



Unterauftragnehmer:



Projektpartner:



# **Forschungsprojekt „Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie und Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Personennahverkehr“**

Schlussbericht

Autor/innen:

*Hamburg-Consult GmbH*

Dr. Jürgen Kappus | Andrea Klußmann

*Öko-Institut e.V.*

Martin Schmied | Moritz Mottschall

*TU Berlin, Fakultät V – Institut für Land- und Seeverkehr, Fachgebiet Schienenfahrzeuge*

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht | Patrick Eschweiler

## Kontaktdaten aller Projektpartner

### **Hamburg-Consult GmbH**

*Ansprechpartner:*

Dr. Jürgen Kappus

Spohrstraße 6

D-22083 Hamburg

Tel.: +49 (0)40 27 166-549

Fax: +49 (0)40 27 166-410

j.kappus@hamburg-consult.de

### **Öko-Institut e.V. – Büro Berlin**

Bereich Infrastruktur und Unternehmen

*Ansprechpartner:*

Moritz Mottschall

Schicklerstraße 5 – 7

10179 Berlin

Tel.: +49 (0)30 405085-377

Fax.: +49 (0)30 405085-388

m.mottschall@oeko.de

### **Technische Universität Berlin**

Fakultät V – Institut für Land- und Seeverkehr

Fachgebiet Schienenfahrzeuge

Sekr. SG 14

*Ansprechpartner:*

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

Salzufer 17-19

D-10587 Berlin

Tel.: +49 (0)30 314 25195

Fax: +49 (0)30 314 22529

markus.hecht@tu-berlin.de

patrick.eschweiler@tu-berlin.de

### **VDV (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen)**

*Ansprechpartner:*

Gerrit Poel

Emmy-Noether-Str. 2

80287 München

Tel.: +49 (0) 89 4702484

Fax: +49 (0) 89 2191-2293

poel@vdv.de

## Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Management Summary</b> .....	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>5</b>
1.1	Projekthintergrund.....	5
1.2	Zielstellung.....	6
1.3	Aufbau des Berichtes .....	7
<b>2</b>	<b>Methodisches Vorgehen</b> .....	<b>9</b>
2.1	Datenquellen.....	9
2.1.1	Datengrundlagen.....	9
2.1.2	Zusätzliche eigene Datenerhebungen (Interviews und Workshop) .....	11
2.2	Differenzierung durch Modellbildung .....	12
2.2.1	Fahrstrom-Rechenmodell .....	13
2.2.2	Kraftstoff-Rechenmodell .....	15
2.3	Ergänzende Untersuchung zum Fahrzeugbestand .....	16
2.3.1	Straßen-, Stadt- und U-Bahnen .....	16
2.3.2	Busse .....	17
<b>3</b>	<b>Entwicklungen im ÖPNV seit 1990 bis heute</b> .....	<b>19</b>
3.1	Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen des ÖPNV im Zeitraum von 1990 bis 2008 .....	20
3.2	Bisher realisierte Energieeffizienzpotentiale .....	31
3.2.1	ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren.....	31
3.2.2	Elektrisch betriebener ÖPNV .....	36
3.3	Analyse erneuerbarer Energien.....	44
3.3.1	ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren.....	44
3.3.2	Elektrisch betriebener ÖPNV .....	45
3.4	Zusammenfassung.....	48
<b>4</b>	<b>Maßnahmen zur zukünftigen Steigerung der Energieeffizienz und der erneuerbaren Energien im ÖPNV</b> .....	<b>52</b>
4.1	Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bis 2030 .....	53
4.1.1	ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren.....	53
4.1.2	Elektrisch betriebener ÖPNV .....	63
4.2	Maßnahmen zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien bis 2030.....	75
4.2.1	ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren.....	75
4.2.2	Elektrisch betriebener ÖPNV .....	78
4.3	Zusammenfassung.....	83
<b>5</b>	<b>Entwicklung des ÖPNV im Referenzszenario bis 2030</b> .....	<b>86</b>
5.1	Rahmenbedingungen des Referenzszenarios.....	87
5.2	Energieeffizienz im Referenzszenario .....	95

Schlussbericht

5.2.1	ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren.....	95
5.2.2	Elektrisch betriebener ÖPNV .....	99
5.3	Erneuerbare Energien im Referenzszenario.....	103
5.3.1	ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren.....	103
5.3.2	Elektrisch betriebener ÖPNV .....	103
5.4	Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Energiekosten im Referenzszenario bis 2030.....	105
5.4.1	Energieverbrauch .....	105
5.4.2	Treibhausgasemissionen.....	109
5.4.3	Energiekosten .....	112
5.5	Zusammenfassung.....	114
<b>6</b>	<b>Entwicklung des ÖPNV in den Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien bis 2030 .....</b>	<b>118</b>
6.1	Rahmenbedingungen der Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien.....	121
6.2	Energieeffizienz im Szenario Energieeffizienz und erneuerbare Energien.....	127
6.2.1	ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren.....	127
6.2.2	Elektrisch betriebener ÖPNV .....	130
6.3	Erneuerbare Energien im Szenario Energieeffizienz und erneuerbare Energien.....	133
6.3.1	ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren.....	133
6.3.2	Elektrisch betriebener ÖPNV .....	133
6.4	Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Energiekosten im Szenario Energieeffizienz und erneuerbare Energien bis 2030.....	135
6.4.1	Energieverbrauch .....	135
6.4.2	Treibhausgasemissionen.....	142
6.4.3	Energiekosten .....	146
6.5	Zusammenfassung.....	148
<b>7</b>	<b>Entwicklung des ÖPNV bis 2050 .....</b>	<b>152</b>
7.1	Rahmenbedingungen für den Zeitraum 2030 bis 2050.....	153
7.2	ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor .....	161
7.2.1	Erneuerbare Energien .....	162
7.2.2	Energieeffizienz .....	164
7.2.3	Energieverbrauch .....	167
7.2.4	Treibhausgasemissionen.....	170
7.3	Elektrisch betriebener ÖPNV .....	175
7.3.1	Erneuerbare Energien .....	175
7.3.2	Energieeffizienz .....	175
7.3.3	Energieverbrauch .....	176
7.3.4	Treibhausgasemissionen.....	179
7.4	Zusammenfassung.....	181
<b>8</b>	<b>Einflussmöglichkeiten von Politik, Aufgabenträgern und ÖPNV-Unternehmen ...</b>	<b>185</b>

