten grundsätzlich mit geringeren Zusatzkosten und -gewichten realisiert werden können, könnte er als Energieträger in bestimmten Anwendungsnischen mittelfristig durchaus eine Rolle spielen. Auch bei der Wasserstofftechnologie wird jedoch neben den (gegenüber dem batterieelektrischen Antrieb noch höheren) Kosten ein Angebotsdefizit festgestellt, v.a. seitens der einheimischen Anbieter.¹¹ Immerhin haben die Verkehrsbetriebe in Köln und Wuppertal im Jahr 2018 eine größere Ausschreibung von 40 Fahrzeugen¹² sowie mehrere kleinere Ausschreibungen durchgeführt. 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 bei einem Dauerbetrieb eher 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 *Oberleitungsbuss* 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 Dieselbus 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 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.

¹¹ Wetzel 2018

¹² Wagner 2018

Ein Nachteil von Oberleitungsbussen sowie 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.

EXKURS: NO_x-MINDERUNG

In vielen Städten werden Grenzwerte für Stickstoffoxide (NO_x) besonders an viel befahrenen Straßen überschritten. Insbesondere für Kinder, ältere und kranke Menschen stellt dies eine Gesundheitsgefahr dar. Diese Städte sind inzwischen unter massiven Handlungsdruck gestellt. Es ist wahrscheinlich, dass zukünftig aufgrund dieser Überschreitungen in weiteren Städten Fahrverbote für Dieselfahrzeuge verhängt werden. Aus diesen Gründen steigt aktuell der Handlungsdruck, die Emissionen auch der Busse weiter zu senken. Dies betrifft insbesondere den vorhandenen Busbestand, da moderne Euro VI-Busse im realen Einsatz sehr niedrige Emissionen verursachen. Mit 0,2 bis 0,4 Gramm NO_x pro Kilometer liegen sie unter den mittleren Emissionen von Euro 6-Diesel-Pkw von rund 0,5 g / km.

Die älteren Busse können mit einer Abgasnachbehandlung zur Verringerung der NO_x-Emissionen nachgerüstet werden. Gängig sind Systeme zur Selektiven Katalytischen Reduktion (SCR). Die Kosten für die Nachrüstung liegen etwa bei 20 Tsd. Euro. Aktuell (Stand 2018) wird die Nachrüstung durch das BMVI im Rahmen des »Sofortprogramm Saubere Luft 2017 bis 2020« gefördert. Bei dieser Maßnahme handelt es sich jedoch nicht um eine Energieeffizienzmaßnahme, der Dieselverbrauch steigt durch die Nachrüstung i. d. R. sogar leicht an. Die Umweltkosten, die sich durch eine Nachrüstung einsparen lassen, sind besonders bei Euro III- und Euro IV-Bussen erheblich. Bei einer weiteren Laufleistung von 200.000 km nach der Umrüstung lassen sich die Umweltkosten um rund 19 (Euro V) bis 23. Tsd. Euro (Euro IV) senken.

Bei der Umstellung auf E-Busse muss berücksichtigt werden, dass mit einem Verbrennungsprozess betriebene Zusatzheizungen zu zusätzlichen NO_x-Emissionen führen. Diese Emissionen werden in bestehenden emissionslimitierenden Gesetzesvorschriften nicht angerechnet. Sofern Ausschreibungen solche Zusatzheizungen erlauben, sollten dort Obergrenzen für NO_x-Emissionen festgelegt werden.

4.2. Straßenbahn und U-Bahn: Antriebstechnik und Fahrwiderstände

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. 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. Auch bei **radial einstellbaren Fahrwerken** herrschte weitgehend 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 nicht möglich.

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

Während **LED-Leuchtmittel** in vielen Anwendungen mittlerweile Standard sind, nutzen selbst Neufahrzeuge oft noch Leuchtstoffröhren im Innenraum und Glühlampen als Scheinwerfer. Sowohl im Bus- als auch im Schienenbereich machen Beleuchtung und Scheinwerfer weniger als 5 % des Energiebedarfs aus. Dieser Bedarf kann durch Einsatz von LED um etwa ein Viertel bis ein Drittel gesenkt werden. Die Kosten reichen von ca. 1 Tsd. Euro Aufpreis für LED-Scheinwerfer bei einem neuwertigen Bus bis zu 15 Tsd. Euro Kosten zur Nachrüstung eines aus sechs Wagen zusammengesetzten U-Bahn-Zugs. Damit ist Wirtschaftlichkeit in den meisten Fällen nicht gegeben – es sei denn, die Leuchtmittel haben eine erheblich höhere Lebensdauer. 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 verbrauchärmere 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 – sofern angeboten – 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 ÖPNV 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 Elektrifizierung der Nebenaggregate beim Dieselbus teils skeptisch, beim E-Bus ist sie jedoch ein Muss.

Aus Energieeffizienzsicht wünschenswert wäre bei den (teil-) elektrischen 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 Betrieb der Nebenverbraucher 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.

4.4. Straßenbahn und U-Bahn: Stromversorgungsinfrastruktur

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 Verbraucher 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 Stromspeicher** 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.¹³

¹³ 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

4.5. Bus, Straßenbahn, U-Bahn: Sonstige Infrastruktur und Betrieb

Jenseits der Stromversorgungsinfrastruktur finden sich Potenziale für Energieeinsparmaßnahmen etwa bei der *Weichenheizung*. Hier wurden erste Pilotprojekte zur Nutzung von *Fernwärme oder bodennahe 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 4.2) sowie rekuperationsfähige Fahrtreppen. Jedoch liegen auch hier aus einer ersten Praxisanwendung in Bern noch keine Ergebnisse vor.¹⁴

Die in Kapitel 3.4 beschriebenen Maßnahmen zur Busbeschleunigung stellen Vorstufen zu einem sogenannten *Bus Rapid Transit (BRT)-System* dar. Unter dem Begriff werden verschiedene Konzepte gefasst, die vorsehen, dass bei Fahrzeugen, Verkehrswegen und Haltestellen im städtischen Busverkehr Elemente von Schienenverkehrsmitteln übernommen werden, um diesen störungsärmer und schneller zu gestalten. In Expertengesprächen im Rahmen des Projekts wurde teils der Standpunkt vertreten, dass relevante Verbrauchsvorteile erst in einem BRT-System erreicht werden. Insbesondere bezieht man sich dabei auf das Merkmal von BRT-Systemen, dass diese meist vollständig von anderen Verkehrsmitteln 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 die Interessenskonflikte gemeinsam mit der urbanen Bevölkerung und den individuellen Mobilitätsansprüchen. Im städtischen Bereich steigen nicht nur die Fahrgastzahlen im ÖPNV. Auch für Radfahrer und Fußgänger muss mehr Platz im Straßenraum zur Verfügung stehen. Diese Verkehrsträger sollen ebenfalls durch attraktive Ampelschaltungen gestärkt werden. Daher geht es vielerorts zunächst darum, den bestehenden Standard zu halten und z.B. nicht Busspuren oder getrennte Gleiskörper von Straßenbahnen zugunsten von Radspuren aufgeben zu müssen. Es sollte auch hinterfragt werden, inwieweit angesichts der mittlerweile im urbanen Raum vielerorts ganzjährig angespannten Verkehrslage eine zeitliche Begrenzung von Busspuren noch den verkehrlichen Anforderungen entspricht. Zudem fehlt oft das Personal für die Durchsetzung des Ordnungsrechts – Busspuren einzurichten reicht nicht, sie müssen auch von ordnungswidrig fahrenden und haltenden Kfz freigehalten werden. Zur Auflösung der Konfliktlagen um die Nutzung des Straßenraums führt also letztendlich nichts an einer *Reduktion des platzintensivsten Verkehrsträgers MIV* vorbei.

¹⁴ Meyer 2016

Ähnliche Konfliktlagen ergeben sich beim *Ersatz von Bus- durch Schienenverkehrslinien*, der aufgrund der höheren Effizienz des elektrischen Antriebs und der höheren Beförderungskapazität ebenfalls als wirkmächtige Energieeffizienzmaßnahme einzuschätzen ist. Bei der Anlage von Schienenstrecken gibt es weitere Planungsgrundsätze, die die Energieeffizienz im Betrieb erhöhen: Um die Anzahl der Anfahr- und Bremsvorgänge zu verringern und dem energieeffizientesten Geschwindigkeitsprofil näher zu kommen, sind *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 beim Anfahren die potenzielle Energie eines Gefälles zu nutzen und den nötigen Bremswiderstand durch eine Steigung zu reduzieren. Letztendlich stellt auch die Verringerung von Anfahrvorgängen durch *vergrößerte Haltestellenabstände* 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 v.a. in bestehenden Siedlungsgebieten, aber auch in neuen Stadtvierteln.

Mehr Energieeffizienz lässt sich weiterhin durch eine verbesserte Differenzierung der Fahrzeuggrößen erreichen. Einerseits sind darunter *erhöhte Fahrzeuggrößen* zu fassen, beispielsweise Doppelgelenkbusse. 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 3.4 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 Anfälligkeit verständlich, jedoch würde der Einsatz von Zügen aus mehreren bedarfsweise kuppelbaren Wagen mehr Flexibilität und damit mehr Effizienz erlauben.

Entscheidend für die Energieeffizienz im ÖPNV-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. Der in Kapitel 3.4 beschriebene systematische Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung bei der U- und Straßenbahn ist ein umfassendes 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 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.

5. Praktische Umsetzung und Förderungen

5.1. Offenheit für technologische Entwicklungen

Öffentliche Dienstleistungsaufträge für die Erbringung von Verkehrsleistungen werden häufig unter Ausschöpfung der gesetzlichen Regelhöchstauern aus der VO (EG) Nr. 1370/2007 für eine Dauer von 10 Jahren (Bus) bzw. 22,5 Jahren (Schienenverkehrsmittel) vergeben. Gründe für diese Festlegungen sind zum einen die damit einhergehende Planungssicherheit für die beauftragten Verkehrsunternehmen und zum anderen der Wunsch der Auftraggeber, die Zahl der Vergaben aufgrund des damit verbundenen Aufwandes zu verringern. Auch eigenwirtschaftliche Verkehre werden in vielen Fällen für die im Personenbeförderungsgesetz (PBefG) vorgesehene Höchstlaufzeit beantragt. Die langen Vertrags- bzw. Genehmigungslaufzeiten bergen die Gefahr, dass die Nutzung herkömmlicher Technologien jeweils für viele Jahre oder sogar Jahrzehnte festgeschrieben wird. Die ständige Entwicklung der Fahrzeug- und Infrastrukturtechnologie und die tiefgreifenden Veränderungen im Betrieb bleiben so unberücksichtigt.

Eine der zentralen Herausforderungen an die Vergabepaxis besteht daher darin, entweder öffentliche Dienstleistungsaufträge für kürzere Intervalle zu vergeben oder diese »aufwärtskompatibel« zu gestalten, so dass sie für technologische Entwicklungen offen sind. Hierfür bieten sich grundsätzlich mehrere Optionen an:

Umbestellung

Ähnlich wie bei der Umbestellung einer Fahrleistung ist es denkbar, im öffentlichen Dienstleistungsauftrag die Möglichkeit vorzusehen, dass der Auftraggeber während der Laufzeit des öffentlichen Dienstleistungsauftrages den Einsatz einer bestimmten (Antriebs-) Technologie verlangen kann. Im Gegenzug hat der Auftraggeber die hiermit verbundenen Mehrkosten zu tragen.

Revisionsklausel

Sogenannte Revisionsklauseln sind insbesondere bei kommunalen Direktvergaben möglich und üblich. Mit diesen haben beide Vertragspartner zu bestimmten Zeitpunkten die Möglichkeit, eine Anpassung des öffentlichen Dienstleistungsauftrags und seiner Vergütungsregeln zu verlangen. Hiermit kann dem vom Auftraggeber gewünschten Einsatz moderner Technologien Rechnung getragen werden.

Kündigungsmöglichkeit

Denkbar wäre auch, im öffentlichen Dienstleistungsauftrag eine Kündigungsmöglichkeit für den Fall vorzusehen, dass der Auftraggeber aufgrund zwischenzeitlicher Technologiesprünge eine andere (höherwertige) als die bisher vereinbarte Leistung

beauftragen will. Dies wird jedoch für das Verkehrsunternehmen aufgrund der damit einhergehenden Kalkulations- und Planungsunsicherheit regelmäßig keine akzeptable Option sein.

Jede dieser drei Möglichkeiten muss jeweils sorgfältig hinsichtlich ihrer (vergabe-) rechtlichen Zulässigkeit geprüft und bewertet werden, da eine Veränderung des bestehenden Vertrages die Pflicht zur Neuvergabe des öffentlichen Dienstleistungsauftrags zur Folge haben kann.

5.2. Energieeffizianzorderungen

5.2.1. Schienengebundener ÖPNV (Straßenbahn, U-Bahn)

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

5.2.2. Straßengebundener ÖPNV

Hinsichtlich des straßengebundenen ÖPNV ist zwischen eigenwirtschaftlich erbrachten und vom öffentlichen Aufgabenträger bestellten Verkehren zu unterscheiden.

Eigenwirtschaftliche Verkehre

Diese Verkehre werden vom Verkehrsunternehmen allein durch erzielte Beförderungserlöse, Ausgleichsleistungen auf der Grundlage allgemeiner Vorschriften nach Artikel 3 Absätze 2 und 3 der Verordnung (EG) Nr. 1370/2007 und sonstige Unternehmenserträge im handelsrechtlichen Sinne finanziert. Soweit der Aufgabenträger sicherstellen will, dass das konzessionierte Verkehrsunternehmen Energieeffizienzinvestitionen tätigt, die sich betriebswirtschaftlich nicht amortisieren, so ist dies nur möglich, indem der Aufgabenträger entsprechende Anforderungen in seinen Nahverkehrsplan aufnimmt. Dies kann allerdings zur Folge haben, dass sich kein eigenwirtschaftlicher Genehmigungsantragsteller 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.

Bestellte Verkehre

In der bisherigen Ausschreibungs- und Vergabepaxis von ÖPNV-Dienstleistungen spielen Energieeffizienzkriterien bislang eine marginale Rolle. Insbesondere aufgrund von Klimazielverpflichtungen sowie der zunehmenden Verbreitung und Marktreife von E-Bussen ist allerdings zu erwarten, dass Energieeffizianzorderungen zukünftig eine immer größere Rolle bei der Vergabe von ÖPNV-Dienstleistungen spielen werden.