Schlussbericht

8.1	Umsetzungshemmnisse .....	185
8.2	Konkrete Handlungsmöglichkeiten .....	188
8.2.1	Politik.....	188
8.2.2	Aufgabenträger.....	190
8.2.3	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) und ÖPNV-Unternehmen.....	191
8.3	Zusammenfassung.....	193
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>196</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>203</b>
<b>11</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>209</b>
<b>12</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>212</b>
	Anhang 1 Methodisches Vorgehen zur Erstellung der Rechenmodelle .....	213
	Anhang 2 Technische Erläuterungen .....	215

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs pro Platz-km für Verkehrsmittel des ÖPNV und Pkw-Verkehrs (Index: 2008 = 100) [eigene Berechnungen].....	1
Abbildung 2 Spezifische Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer des ÖPNV- und Pkw-Verkehrs 2008 im Referenzszenario und in den Effizienzscenarien 2030 [eigene Berechnungen], Stromanteil erneuerbarer Energien 45 % (orange: 67 %) .....	2
Abbildung 3 Projektverständnis [Eigene Darstellung].....	12
Abbildung 4 Aufbau des Fahrstrom-Rechenmodells [Eigene Darstellung].....	14
Abbildung 5 Sankey-Diagramm der Energieverluste beim Dieselbus [eigene Darstellung] .....	15
Abbildung 6 Prognose der Fahrzeugflottenstruktur bis zum Jahr 2030 [eigene Berechnung]..	17
Abbildung 7 Anteile der einzelnen Verkehrssegmente an der Gesamtverkehrsleistung im Personenverkehr im Jahr 2008 in Deutschland [ViZ 2011].....	19
Abbildung 8 Entwicklung des Endenergieverbrauchs des ÖPNV in Deutschland von 1990 bis 2008 [Richter 2011a; HBEFA 2010; Dziambor 2011; Pfeifer 2010; eigene Berechnungen]	20
Abbildung 9 Anteil der Verkehrsmittel des ÖPNV an der Verkehrsleistung, des Endenergie- und Primärenergieverbrauchs im Jahr 2008 [ViZ 2011; Richter 2011a; eigene Berechnungen] .....	21
Abbildung 10 Entwicklung des spezifischen Dieserverbrauchs von Linienbusse im Zeitraum 1990 bis 2008 [HBEFA 2010; Richter 2011a; eigene Berechnungen] .....	22
Abbildung 11 Indizierte Entwicklung des spezifischen Stromverbrauchs pro Wagen- und Platz-Kilometer für Straßen-/Stadtbahnen sowie U-Bahnen im Zeitraum 1990 bis 2008 (Index: 1990 = 100) [Dziambor2011; Richter 2011a; Pfeifer 2010; VDV 2011; eigene Berechnungen] .....	24
Abbildung 12 Entwicklung der Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen des ÖPNV in Deutschland von 1990 bis 2008 [Richter 2011a; HBEFA 2010; Dziambor 2011; Pfeifer 2010; eigene Berechnungen] .....	26
Abbildung 13 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs und der Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen von Bussen (einschließlich Erdgas- und O-Busse) und Straßenbahnen in Deutschland von 1990 bis 2008 [Richter 2011a; HBEFA 2010; Dziambor 2011; Pfeifer 2010; eigene Berechnungen].....	27
Abbildung 14 Entwicklung der spezifischen Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer des ÖPNV- und Pkw-Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2008 [Richter 2011a; HBEFA 2010; Dziambor 2011; Pfeifer 2010; eigene Berechnungen] .....	28

Schlussbericht

Abbildung 15 Spezifische CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer von Linienbussen mit Dieselmotor mit und ohne Berücksichtigung der Klimaanlage im Vergleich zum Pkw [UBA 2010a; eigene Berechnungen].....	30
Abbildung 16 Umsetzung betrieblicher Effizienzmaßnahmen [Quelle: Interviews].....	32
Abbildung 17 Umsetzung von technischen Effizienzmaßnahmen im Bereich Motor und Getriebe [Quelle: Interviews].....	33
Abbildung 18 Umsetzung von Maßnahmen zur Verringerung der Fahrwiderstände [Quelle: Interviews] .....	33
Abbildung 19 Umsetzung von Maßnahmen im Bereich der Nebenverbraucher und Komfortfunktionen [Quelle: Interviews].....	34
Abbildung 20 Entwicklung des durchschnittlichen berechneten Kraftstoffverbrauchs für Linienbusse im Vergleich zu drei Verkehrsunternehmen für den Zeitraum 1990 bis 2008 [[Quelle: Interviews; eigene Berechnungen].....	35
Abbildung 21 Umsetzungsgrad von Maßnahmen im Bereich Heizung, Klima, Lüftung [Quelle: Interviews] .....	37
Abbildung 22 Umsetzungsgrad von Maßnahmen im Bereich sonstige Nebenverbraucher [Quelle: Interviews] .....	38
Abbildung 23 Umsetzungsgrad von Maßnahmen im Bereich Traktion [Quelle: Interviews] .....	41
Abbildung 24 Fahrstromverbrauch am Beispiel dreier Verkehrsunternehmen [Quelle: Interviews] .....	42
Abbildung 25 Fahrstromverbrauch pro Personen- und Zugkilometer [Quelle: Interviews] .....	43
Abbildung 26 Anteil der ÖPNV-Unternehmen, die Strom aus erneuerbaren Energiequellen (EE-Strom) für den Betrieb von Straßen-, Stadt- und U-Bahnen sowie O-Busse einsetzen (Stand: Januar 2011) [Pfeiffer 2010, eigene Recherchen].....	46
Abbildung 27 Anteil der Stromlieferanten am Fahrstromverbrauch der Straßen-, Stadt- und U-Bahnen sowie O-Busse 2009 in Deutschland [eigene Recherchen].....	47
Abbildung 28 Spezifische CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Personen-Kilometer für verschiedene Verkehrsmittel im ÖPNV im Vergleich zum Pkw für das Jahr 2008 [Richter 2011a; HBEFA 2010; Dziambor 2011; ifeu 2010; eigene Berechnungen].....	51
Abbildung 29 Fahrzeugseitige Möglichkeiten zur Minderung der Treibhausgasemissionen und Erhöhung der Energieeffizienz im ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor [eigene Darstellung] .....	54
Abbildung 30 Standard-Aufdachklimaanlage auf 12m-Bus [Quelle: Sonnekalb 2006].....	59
Abbildung 31 Konzeptüberblick der Hybridtechnik [Fraunhofer IVI in NachNa 2010] .....	60
Abbildung 32 Betriebliche Optionen zur Minderung der Treibhausgasemissionen und Erhöhung der Energieeffizienz im ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor .....	62

Abbildung 33 Mögliche Radsatzstellungen bei radial einstellbaren Fahrwerken.....	65
Abbildung 34 Zulässiger Bereich für die Festlegung der Regelkurve für Fahrzeuge der Kategorie B [EN 14750-1 2006] .....	67
Abbildung 35 Ragone-Diagramm für aktuelle elektrochemische Energiespeicher [Guibert 2009] .....	70
Abbildung 36 Lebenszykluskosten einer Stadtbahn über einen Zeitraum von 10 Jahren [Geyer 2005] .....	72
Abbildung 37 Prozentuale Minderung der Treibhausgasemissionen pro MJ Kraftstoff gegenüber konventionellem Diesel (Dunkelgrün: geringste Minderung; hellgrün: höchste Minderung) – ohne Landnutzungsänderungen [EU-Richtlinien 2009/30/EG; Biokraft-NachV; eigene Darstellung] .....	76
Abbildung 38 Prozentuale Minderung der Treibhausgasemissionen pro MJ Erdgas bzw. Biogas gegenüber konventionellem Benzin bzw. Diesel [Biokraft-NachV; Dena 2010; eigene Darstellung].....	78
Abbildung 39 CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro kWh Strom (Niederspannung) im Jahr 2010 sowie in den vorgestellten Optionen [Öko-Institut et al. 2011; Öko-Institut et al. 2010; GEMIS 4.7; Prognos et al. 2010; DLR et al. 2010] .....	79
Abbildung 40 Zukünftige Entwicklung der Stromgestehungskosten der verschiedenen Technologien zur Erzeugung erneuerbarer Energien bis 2050 nach der BMU-Leitstudie im Basisszenario 2010 A [DLR et al. 2010].....	80
Abbildung 41 Entwicklung des Busbestandes (einschließlich vorübergehend abgemeldeter Fahrzeuge) in Deutschland im Zeitraum von 2008 bis 2030 differenziert nach Größenklassen und Antriebskonzepten [eigene Berechnungen].....	89
Abbildung 42 Entwicklung der Fahrleistung der Linienbusse des ÖPNV in Deutschland im Zeitraum von 2008 bis 2030 differenziert nach Altfahrzeugen und Neufahrzeugen im Referenzszenario [eigene Berechnungen] .....	90
Abbildung 43 Anzahl von elektrisch betriebenen Schienenfahrzeugen im aktuellen Bestand in Deutschland nach Zulassungsjahr sortiert (Stand 2010) [eigene Berechnungen].....	92
Abbildung 44 Entwicklung des spezifischen Fahrstromverbrauchs durch den Einsatz effizienzsteigernder Maßnahmen und Techniken [eigene Berechnungen] .....	93
Abbildung 45 Heutige und bis 2030 realisierbare Energieeffizienzpotentiale verschiedener Maßnahmen bei den Linienbussen nach Schätzung der Experten im Vergleich zum heutigen Dieselbus (bezogen auf den Verbrauch in l/100 km) [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011] .....	96
Abbildung 46 Heutige und bis 2030 realisierbare Energieeffizienzpotentiale verschiedener Maßnahmen an Anlagen im elektrisch betriebenen ÖPNV nach Schätzung der Experten im Vergleich zum heutigen Stand [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011].....	100