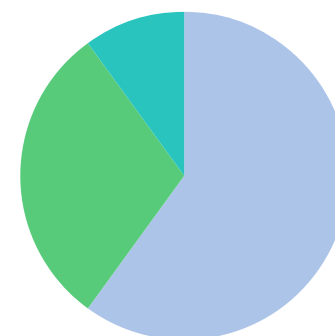
In der Gruppe bestellter Verkehre ist zwischen verschiedenen Formen der Beauftragung zu unterscheiden. Gemeinsam ist allen nachfolgend beschriebenen Beauftragungs- oder Vergabearten, dass der Auftraggeber in der Vorabkennzeichnung gem. § 8a Abs. 2 PBefG beschreiben muss, welche Mindestanforderungen im 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 geringwertigen Standards unterschritten wird.

Kommunale Direktvergaben

Der überwiegende Teil der Busverkehrsleistungen wird auf Grundlage kommunaler Direktvergaben oder Betrauungen erbracht. Hier sind die Energieeffizianzorderungen im öDA bzw. der Betrauung als gemeinwirtschaftliche Pflichten und bei den Ausgleichsparametern abzubilden, um durch die Anforderungen ausgelöste Mehrkosten ausgleichen zu können. Fahrzeugbeschaffungen kommunaler Verkehrsunternehmen unterliegen dem Sektorenvergaberecht und sind nach den Regeln der Sektorenverordnung zu vergeben.

Verhältnis Straßengebundener ÖPNV kommunal/wettbewerblich/eigenwirtschaftlich

Quelle: KCW GmbH



- ■ Kommunale Direktvergaben
- ■ Wettbewerbliche Vergaben
- ■ eigenwirtschaftliche Verkehre

Wettbewerbliche Direktvergaben

Wettbewerbliche Vergaben von Dienstleistungsaufträgen im ÖPNV 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 E-Bussen erbracht werden soll. Diese Herausforderungen sollen nachfolgend kurz genannt werden.

Im Rahmen der Vorbereitung des Vergabeverfahrens muss der Auftraggeber zunächst berücksichtigen, dass der Zeitbedarf für die Vorbereitung als auch die Durchführung der Vergabe ansteigen wird. Vor Beginn der Vergabe ist im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zu untersuchen, ob und welche Linien sich für den Einsatz von E-Bussen eignen und welches Konzept (Depotlader oder Gelegenheitslader) zum Einsatz kommen kann. Auch der Zeitbedarf für die Durchführung der Vergabe und die Rüstzeit für den Ausschreibungsgewinner wird höher als bei einer Vergabe mit Fahrzeugen mit herkömmlichem Antrieb liegen. Denn zum einen ist zu berücksichtigen, dass die Bieter bis auf weiteres mehr Zeit für die Angebotserstellung selbst benötigen werden, zum anderen sind längere Lieferzeiten für E-Busse und weitere Infrastruktur zu beachten.

Anschließend muss der Aufgabenträger entscheiden, ob der Einsatz von E-Bussen oder anderer Energieeffizienzmaßnahmen zwingend vorgegeben oder lediglich im Rahmen der Wertung der Angebote beanreizt werden soll.

Energieeffizienz im Vergabeverfahren

Unterschiedliche Formen der Berücksichtigung

- zwingende oder fakultative Vorgabe einer Energieeffizienzmassnahme?
- Möglichkeiten der Berücksichtigung fakultativer Energieeffizienzmassnahmen bei Wertung der Angebote
 - Rechnerischer Abschlag z.B. durch Gewährung eines Wertungsbonus i.H. (nicht gefördert) Mehrkosten
 - Berücksichtigung der Umweltkosten der Angebote bei der Wertung
 - Budgetvergabe mit alleinigen Wertungskriterien »CO₂-Emissionen«

Entscheidet sich der Aufgabenträger für den verpflichtenden Einsatz von E-Bussen für die Leistung oder einen definierten Teil davon, haben die Bieter entsprechende 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 Angebotspreis gewährt, der sich an den voraussichtlichen Mehrkosten des Bieters für den Einsatz einer bestimmten Technik bemisst.*
- *Die durch ein Angebot verursachten oder eingesparten Umweltkosten können neben dem Angebotspreis Eingang in die Wertungsentscheidung finden.*
- *Der Aufgabenträger macht eine so genannte Budgetvergabe, 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 bezuschlagte Energieeffizienzniveau tatsächlich erfüllt wird.

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

Unterhalb bestimmter Schwellenwerte (300.000 km Fahrleistung oder 1.000.000 Euro Auftragswert pro Jahr) können öffentliche Dienstleistungsaufträge in Form von Dienstleistungskonzessionen direkt an ein Verkehrsunternehmen vergeben werden. Die genannten Schwellenwerte verdoppeln sich, wenn das Verkehrsunternehmen über mindestens 23 Fahrzeuge verfügt. Bei der Bagatell-Direktvergabe 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 Energieeffizianz Anforderungen im öffentlichen Dienstleistungsauftrag als gemeinwirtschaftliche Verpflichtungen abzubilden.

Wie bei kommunalen Direktvergaben unterliegen Fahrzeugbeschaffungen durch das direkt beauftragte Verkehrsunternehmen zudem dem Sektorenvergaberecht und sind nach den Regeln der Sektorenverordnung zu vergeben.

5.3. Energieeffizienz in der Förderpraxis

Die Förderpraxis ist durch eine Vielzahl von Möglichkeiten auf EU-, Bundes- und Landesebene gekennzeichnet. Für eine Recherche bietet sich das Portal www.foerderdatenbank.de an. Ob und inwieweit die einzelnen Fördermöglichkeiten nebeneinander stehen oder ergänzend zueinander in Anspruch genommen werden können, ist im Einzelfall zu ermitteln. Unterstützung bei der Einordnung kommunaler Vorhaben zu Fördermöglichkeiten des Bundes, die Bezug zu schadstoffreduzierenden Maßnahmen im kommunalen Raum haben, bietet darüber hinaus die beim BMVI angesiedelte »Lotsenstelle Fonds Nachhaltige Mobilität«.

Einen Schwerpunkt der Diskussion bildet derzeit (Stand 2018) die Förderung batterieelektrischer Busse, deren Anschaffungsmehrkosten mit unterschiedlichen Prozentsätzen gefördert wird. 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. Dies bedeutet für Verkehrsunternehmen einen 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.

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. Euro erhöht und danach jährlich dynamisiert für Neu- und Ausbautvorhaben 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.

5.3.1. Bestehende Förderprogramme

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 wer-

den. 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.

Daneben wird Unternehmen derzeit (Stand 2018) durch das BMVI eine Förderung für 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 gewährt. Pro Antrag sollen in der Regel nicht weniger als fünf Fahrzeuge beschafft werden.

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 Ladeinfrastrukturerrichtung sein.

Für eine Recherche der vor Ort bestehenden Fördermöglichkeiten bietet sich das Internetportal »Förderdatenbank«, <http://www.foerderdatenbank.de/> an.