Abbildung 47 Heutige und bis 2030 realisierbare Energieeffizienzpotentiale verschiedener Maßnahmen an Fahrzeugen im elektrisch betriebenen ÖPNV nach Schätzung der Experten im Vergleich zum heutigen Stand [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011].....	101
Abbildung 48 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km für ausgewählte Verkehrsmittel des ÖPNV und für den Pkw-Verkehr 2008 bis 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen].....	106
Abbildung 49 Spezifischer Endenergieverbrauch pro Fahrzeug- bzw. Wagen-km sowie pro Platz-km für verschiedene Verkehrsmittel im ÖPNV und des Pkw-Verkehrs 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen].....	107
Abbildung 50 Entwicklung des Endenergieverbrauchs des ÖPNV 2008 bis 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen].....	108
Abbildung 51 Anteile der Verkehrsmittel des ÖPNV an der Verkehrsleistung, des Endenergie- und Primärenergieverbrauchs in den Jahren 2008, 2020 und 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen].....	109
Abbildung 52 Entwicklung der spezifischen Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Platz-km (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für ausgewählte Verkehrsmittel des ÖPNV und für den Pkw-Verkehr 2008 bis 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen].....	110
Abbildung 53 Entwicklung der spezifischen Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für Verkehrsmittel des ÖPNV und für den Pkw-Verkehr 2008 bis 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen].....	111
Abbildung 54 Entwicklung der Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen des ÖPNV (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) 2008 bis 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen].....	112
Abbildung 55 Entwicklung der jährlichen Mehrkosten des ÖPNV für Energiekosten 2008 bis 2030 gegenüber 2011 im Referenzszenario [eigene Berechnungen].....	113
Abbildung 56 Spezifische Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für Verkehrsmittel des ÖPNV und für den Pkw-Verkehr 2008, 2020 und 2030 für das Referenzszenario im Vergleich [eigene Berechnungen].....	116
Abbildung 57 Gesamte Mehrkosten des ÖPNV für Energiekosten für den Zeitraum 2012 bis 2020 und 2021 bis 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen].....	117
Abbildung 58 Vereinfachte Lebenszykluskostenanalyse für einen Hybrid-Gelenkbus unter verschiedenen Rahmenbedingungen (Kraftstoffpreissteigerung entsprechend dem Referenzszenario) [eigene Berechnungen].....	119
Abbildung 59 Entwicklung des Busbestandes (einschließlich vorübergehend abgemeldeter Fahrzeuge) in Deutschland im Zeitraum von 2008 bis 2030 differenziert nach	

Schlussbericht

Größenklassen und Antriebskonzepten im „Effizienzscenario <u>mittel</u> “ [eigene Berechnungen] .....	122
Abbildung 60 Reale Marktentwicklung von Beispieltechnologien und deren Simulation nach Gompertz [Muraleedharakurup et al. 2010].....	123
Abbildung 61 Technologiediffusionskurve nach Gompertz (Referenz: Marktentwicklung Hybrid-Pkw in den USA) [Öko-Institut 2011].....	124
Abbildung 62 Entwicklung des Busbestandes (einschließlich vorübergehend abgemeldeter Fahrzeuge) in Deutschland im Zeitraum von 2008 bis 2030 differenziert nach Größenklassen und Antriebskonzepten im „Effizienzscenario <u>hoch</u> “ [eigene Berechnungen] .....	126
Abbildung 63 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km von Straßen-/Stadtbahnen 2008 bis 2030 im Referenzscenario sowie in den Energieeffizienzscenarios im Vergleich zum Pkw [eigene Berechnungen] .....	136
Abbildung 64 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km von U-Bahnen 2008 bis 2030 im Referenzscenario sowie in den Energieeffizienzscenarios im Vergleich zum Pkw [eigene Berechnungen].....	137
Abbildung 65 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km von Linienbussen 2008 bis 2030 im Referenzscenario sowie in den Energieeffizienzscenarios im Vergleich zum Pkw [eigene Berechnungen].....	138
Abbildung 66 Spezifischer Endenergieverbrauch pro Fahrzeug- bzw. Wagen-km sowie pro Platz-km für verschiedene Verkehrsmittel im ÖPNV und des Pkw-Verkehrs 2030 in den beiden Effizienzscenarios [eigene Berechnungen].....	139
Abbildung 67 Endenergieverbrauchs des ÖPNV in 2020 und 2030 im Vergleich zu 2008 im Referenzscenario sowie den beiden Effizienzscenarios [eigene Berechnungen] .....	140
Abbildung 68 Anteile der Verkehrsmittel des ÖPNV an der Verkehrsleistung, des Endenergie- und Primärenergieverbrauchs im Jahr 2020 im Referenzscenario sowie den beiden Referenzscenarios [eigene Berechnungen] .....	141
Abbildung 69 Anteile der Verkehrsmittel des ÖPNV an der Verkehrsleistung, des Endenergie- und Primärenergieverbrauchs im Jahr 2030 im Referenzscenario sowie den beiden Referenzscenarios [eigene Berechnungen] .....	141
Abbildung 70 Spezifische Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für den ÖPNV und den Pkw-Verkehr 2020 im Referenzscenario, im „Effizienzscenario <u>mittel</u> + erneuerbare Energien“ sowie im „Effizienzscenario <u>hoch</u> + erneuerbare Energien“ [eigene Berechnungen] .....	144
Abbildung 71 Spezifische Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für den ÖPNV und den Pkw-Verkehr 2030 im Referenzscenario, im „Effizienzscenario <u>mittel</u> + erneuerbare	