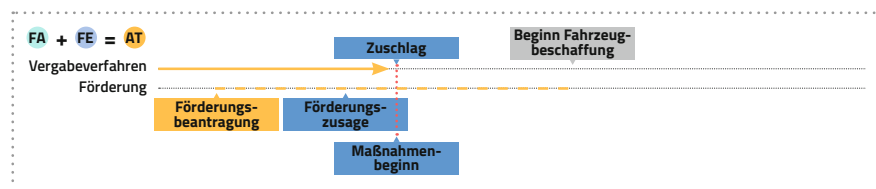
5.3.2. Verzahnung zwischen Investitionsförderung und wettbewerblicher Vergabe öffentlicher Dienstleistungsaufträge

Eine besondere Herausforderung stellt die Verzahnung der Förderung von Energieeffizienzinvestitionen der Verkehrsunternehmen mit der wettbewerblichen Vergabe öffentlicher Dienstleistungsaufträge dar. Für den Aufgabenträger als Vergabestelle stellen sich hierbei unter anderem folgende Fragen:

- *Wie stellt der Aufgabenträger als Besteller sicher, dass bestehende Fördermöglichkeiten bestmöglich genutzt werden?*
- *Wie können Vergabeverfahren und Förderbeantragung und -bewilligung zeitlich harmonisiert werden?*
- *Wie wird ein förderschädlicher vorzeitiger Maßnahmenbeginn vermieden?*

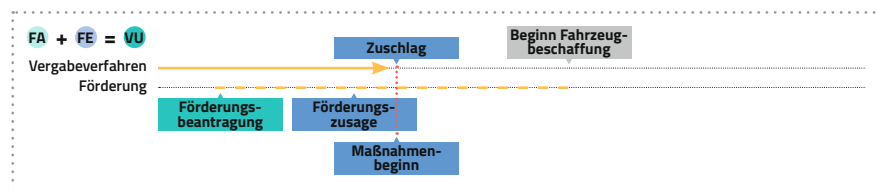
Eine befriedigende Lösung für diese Fragen existiert in der Praxis noch nicht. Grundsätzlich bestehen folgende Lösungsansätze:

Modell 1: Förderantragsteller und Förderempfänger ist der vergebende Aufgabenträger.



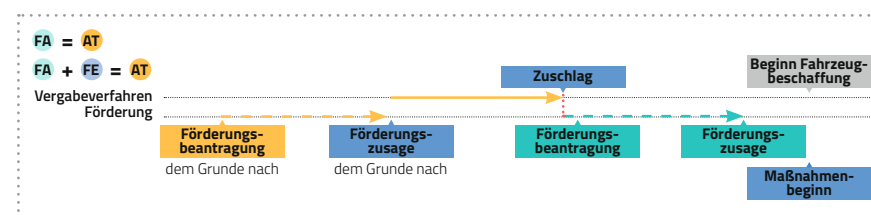
Die oben beschriebenen Herausforderungen lassen sich gut bewältigen, wenn die Förderung vom Aufgabenträger beantragt und diesem gewährt wird. Dies sehen die Förderbedingungen derzeit noch nicht regelmäßig vor. In diesem Fall ist es erforderlich, dass der Aufgabenträger die Förderzusage vor Beginn der Maßnahme erhält, also vor Zuschlagserteilung im Vergabeverfahren. Hierdurch wird sichergestellt, dass eine mögliche Förderung nicht an einem rechtlich grundsätzlich unzulässigen vorzeitigen Maßnahmenbeginn scheitert. Außerdem hat der Aufgabenträger so die Sicherheit, dass ihm die zur Maßnahmenfinanzierung erforderlichen Fördermittel zur Verfügung stehen werden.

Modell 2: Förderantragsteller und Förderempfänger ist das Verkehrsunternehmen (Förderzusage während Angebotsfrist).



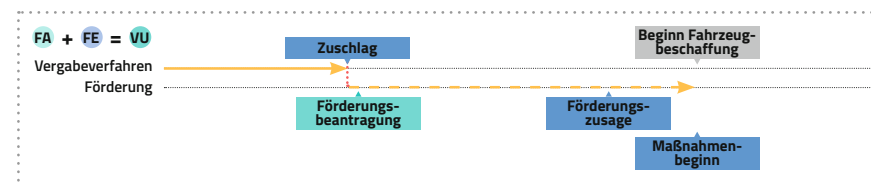
Dies setzt voraus, dass das Verkehrsunternehmen während einer ausreichend lang bemessenen Angebotszeit die Möglichkeit hat, einen Förderantrag zu stellen. Ihm könnte in der Folge eine Förderzusage erteilt werden, die es nicht nutzen müsste, wenn es den Zuschlag nicht erhält (keine Verpflichtung zur Inanspruchnahme der Förderung). Alternativ könnte die Förderzusage unter der Bedingung erfolgen, dass das Verkehrsunternehmen den Zuschlag im Vergabeverfahren erhalten wird. Diese Möglichkeit muss hierfür allerdings in die Förderrichtlinie aufgenommen worden sein. In jedem Fall würde dieses Modell eine Angebotsfrist von mindestens drei bis sechs Monaten erfordern, die Aufgabenträgern derzeit häufig nicht zur Verfügung steht.

Modell 3: Förderantragsteller und Förderempfänger ist das Verkehrsunternehmen (Förderzusage vor Vergabeverfahren).



In diesem Modell sichert der Fördergeber im Rahmen eines Pilot- oder Demonstrationsvorhabens gegenüber dem vergebenden Aufgabenträger verbindlich zu, dass das Verkehrsunternehmen – sofern es die Förderbedingungen einhält – eine in der Höhe bereits feststehende oder für den Bieter ermittelbare Förderung für die Fahrzeugbeschaffung erhalten wird. Diese darf nicht vor der Zuschlagserteilung und vor Beantragung der Förderung erfolgen. Jeder Bieter kann so mit der Förderung kalkulieren und diese bei der Ermittlung seines Angebotspreises berücksichtigen.

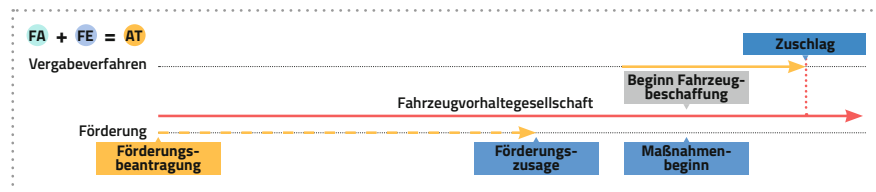
Modell 4: Förderantragsteller und -empfänger ist das bezuschlagte Verkehrsunternehmen mit einer Verpflichtung, nach Zuschlagserteilung einen Antrag für die Förderung der Fahrzeugbeschaffung zu stellen.



In diesem Modell kalkuliert das Verkehrsunternehmen seinen Angebotspreis ohne eine Förderung. Es wird jedoch durch die Vergabeunterlagen verpflichtet, für den Fall der Zuschlagerlangung einen Förderantrag für die Fahrzeugbeschaffung zu stellen und etwaige Fördermittel an den Auftraggeber weiterzureichen, ggf. unter Abzug eines prozentualen Anteils, der als zusätzlicher Anreiz dient. Auch hier dürfen die Fahrzeuge nicht vor Bewilligung der Förderung beschafft werden (Verbot des vorzeitigen Maßnahmenbeginns, siehe oben). Grundsätzlich wird so das Verbot eines vorzeitigen Maßnahmenbeginns beachtet, da die geförderte Fahrzeugbeschaffung erst nach Förderbewilligung erfolgt. Dagegen könnte sprechen, dass das Verkehrsunternehmen sich bereits durch sein Angebot und den erlangten Zuschlag vertraglich verpflichtet hat, Elektrofahrzeuge zu beschaffen. Daher sollte – wenn der Auftraggeber dieses Modell favorisiert – vor Beginn der Ausschreibung mit dem potenziellen Fördergeber geklärt

sein, dass dieses Vorgehen aus dessen Sicht nicht mit dem Verbot eines vorzeitigen Maßnahmenbeginns kollidiert.

Modell 5: Aufgabenträger gründet eine Fahrzeugvorhaltesgesellschaft.



In diesem Modell gründet der Aufgabenträger eine Fahrzeugvorhaltesgesellschaft, die als Unternehmen selbst Fahrzeugförderung beantragen kann und nach erlangter Förderung Fahrzeuge beschafft. Diese können dann dem Ausschreibungsgewinner zur Erbringung der Dienstleistung zur Verfügung gestellt werden. Auf diesem Weg stellt der Aufgabenträger sicher, dass er bestehende Fördermöglichkeiten abschöpfen kann und er entlastet die Unternehmen von der aufwendigen Förderbeantragung. Sorgfältig zwischen Eigentümer (Fahrzeugvorhaltesgesellschaft) und Nutzer (Verkehrsunternehmen) zu klären sind allerdings die Aufgaben und Schnittstellen im Hinblick auf Wartung und Reparatur der Fahrzeuge.

6. Fazit und Handlungsbedarf

Herausforderungen für den ÖPNV

Die Akteure im ÖPNV – Verkehrsunternehmen, Aufgabenträger, politische Entscheidungsträger – haben vielfältige Herausforderungen vor Augen: In urbanen Gebieten sind die Netze an vielen Stellen an ihrer Kapazitätsgrenze und die Fahrgastzahlen steigen. Bei knapper öffentlicher Finanzierung des ÖPNV sollen auch in nachfrage-schwachen Bedienungsgebieten Daseinsvorsorge, Servicequalität und Barrierefreiheit gewährleistet sein. Gleichzeitig soll der Kostendeckungsgrad nicht sinken.

Der ÖPNV soll seinen Beitrag zu Klimaschutz und Luftqualität einerseits dadurch leisten, dass er Pkw-Nutzern eine attraktive Alternative bietet und so Anreize zum Umstieg schafft. Schließlich sind die spezifischen Emissionen von Treibhausgasen sowie von Luftschadstoffen wie Stickoxiden und Feinstaub im öffentlichen Verkehr deutlich geringer. Andererseits soll aber auch innerhalb des Systems ÖPNV der nötige Beitrag zur Emissionsreduktion geleistet werden, denn perspektivisch muss hier ebenso Emissionsfreiheit das Ziel sein. Zudem stellt der Umweltvorteil des ÖPNV für

Fahrgäste einen wichtigen Nutzungsgrund dar und sollte daher auch aus Gründen der Kundenbindung ständig ausgebaut werden. Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz sind für die oben genannten Akteure ein wichtiger Hebel zur Erreichung dieses Ziels und können zum Teil gleichzeitig zur Kostensenkung beitragen.

In diesem Fazitkapitel wird zusammenfassend dargestellt, wie die untersuchten Maßnahmen hinsichtlich

- ihres Energieeinsparpotenzials,
- ihrer technischen Reife
- der nötigen Transformation im ÖPNV-Unternehmen
- der Anwendbarkeit bei Neuanschaffungen oder auch im Bestand,
- möglicher Synergien oder Interessenskonflikten mit der Erreichung anderer Ziele und
- ihrer Wirtschaftlichkeit

einzuordnen sind. In den **türkis** dargestellten Abschnitten werden jeweils passende Handlungsempfehlungen abhängig von diesen Charakteristika der jeweiligen Maßnahmen abgeleitet. Auf diese Weise möchte der vorliegende Leitfaden einen Beitrag zur Unterstützung der Umsetzung solcher Maßnahmen im ÖPNV leisten.

a) Energieeffizienzmaßnahmen bieten unterschiedlich hohe Einsparpotenziale

Die Ansätze, mit denen sich die Energieeffizienz des Systems ÖPNV verbessern lässt, sind sehr unterschiedlich: Sie reichen von technischen Details bis hin zu umfassenden betrieblichen Umstellungen. Es konnten Maßnahmen mit massiven Einsparpotenzialen identifiziert werden, mit denen 10 % und mehr des Endenergiebedarfs in der jeweiligen Sparte (Bus, Straßenbahn, U-Bahn) eines Verkehrsunternehmens eingespart werden können. Ein typisches Beispiel ist die Optimierung der Fahrstromverteilung.

Umgekehrt gibt es Maßnahmen wie den Einbau von Wärmetauschern zur Nutzung von Abwärme aus U-Bahn-Tunneln, die bisher nur geringe Einsparungen erbringen.

Vielversprechende Maßnahmen mit bisher noch unzureichendem Einsparpotenzial sollten über gezielte Forschungs- und Entwicklungsförderung verbessert und in die breite Anwendung gebracht werden.

b) Maßnahmen sind unterschiedlich weit entwickelt

Manche Ansätze stehen neu auf der Agenda: So etwa der vorgeschlagene systematische Ansatz zur Datenerhebung und -verarbeitung, der erst durch moderne Datenverarbei-

tungstechnologien umfassende Wirkung entfalten kann, oder die stationäre Energiespeicher, die bei einer zukünftig voraussichtlich stärker fluktuierenden Stromspeicherung wirtschaftlich interessanter sein dürfte.

Andere Fälle betreffen geläufige und in der Vergangenheit praktizierte Ansätze, z. B. Buszüge.

Für die Buszüge, die in der Vergangenheit bereits über eine allgemeine Straßenzulassung verfügten, sollte geprüft werden, ob heute weiterhin Hinderungsgründe für deren Zulassung bestehen. Falls dies nicht der Fall ist, sollte ein Regelbetrieb schnell und unbürokratisch wieder ermöglicht werden.

c) Der mit den Maßnahmen verbundene Wandel ist teils sehr tiefgreifend

Aktuell ist ein deutlicher Förderschwerpunkt auf der Anschaffung batterieelektrischer Fahrzeuge festzustellen. Die dazu abrufbaren Bundes- und Landesmittel sind im Zusammenhang mit dem Skandal um manipulierte Schadstoffmessungen bei Pkw und aufgrund der Luftqualitätsprobleme in vielen deutschen Städten deutlich aufgestockt worden. Angesichts der derzeitigen Fahrzeugpreise (Stand 2018) ermöglichen sie jedoch nur in geringem Umfang eine Flottenumstellung. Zudem erfordert die Transformation hin zum emissionsfreien Busverkehr von den lokalen Aufgabenträgern und Verkehrsunternehmen, dass ein umfassendes Gesamtkonzept eines emissionsfreien ÖPNV der Zukunft entwickelt wird. Dies ist in den bisherigen Förderinstrumenten nicht ausreichend berücksichtigt, ebenso wie der Infrastrukturaufbau sowie die Belange kleinerer Verkehrsunternehmen und Aufgabenträger.