Energien“ sowie im „Effizienzscenario <u>hoch</u> + erneuerbare Energien“ [eigene Berechnungen] .....	145
Abbildung 72 Entwicklung des Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) des ÖPNV 2030 im Vergleich zu 2008 im Referenzscenario sowie den Szenarien Energieeffizienz + erneuerbare Energien [eigene Berechnungen] .....	146
Abbildung 73 Mehr- bzw. Minderausgaben des ÖPNV für Energie für den gesamten Zeitraum 2012 bis 2020 und 2012 bis 2030 im Referenzscenario sowie in den Szenarien Energieeffizienz + erneuerbare Energien (zu Preisen von 2008) [eigene Berechnungen]	147
Abbildung 74 Spezifische Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für den ÖPNV und den Pkw-Verkehr 2020 und 2030 im Referenzscenario sowie in den „Effizienzscenarien mittel und hoch + erneuerbare Energien“ [eigene Berechnungen].....	150
Abbildung 75 Differenz der Ausgaben des ÖPNV für Energie für den gesamten Zeitraum 2012 bis 2020 und 2012 bis 2030 in den Szenarien Energieeffizienz + erneuerbare Energien zum Referenzscenario (zu Preisen von 2008) [eigene Berechnungen].....	151
Abbildung 76 Endenergieverbrauch des Personen- und des Güterverkehrs nach Energieträgern in PJ im Innovationsszenario der Studie Modell Deutschland [Prognos /Öko-Institut 2009] .....	154
Abbildung 77 Annahmen der Nationalen Plattform für Elektromobilität zur Entwicklung der Batteriekosten [NPE 2011].....	155
Abbildung 78 Darstellung von Entwicklungspfaden vom Hybrid- und Oberleitungsbussen hin zu reinen Elektrobussen [VCDB 2010].....	157
Abbildung 79 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km von Linienbussen im Bestand (2008 bis 2030) im Referenzscenario sowie im „Effizienzscenario hoch“ und von neu zugelassenen Linienbussen (2030 bis 2050) im Vergleich zum Pkw-Bestand [eigene Berechnungen].....	168
Abbildung 80 Endenergieverbrauch des Busbestands im Jahr 2008 sowie im Referenzscenario und im „Effizienzscenario hoch“ im Jahr 2030 im Vergleich zu neu zugelassenen Bussen in 2050 (Annahme: die gesamte Verkehrsleistung wird mit neu zugelassenen Bussen erbracht) [eigene Berechnungen] .....	170
Abbildung 81 Spezifische Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Pkm von neu zugelassenen Bussen im Vergleich zum Bestands-Pkw 2050 im Referenzscenario und „Effizienzscenario hoch + EE“ .....	172
Abbildung 82 Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen des Busbestands im Jahr 2008 sowie im Referenzscenario und im „Effizienzscenario hoch“ im Jahr 2030 im Vergleich zu neu zugelassenen Bussen in 2050 (Annahme: die gesamte Verkehrsleistung wird mit neu zugelassenen Bussen erbracht) [eigene Berechnungen] .....	174

Schlussbericht

Abbildung 83 Endenergieverbrauch des elektrisch betriebenen ÖPNV in TJ .....	177
Abbildung 84 Energieverbrauch pro Platzkilometer im elektrisch betriebenen ÖPNV im Vergleich zum Pkw .....	178
Abbildung 85 Gesamt CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen des elektrisch betriebenen ÖPNV im Referenz-, Effizienzscenario und im „Effizienzscenario hoch + EE“ .....	179
Abbildung 86 Spezifische Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für den ÖPNV und den Pkw-Verkehr 2050 im Referenzscenario, im „Effizienzscenario hoch + erneuerbare Energien“ [eigene Berechnung] .....	180
Abbildung 87 Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs pro Platz-km für Verkehrsmittel des ÖPNV und Pkw-Verkehrs (Index: 2008 = 100) [eigene Berechnungen].....	198
Abbildung 88 Spezifische Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer des ÖPNV- und Pkw-Verkehrs 2008 und im Referenzscenario und den Effizienzscenarien 2030 [eigene Berechnungen].....	199
Abbildung 89 Mehr- bzw. Minderkosten im Zeitraum 2012 bis 2030 aufgrund gestiegener Energiepreise und gestiegener Energieeffizienz im Referenzscenario sowie in den Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien [eigene Berechnungen].....	200

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Handlungsmöglichkeiten der einzelnen Akteure im Überblick.....	3
Tabelle 2 Aufbau des Berichts .....	7
Tabelle 3 Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch von neuen Linienbussen nach Größenklassen und Abgasstandards.....	23
Tabelle 4 Menge der in die Umwelt gelangten Kältemittel aus mobilen Klimaanlage von Bussen und Schienenfahrzeugen sowie die damit einhergehenden CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen .....	29
Tabelle 5 Beimischungsquoten von Biodiesel in konventionellem Diesel in Deutschland im Zeitraum 2006 bis 2010 .....	45
Tabelle 6 Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs und der spezifischen CO <sub>2</sub> -Äquivalente des ÖPNV und des Pkw-Verkehrs in Deutschland im Zeitraum 2006 bis 2010	49
Tabelle 7 Fahrzeugklassifizierung nach EN 14750-1:2006 [EN 14750-1 2006].....	66
Tabelle 8 Energieeinsparpotential und Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines rückspeisefähigen Unterwerks (Ricci 2011) .....	69
Tabelle 9 Übersicht über fahrzeugseitige Effizienzmaßnahmen beim ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor.....	83
Tabelle 10 Entwicklung der Verkehrsleistung des Öffentlichen Straßenpersonenverkehrs (ÖSPV) nach dem Referenzszenario von Prognos/Progrtrans bis 2030 (Stand Oktober 2011).....	88
Tabelle 11 Entwicklung verkehrlicher Kenngrößen des ÖPNV mit Bussen bis 2020 und 2030 im Referenzszenario.....	88
Tabelle 12 Entwicklung verkehrlicher Kenngrößen des ÖPNV mit Straßen-, Stadt- und U-Bahnen bis 2030 im Referenzszenario .....	91
Tabelle 13 Entwicklung der Preise für Fahrstrom und Kraftstoffe im Zeitraum 2008 bis 2030 auf Preisbasis 2008 im Referenzszenario .....	94
Tabelle 14 Kraftstoffeinsparungen bzw. Mehrverbrauch einzelner Maßnahmen für neu zugelassene Linienbusse in den Jahren 2020 und 2030 im Vergleich zu heutigen Dieselnbussen (bezogen auf den Verbrauch in l/100 km) im Referenzszenario.....	97
Tabelle 15 Kraftstoffeinsparungen für in den Jahren 2020 und 2030 neu zugelassene Linienbusse mit Diesel- und Erdgasmotor sowie Diesel-Hybridbusse im Vergleich zu heutigen Diesel- bzw. Erdgasbussen (bezogen auf den Verbrauch in l/100 km) im Referenzszenario.....	98