Die ÖPNV-Unternehmen müssen im Hinblick auf personelle Ausstattung, finanzielle Ressourcen und Hintergrundwissen in die Lage versetzt werden, die nötige Gesamtkonzeption zur Umstellung auf elektromobilen Busverkehr zu erstellen (s.u., zentrale Handlungsempfehlung 1).

Die umfassende Vision eines emissionsfreien ÖPNV muss auch bei anderen Entwicklungen stets im Blick behalten werden. Effizienzgewinne bei den Nebenverbrauchern, etwa eine verbesserte bedarfsgerechte Steuerung der Klimaanlage, Luftwärmepumpen oder die Elektrifizierung des Druckluftsystems, sind in einem elektromobilen Busverkehr der Zukunft unverzichtbar. Ähnliches gilt für den Leichtbau.

Das perspektivische Denken in Richtung Elektromobilität steht jedoch nicht im Widerspruch dazu, bei den bisherigen Technologien noch verbleibende »tief hängende Früchte zu ernten«, auch wenn diese Maßnahmen an Bedeutung verlieren werden. So

etwa, wenn bei den konventionellen Dieseln durch eine nachträglich verbesserte Motor- und Getriebesteuerung oder durch Anreizsysteme für energieeffizientes Fahrverhalten Effizienzpotenziale erschlossen werden.

Zudem lässt sich eine Lektion aus dem Thema der Motor- und Getriebesteuerung auf die elektromobile Zukunft übertragen. Denn noch mehr als beim Dieselantrieb erfordern batterieelektrische Fahrzeuge Lösungen zur intelligenten, auf das Bedienungsgebiet angepassten Steuerung von Antrieb und Nebenverbrauchern.

Eine enge Zusammenarbeit von Fahrzeugherstellern und -nutzern ist nötig, um die verschiedenen Energieverbraucher in den Fahrzeugen besser auf das jeweilige Einsatzgebiet anzupassen.

d) Maßnahmen am Neufahrzeug vs. Nachrüstung am Altfahrzeug

Während fahrzeugtechnische Energieeffizienzmaßnahmen im Busbereich fast ausschließlich nur bei Neufahrzeugen in Frage kommen, ergibt bei den langlebigeren Schienenfahrzeugen und deren Infrastruktur auch die energetische Nachrüstung Sinn. Im Rahmen einer turnusgemäßen Überholung (Revision) ist es technisch möglich, Altfahrzeuge durch Verwendung von Leichtbauteilen, modernen Dämmmaterialien, verbrauchsarmer Beleuchtung, effizienter Klimatisierung und moderner Leistungselektronik (Rückspeisefähigkeit) weitgehend auf den Stand der Technik zu bringen. Jedoch wird diese Chance nicht oder nur unvollständig genutzt. Zu oft ist eine Amortisation dieser Maßnahmen über die Restlaufzeit nicht zu erreichen.

Sich bei der energetischen Sanierung von Schienenfahrzeugen ergebende Finanzierungslücken müssen über gezielte finanzielle Förderung geschlossen werden (siehe zentrale Handlungsempfehlung 3).

e) Maßnahmen mit positiven Nebeneffekten vs. vermeintliche Interessenskonflikte

Es gibt Ansätze, bei denen – scheinbar oder tatsächlich – das Risiko von Interessenkonflikten auftreten kann. Beispiele sind das bedarfsgerechte Kneeling und der Verzicht auf Fahrgastraumklimatisierung.

Bei der Umsetzung von Maßnahmen, die derartige Risiken beinhalten, müssen die Interessen der Fahrgäste stets proaktiv berücksichtigt werden. Eine kommunikative Begleitung muss stattfinden, da sonst eine Diskreditierung des Energieeffizienzthemas und eine Abwanderung von Fahrgästen möglich sind, die weder aus finanzieller noch aus ökologischer Perspektive gewollt sein können.

Bei Maßnahmen zur ÖPNV-Beschleunigung kann es darüber hinaus aufgrund des begrenzten Platzangebots im Straßenraum zu Konflikten mit dem MIV, aber auch mit den anderen umweltfreundlichen Verkehrsmodi Fuß- und Radverkehr kommen.

Durch Verringerung der Flächen für den MIV im innerstädtischen Bereich, durch digitale Steuerung, die in Bereichen mit schmalen Straßen eine Priorisierung des ÖPNV auch ohne exklusive Fahrspur ermöglicht, und enge Verzahnung von Kommunen und Verkehrsunternehmen bei der Planung können jedoch in der Regel Kompromisse gefunden werden.

Umgekehrt ist die Busbeschleunigung auch ein Beispiel für eine Maßnahme, die neben dem Energieeffizienzgewinn durch Einsparung von Fahrzeugumläufen und Kraftstoff gleichzeitig andere Zwecke erfüllt: Durch einen ungestörteren Fahrtablauf verringern sich Fahrzeiten und erhöht sich der Komfort für die Fahrgäste. Weitere Beispiele für Energieeffizienzmaßnahmen, die auch oder sogar primär aus anderen Gründen durchgeführt werden, sind die Erhöhung der Fahrdrachtspannung, die neue Übertragungskapazitäten schafft und Korrosion vorbeugt, sowie die geschlossene Abstimmung von Fahrzeugen, die auch der Reduzierung von Instandhaltungskosten dient.

f) Betriebswirtschaftlich vorteilhafte vs. förderwürdige Maßnahmen

Besonders für die letztgenannten Maßnahmen ist eine betriebswirtschaftliche Amortisation allein durch die Energiekosteneinsparung kaum zu erwarten. Auch solche Maßnahmen können aber in Einzelfällen auch ohne monetäre Unterstützung für ein Verkehrsunternehmen Sinn ergeben, weil sich weitere Nutzen ergeben.

Bei betriebswirtschaftlich nicht vorteilhaften Maßnahmen können die durch die Energieeinsparungen vermiedenen Umweltkosten eine Argumentationshilfe darstellen, da sie bisher nicht (z.B. über einen CO₂-Preis) internalisiert und daher in der Investitionsrechnung nicht integriert sind. Die eingesparten Umweltkosten wiegen jedoch bei ihrer Abschätzung nach der »standardisierten Methodik« die betriebswirtschaftlichen Mehrkosten nur zum Teil auf.

Daher ist in diesen Fällen in der Regel eine finanzielle Förderung nötig. Dabei kann es sich um Förderprogramme handeln. Bei lang laufenden Umstellungsprozessen wie der Optimierung der Fahrstromverteilung, geht es hingegen eher um die langfristige Sicherung der Grundfinanzierung des ÖPNV.

Zur Unterstützung langfristiger Energieeffizienzmaßnahmen sollten die durch Erhöhung und Dynamisierung der Regionalisierungsmittel und – soweit möglich – die durch die vorgesehene Aufstockung und Dynamisierung der GVFG-Bun-

desmittel zur Verfügung stehenden Gelder nutzbar gemacht werden. Dabei sollten Umweltkriterien in der »Standardisierten Bewertung« ein höheres Gewicht erhalten, um Investitionen in die ÖPNV-Infrastruktur (wie z.B. Ausbau von Tram oder U-Bahn) bei Planungsprozessen angemessener bewerten zu können.

Mit Ablauf der Entflechtungsmittel Ende 2019 stehen die Länder zudem in der Verantwortung, die Ihnen im Gegenzug zugewiesenen Mittel aus dem Umsatzsteueraufkommen des Bundes zweckgebunden für die Verkehrsinfrastrukturfinanzierung zu sichern.