Schlussbericht

Tabelle 16 Stromeinsparungen der gesamten Flotte an Straßen, Stadt- und U-Bahnen in Deutschland in den Jahren 2020 und 2030 im Referenzszenario im Vergleich zu 2008 bzw. 2010 .....	102
Tabelle 17 CO <sub>2</sub> - und CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionsfaktoren für Strom in den Jahren 2020 und 2030 einschließlich Verteilungsverluste .....	104
Tabelle 18 Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs und der spezifischen CO <sub>2</sub> -Äquivalente des ÖPNV und des Pkw-Verkehrs in Deutschland im Zeitraum 2008 bis 2030 im Referenzszenario .....	115
Tabelle 19 Übersicht der Szenarien [eigene Darstellung].....	120
Tabelle 20 Entwicklung der Preise für Fahrstrom und Kraftstoffe im Zeitraum 2008 bis 2030 auf Preisbasis 2008 in den Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien.....	127
Tabelle 21 Kraftstoffeinsparungen bzw. Mehrverbrauch einzelner Maßnahmen für neu zugelassene Linienbusse in den Jahren 2020 und 2030 im Vergleich zu heutigen Dieseln (bezogen auf den Verbrauch in l/100 km) in den beiden Energieeffizienzsznarien.....	128
Tabelle 22 Kraftstoffeinsparungen für in den Jahren 2020 und 2030 neu zugelassene Linienbusse mit Diesel- und Erdgasmotor sowie Diesel-Hybridbusse im Vergleich zu heutigen Dieseln im Szenario Energieeffizienz und erneuerbare Energien bezogen auf den Gesamtverbrauch in l/100 km .....	129
Tabelle 23 Stromeinsparungen der gesamten Flotte an Straßen-, Stadt- und U-Bahnen in Deutschland in den Jahren 2020 und 2030 im „EffizienzszENARIO mittel“ im Vergleich zu 2008 bzw. 2010 .....	132
Tabelle 24 CO <sub>2</sub> - und CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionsfaktoren für Strom in den Jahren 2020 und 2030 einschließlich Verteilungsverluste in den Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien.....	134
Tabelle 25 Entwicklung der spezifischen Gesamt-CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen pro Platz-km (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für Verkehrsmittel des ÖPNV und für den Pkw-Verkehr 2008 bis 2030 im Referenzszenario sowie in den Szenarien Energieeffizienz + erneuerbare Energien .....	143
Tabelle 26 Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs des ÖPNV und des Pkw-Verkehrs pro Platz-km in Deutschland im Zeitraum 2008 bis 2030 im Referenzszenario sowie den beiden Effizienzsznarien .....	149
Tabelle 27 Kapitaldienst, Werkstattkosten, Kraftstoffkosten und gesamte Fahrzeugkosten von Stadt-Solobussen in Abhängigkeit der Antriebstechnologie in % bezogen auf einen Diesel-Euro V-Bus .....	156
Tabelle 28 Entwicklung der Verkehrsleistung des Öffentlichen Straßenpersonenverkehrs (ÖSPV) nach dem Referenzszenario von Prognos/Progrtrans bis 2050 (Stand Oktober 2011) .....	160

Tabelle 29 CO <sub>2</sub> - und CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionsfaktoren für Strom in den Jahren 2020 und 2030 einschließlich Verteilungsverluste in den Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien.....	164
Tabelle 30 Kraftstoffeinsparungen bzw. Mehrverbrauch einzelner Maßnahmen für neu zugelassene Linienbusse im Jahr 2050 im Referenzszenario und im „Effizienzscenario hoch“ im Vergleich zu heutigen Dieseln (bezogen auf den Verbrauch in l/100 km) im Referenzszenario.....	165
Tabelle 31 Kraftstoffeinsparung der Neuzulassungen der konventionellen Busse und der Hybridbusse in Deutschland in den Jahren 2040 und 2050 im Referenzszenario und „Effizienzscenario hoch“ im Vergleich zu 2010.....	166
Tabelle 32 Stromeinsparungen der gesamten Flotte an Straßen-, Stadt- und U-Bahnen in Deutschland in den Jahren 2040 und 2050 im Referenzszenario und „Effizienzscenario hoch“ im Vergleich zu 2010 .....	176
Tabelle 33 Stromverbrauch der gesamten Flotte an Straßen-, Stadt- und U-Bahnen in Deutschland in den Jahren 2020 und 2050 im Referenzszenario und „Effizienzscenario hoch“ im Vergleich zu 2008 .....	176
Tabelle 34 Jährliche Einsparpotentiale an Endenergieverbrauch und an CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen des öffentlichen Personennahverkehrs im „Effizienzscenario hoch + EE“ im Jahr 2050 gegenüber 2008.....	184
Tabelle 35 Überblick über die konkreten Handlungsmöglichkeiten der verschiedenen Akteure für mehr Klimaschutz im ÖPNV .....	195

## 0 Kurz-Zusammenfassung

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2020 um 40 % gegenüber dem Stand von 1990 zu verringern. Die Rolle des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV), also kommunale Verkehre mit Straßen-, Stadt- und U-Bahnen sowie mit Bussen im Linienverkehr, bei der Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele im Verkehr ist Gegenstand dieses Forschungsprojektes, das von Hamburg-Consult und Öko-Institut zusammen mit der Technischen Universität Berlin als Unterauftragnehmer im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) durchgeführt wurde, assoziiert als Kooperationspartner ist der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV).