Dagegen sind bei Maßnahmen, die sich positiv auf das Betriebsergebnis der ÖPNV-Unternehmen auswirken, primär die Unternehmen selbst in der Pflicht. Dies gilt beim Bus während der Übergangsphase zur Elektromobilität auch für Maßnahmen beim konventionellen Antrieb. Hier bedarf es v.a. der Information über erzielbare Einsparungen, wie sie etwa in diesem Handlungsleitfaden bereitgestellt werden.

Damit diejenigen Maßnahmen, die aus Sicht des Verkehrsunternehmens wirtschaftlich amortisationsfähig sind, häufiger umgesetzt werden, kommt es darauf an, Angebotsdefizite seitens der Hersteller zu beheben. Ein Beispiel ist geringe Bandbreite angebotener Leichtbau-Busmodelle.

Ein Ansatz zur Angebotsbelebung können gemeinsame Beschaffungsinitiativen mehrerer Verkehrsunternehmen sein. Entsprechende Aktivitäten beim E-Bus könnten auf andere energieeffizienzrelevante Themen ausgedehnt werden.

Drei zentrale Handlungsempfehlungen

Basierend auf einem breit angelegten Prozess der Maßnahmendiskussion und –auswahl mit verschiedenen Experten und Stakeholdern sowie dieser Darstellung der Förder- und Ausschreibungspraxis enthält diese Broschüre einen Überblick über Handlungsbedarf und Handlungsoptionen. Welche Maßnahme an welchem Ort sinnvoll ist und wie sie sich umsetzen lässt, ist letztendlich stark von lokalen Bedingungen abhängig. Dennoch kann der zentrale Handlungsbedarf im Themenfeld »Energieeffizienz im ÖPNV« zu einem Vorschlag für **drei zentrale Handlungsempfehlungen** verdichtet werden, die im Folgenden präsentiert werden.

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

Viele ÖPNV-Unternehmen haben noch gar keine Erfahrungen mit dem Einsatz elektrischer Busse oder erproben sie nur vorsichtig. Sie sehen bisher noch viele technische und marktseitige Hinderungsgründe für den Einstieg: So etwa der bisher unzureichende Anbietermarkt seitens der meisten Fahrzeughersteller sowie der Umstand, dass sich die (Batterie-)Technik laufend weiterentwickelt und daher Investitionen in Ladeinfrastruktur mit dem Risiko verbunden sind, in einigen Jahren möglicherweise nicht mehr benötigt zu werden. Es mangelt zudem bisher an Interoperabilität zwischen Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur der verschiedenen Anbieter. Für einen entschiedenen Einstieg in die Elektromobilität wäre angesichts der ökologischen Herausforderungen, aber auch mit Blick auf ausländische Märkte jedoch heute der richtige Zeitpunkt.

Die Umstellung bedarf erheblicher Planung und Investitionen, weit über die Fahrzeuge hinaus. Ohne fundiertes Know-how und die Entwicklung eines Gesamtkonzepts besteht die Gefahr, dass die ersten Erfahrungen eher zu Frustration führen. Dies gilt insbesondere für mittelständische Busbetreiber, die im Vergabe- und Genehmigungswettbewerb stehen, und für die Aufgabenträger, die wettbewerbliche Vergaben organisieren. Dem Einstieg stehen nicht nur Informationsdefizit und ein Mangel an passenden Fördermaßnahmen entgegen. Hinzu kommt das verfahrenstechnische Hindernis, dass die Aufgabenträger zu Beginn einer Ausschreibung noch nicht wissen, ob und in welcher Höhe der Ausschreibungsgewinner eine Förderung erhalten und diese seine Haushaltsbelastung verringern wird.

Empfohlen wird daher als erstes Element, den Zugang zur Fahrzeugförderung zu verbessern, indem in Förderprogrammen auf Mindestfahrzeugzahlen verzichtet wird. Darüber hinaus sollte die Förderung auch Aufgabenträgern gewährt werden dürfen, damit diese zu Beginn der Vergabe Klarheit über die zur Verfügung stehenden Finanzmittel haben. Finanzielle Planungssicherheit für die Unternehmen könnte alternativ hierzu auch dadurch erreicht werden, dass der Fördergeber vor Beginn des Vergabeverfahrens oder während einer ausreichend langen Angebotsfrist bei Einhaltung bestimmter Voraussetzungen eine Förderzusage erteilt.

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. Dabei geht es einerseits um Dialogformate und frei verfügbare Informationen. 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 unbedingt auch die Aufgabenträger sein.

Eine Synchronisierung von maximaler Laufzeit der Genehmigung nach PBefG und der Dauer öffentlicher Dienstleistungsaufträge kann – gerade bei Investition in langlebige Infrastruktur – zu mehr Planungssicherheit führen können. Hier ist der Bundesgesetzgeber gefragt.

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

2. Integration von verbindlichen Vorgaben und / oder Wertungsboni für Energieeffizienzmaßnahmen in Vergabekriterien

Technische Lösungen für mehr Energieeffizienz – wie etwa Buszüge, Leichtbaufahrzeuge oder Fahrzeuge mit umfassenden Datenerhebungssystemen, energieeffizienter Druckluftanlage und Klimatisierung – sind zwar verfügbar, werden aber im (im Vergleich zum Lkw- oder Pkw) überschaubaren ÖPNV-Fahrzeugmarkt nicht zu attraktiven Konditionen angeboten. Ein Grund dafür ist, dass technologisch fortgeschrittene, aber teurere, Fahrzeuge bei Vergaben

benachteiligt sind, wenn lediglich eine Preiswertung erfolgt. Für die Hersteller lohnt es sich nicht, die technischen Lösungen günstig anzubieten und weiterzuentwickeln, weil sie in Ausschreibungen nicht damit punkten werden, sondern nur mit günstigstem Preis.

Dabei bestehen für die Auftraggeber von Verkehrsdienstleistungen Möglichkeiten, durch die Ausgestaltung der Vergabeunterlagen Einfluss darauf zu nehmen, mit welchen Fahrzeugen bzw. welcher Technik die Verkehrsunternehmen die Verkehrsleistung anbieten. Diese Ansätze spielen angesichts befürchteter Mehrkosten oder einer befürchteten höheren Komplexität der Vergabe in der Praxis bislang kaum eine Rolle.

Im Fall eigenwirtschaftlicher Verkehre können Energieeffizienzmaßnahmen in Nahverkehrsplänen verankert werden.

Bei Ausschreibung und Direktvergabe von Verkehrsleistungen können einerseits verbindliche Vorgaben genutzt werden: D.h. der Auftraggeber der Verkehrsleistung schreibt den Einsatz einer bestimmten (Antriebs-)Technik zwingend vor. Alternativ können bei der Vergabeentscheidung nicht nur der Preis, sondern auch Energieeffizienzkriterien berücksichtigt werden. Dies kann z.B. in Form eines Wertungsbonus operationalisiert werden und dadurch die vergebende Kommune unterstützen, ihre Klimaschutzziele zu erreichen.

Für zukünftig abzuschließende, lang laufende 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.

3. Förderung eines Energieeffizienz-»Add-ons« bei Nachrüstmaßnahmen

Größere Fahrzeugneubeschaffungen oder -generalüberholungen sowie Errichtungen oder Umbauten von Infrastrukturen wie neuer Betriebshöfe binden über Jahre große Investitionssummen der Verkehrsunternehmen. Öffentlichkeit und Haushaltskontrolleure erwarten dabei höchste Kosteneffizienz. Dies gilt umso mehr in Zeiten immer noch vielerorts angespannter kommunaler Haushalte und weiterer großer Anforderungen an Verkehrsunternehmen, insbesondere der von der Öffentlichkeit erwarteten Erweiterung des Angebots. Daher werden energieeffizienzsteigernde Zusatzinvestitionen oft nicht umgesetzt, selbst wenn

zumindest ein Teil der Mehrinvestitionen durch Einsparungen bei Energiekosten und Wartung kompensiert wird. Dies gilt gerade auch bei Überholungen von Schienenfahrzeugen, denn schließlich sind oft noch erhebliche Restnutzungsdauern zu erwarten. Dadurch schließen sich wertvolle Gelegenheitsfenster.

Aktuelle Maßnahmen, die deswegen zu selten umgesetzt werden, sind im Schienenfahrzeug beispielsweise Nachrüstung der Rückspeisefähigkeit, Nutzung von Leichtbaumaterialien im Innenraum, verbesserte Wärmedämmung, LED-Beleuchtung. Im Infrastrukturbereich geht es um geschlossene Fahrzeugabstellung (bei ohnehin vorgesehener Neuerrichtung / Umbau von Betriebshöfen) und Nutzung von Tunnelabwärme.

Es fehlen bisher adäquate Förderinstrumente, um die Finanzierungslücke für diese »letzten Meile« hin zur Umsetzung ambitionierter Energieeffizienztechnologien zu schließen. Dies könnte durch entsprechende Förderprogramme der Länder – ggf. mit Unterstützung des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) – stimuliert werden. Ziel wäre, dass nicht nur bei Neuanschaffungen und Neubau der Stand der Technik umgesetzt, sondern dieser auch bei Umbau und Generalüberholung weitgehend ermöglicht wird.

Im Schlussbericht zum Projekt »Innovative und systematische Ansätze für mehr Energieeffizienz im kommunalen Öffentlichen Personennahverkehr«¹⁵ wird ausführlicher erläutert, welche Wirkung von diesen Instrumenten ausgehen soll, wie sie im Detail ausgestaltet werden könnten und wie ein möglicher Implementierungspfad aussehen könnte. Zudem finden sich dort weitere Informationen und Anwendungsbeispiele zu den betrachteten Maßnahmen sowie Details zur Bewertungsmethodik.

¹⁵ Details zu den Projektergebnissen können dem Schlussbericht des FoPS-Forschungsvorhabens 70.908/2015 entnommen werden.

Forschungsteam



Lukas Minnich



Moritz Mottschall



Miguel Wolf



Henning Palm



Lisa Baal



Thies Hinckeldeyn

Das **Öko-Institut** ist eines der europaweit führenden, unabhängigen Forschungs- und Beratungsinstitute für eine nachhaltige Zukunft. Seit der Gründung im Jahr 1977 erarbeitet das Institut Grundlagen und Strategien, wie die Vision einer nachhaltigen Entwicklung global, national und lokal umgesetzt werden kann. Das Institut ist an den Standorten Freiburg, Darmstadt und Berlin vertreten.

KCW ist die führende deutsche Strategie- und Managementberatung für Aufgabenträger des öffentlichen Verkehrs, Verkehrsverbünde, lokale Aufgabenträgerorganisationen und Infrastrukturbetreiber sowie für die öffentliche Hand als Eigentümerin von Verkehrsunternehmen. Daneben erstellt KCW für europäische Institutionen, Bundes- und Landesministerien sowie -behörden Studien und Gutachten. KCW beschäftigt Spezialistinnen und Spezialisten aus den Bereichen Recht, Ökonomie und Planung sowie aus den Sozial- und Naturwissenschaften am Sitz in Berlin und dem Büro in Hamburg.

BHP ist ein praxisorientiertes Hamburger Beratungsunternehmen, das sich aus Unternehmensleitern des ÖPNV gebildet hat. Beratungsschwerpunkte sind die Reorganisation öffentlicher Verkehrsunternehmen ergänzt um den Einsatz elektrogetriebener Fahrzeugflotten einschließlich der erforderlichen Infrastruktur. Aufgrund der betriebswirtschaftlichen Ausrichtung liegt der Nutzen für Auftraggeber in konzeptgestützter Umsetzung von Projekten.

Praxispartner, Teilnehmende der Werkstattgespräche und der sonstigen Hintergrundgespräche

Um **Praxisnähe zu gewährleisten**, wurde der Prozess der Diskussion und Auswahl geeigneter Energieeffizienzmaßnahmen umfassend von vier Praxispartnern unterstützt: **Berliner Verkehrsbetriebe** (BVG), **Dresdner Verkehrsbetriebe** (DVB), **Verkehrsbetriebe Bachstein** (vorwiegend ländlicher Raum in Niedersachsen und Bayern) und **Kreisverkehrsgesellschaft in Pinneberg** (KViP). So wird eine große Bandbreite von Rahmenbedingungen abgedeckt – etwa mit Blick auf die Größe, Verkehrsmittel, Beauftragungsstrukturen und topographische Bedingungen.

Die Zwischenergebnisse wurden im Rahmen von vier Werkstattgesprächen mit Verkehrsunternehmen, Aufgabenträgern, Fördermittelgebern, Verbänden und der Fahrzeugindustrie diskutiert. Bei den ersten beiden Diskussionen standen die Auswahl und Bewertung der Maßnahmen für den Busverkehr beziehungsweise den schienengebundenen ÖPNV im Mittelpunkt. Beim dritten Werkstattgespräch wurde die Unterstützung und Finanzierung energieeffizienzsteigernder Investitionen behandelt, während sich das vierte Gespräch mit geeigneten Instrumenten beschäftigte, um die Maßnahmenumsetzung zu stimulieren. Die in den Werkstattgesprächen gewonnenen Erkenntnisse sind zurück in das Projekt geflossen. Der vorliegende Leitfaden ist daher eine konsolidierte Ortsbestimmung in punkto Energieeffizienz im ÖPNV.

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.

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«.

Haberl, Michael; Fellendorf, Martin; Kies, Anton (2015): Energiebetrachtung von Hybridbussen unter Einfluss des Fahrverhaltens. In: Straßenverkehrstechnik (9), S. 575-583.

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.

Öko-Institut e.V. (2018): Elektromobilität-Faktencheck. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FAQ_Elektromobilitaet_Oeko-Institut_2017.pdf.

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 Ergebnisse der VDE-ETG-

Studie für ÖPNV-Schienenfahrzeuge mit elektrischem Antrieb. In: Der Nahverkehr (1+2), S. 25-30.

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) (2018): 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.

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.

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.

Öko-Institut

Büro Berlin
Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
+49 30 40 50 85-0

www.oeko.de

kcw GmbH

Büro Hamburg
Steindamm 94
20099 Hamburg
+49 40 32 57 75-600

www.kcw-online.de

BHP

Unternehmensberatung
Neuer Kamp 30
20357 Hamburg
+49 175 725 68 64

www.bh-partner.de