### **Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen 1990 bis 2008**

Zur Ist-Analyse wurden neben vorhandenen Datenquellen ausführliche Befragungen von 13 Verkehrsunternehmen herangezogen. Es zeigt sich, dass der Energieverbrauch durch Effizienzmaßnahmen um ca. 15 % pro Platzkilometer (Pkw -13 %) sank. Erneuerbare Energien spielten bisher kaum eine Rolle. Bei den CO<sub>2</sub>-Äquivalenten spielt der ÖPNV seinen Umweltvorteil aus; sie liegen um ca. 45 – 53 % (Personen-km in 2008) unter denen des Pkw.

### **Effizienzmaßnahmen und Maßnahmen zum Ausbau erneuerbare Energien bis 2030**

Umfangreiche Recherchen und zahlreiche Expertengespräche bis hin zu einem Experten-Workshop mit Fahrzeugherstellern und ÖPNV-Unternehmen waren Bestandteil der Untersuchungen zu künftigen Effizienzmaßnahmen, zum Einsatz erneuerbarer Energie und zu möglichen Umsetzungsszenarios. Drei Fälle wurden betrachtet (Abbildung 1):

- **Referenzszenario:** ohne aktive Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz.
- **Effizienzscenario mittel:** mit allen ökonomisch sinnvollen Effizienzmaßnahmen
- **Effizienzscenario hoch:** auch mit ökonomisch grenzwertigen/geförderten Maßnahmen

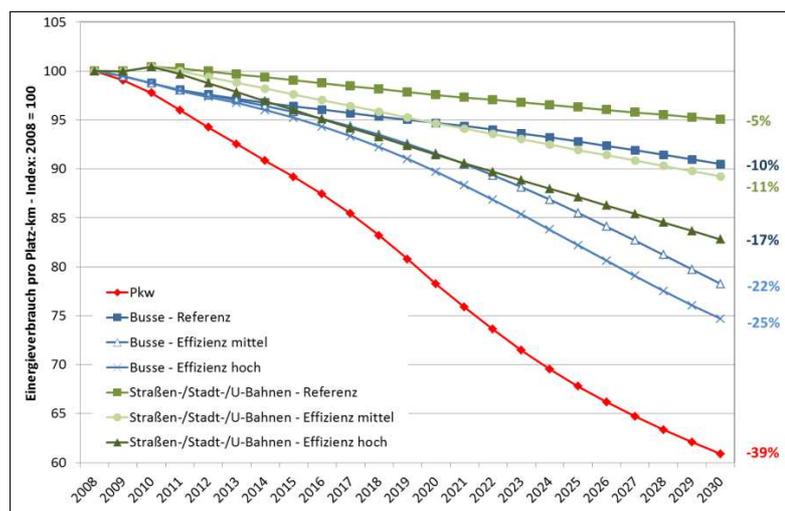
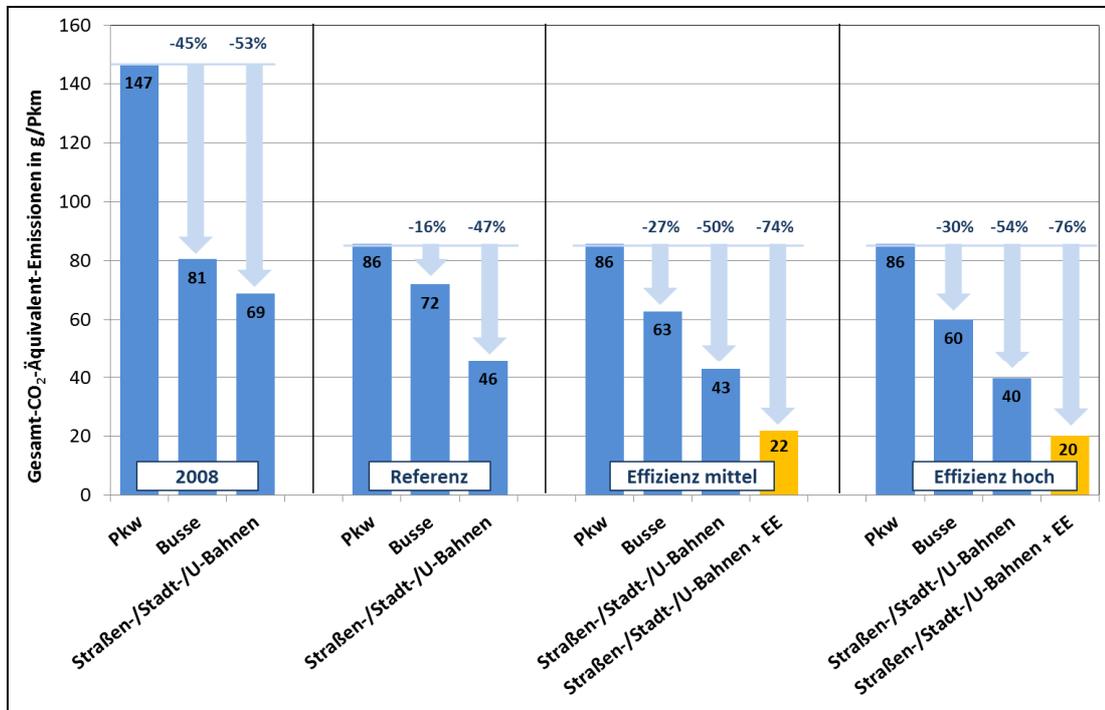


Abbildung 1 Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs pro Platz-km für Verkehrsmittel des ÖPNV und Pkw-Verkehrs (Index: 2008 = 100) [eigene Berechnungen]

In Abbildung 2 dargestellt sind die zugehörigen spezifischen Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen in den einzelnen Szenarios und die Wirkung des Ausbaus erneuerbarer Energien (EE) bei der Stromversorgung.



**Abbildung 2 Spezifische Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer des ÖPNV- und Pkw-Verkehrs 2008 im Referenzszenario und in den Effizienzszenarios 2030 [eigene Berechnungen], Stromanteil erneuerbarer Energien 45 % (orange: 67 %)**

Während ohne weitere effizienzsteigernde Maßnahmen für die ÖPNV-Unternehmen die Energiekosten aufgrund allgemeiner Trends steigen werden, 0,42 Mrd. Euro von 2012 bis 2020 sowie 1,3 Mrd. Euro von 2012 bis 2030 werden prognostiziert, kann dieser Anstieg bereits im Szenario „Energieeffizienz mittel“ fast ausgeglichen werden. Mehrkosten für stärker regenerativ erzeugten Strom fallen nach heutiger Prognose noch bis 2030 an. Die Analysen zeigen also im Ergebnis: Die Steigerung der Energieeffizienz rechnet sich für die ÖPNV-Unternehmen bereits mittelfristig, der Umstieg auf regenerativ erzeugten Strom erst langfristig.

Zusätzlich gilt: Die in Deutschland angestrebte Energiewende mit vollständiger Substitution der Stromerzeugung durch erneuerbare Energien ist nur möglich, wenn der Energieverbrauch deutlich reduziert wird. Hier können die ÖPNV-Unternehmen nicht hinten an stehen.

### **Der Blick in die ferne Zukunft**

Für den Zeitraum nach 2030 wird bei Straßen-, Stadt- und U-Bahnen der Energieverbrauch weiter reduziert, insbesondere durch den Einsatz von Energiespeichern. Im Busverkehr wird eine Entwicklung hin zu rein elektrisch betriebenen Bussen erwartet, mit Hybridbussen als wichtigem Zwischenschritt. Weil der ÖPNV insgesamt damit rein elektrisch betrieben wird und mit dem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien in der Stromversorgung seine

Schlussbericht

Treibhausgasemissionen nochmals deutlich sinken, kann der Umweltvorteil des ÖPNV dadurch langfristig gesichert werden.

**Einflussmöglichkeiten von Politik, Aufgabenträgern und ÖPNV-Unternehmen**

Warum werden Investitionen in energiesparende Technologien nicht umgesetzt, obwohl sie sich in der Regel rechnen? Als Hemmnisse wurden identifiziert: Mangelnde Informationen über Effizienztechnologien, Technologierisiken (Zuverlässigkeit, fehlende Fachexpertise) beschränkter finanzieller Handlungsspielraum der Unternehmen, zu lange Amortisationszeiten der Maßnahmen, aufwendige Technologieentwicklungen, konkurrierende Ziele, fehlende Standards sowie geringe Bereitschaft der Kunden, Mehrpreise zu akzeptieren.

Was können die einzelnen Akteure tun, um diese Hemmnisse abzubauen (siehe Tabelle 1)?

Politik	Bei neuen Technologien nicht nur Pilot- und Demonstrationsvorhaben fördern, sondern auch sicherstellen, dass sie den Weg in den Markt finden  Abgestimmte Förderprogramme  Standards und klare Zielvorgaben setzen
Aufgabenträger	Energieeffizienz und erneuerbare Energien stärker in Ausschreibungen/Direktvergaben berücksichtigen. Ausschreibungskriterien dürfen nicht ökologisch kontraproduktiv sein.
VDV	Informationsdefizite in Bezug auf Energieeffizienzmaßnahmen und erneuerbare Energien abbauen
ÖPNV-Unternehmen	konsequenter Maßnahmen unter Einbezug der gesamten Lebenszykluskosten bewerten

**Tabelle 1 Handlungsmöglichkeiten der einzelnen Akteure im Überblick**

**Fazit**

Der Klimavorteil des ÖPNV bleibt bis 2030 erhalten, auch wenn die Unternehmen lediglich in gleichem Ausmaß wie bisher die Energieeffizienz steigern und die Treibhausgasemissionen reduzieren; allerdings holt der Pkw-Verkehr deutlich auf.

Aber Passivität wird die ÖPNV-Unternehmen viel Geld kosten. Um 1,3 Mrd. Euro werden die Energiekosten der Unternehmen von 2012 bis 2030 steigen, wenn sie sich nicht aktiv für Energieeffizienz und erneuerbare Energien einsetzen. Um den Umweltvorteil auch langfristig zu sichern, muss der mit der Hybridisierung eingeschlagene Weg der Elektrifizierung der Busse – unabhängig von der Art der Umsetzung (batterieelektrisch und/oder O-Bus-System) – nach 2030 konsequent weiter verfolgt werden.

Hier weisen die Klimaschutzziele der Bundesregierung und die wirtschaftlichen Interessen der Unternehmen in die gleiche Richtung.

*Schlussbericht*

Trotzdem haben sich die wenigsten Unternehmen bisher im erforderlichen Umfang auf den Weg gemacht. In diesem Vorhaben wurden die Hemmnisse identifiziert, die dem bisher im Wege standen. Damit bietet sich die Chance, eine positive Entwicklung in Gang zu bringen.

# 1 Einführung

## 1.1 Projekthintergrund

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, die Treibhausgas - Emissionen in Deutschland bis 2020 um 40 % gegenüber dem Stand von 1990 zu verringern. Als zentrale Maßnahmen zur Erreichung dieses Zieles sind die Nutzung der erneuerbaren Energien und eine verbesserte Energieeffizienz vorgesehen. Grundsätzlich nicht spezifiziert ist der Beitrag einzelner Sektoren wie beispielsweise des Bereiches „Verkehr“. Zwar wurde festgeschrieben, dass der „Verkehr“ einen angemessenen Beitrag zum Ziel liefern soll, ohne jedoch konkrete sektorspezifische Ziele zu definieren.

In Orientierung an den Zielen des Energiekonzepts der Bundesregierung erarbeitet das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) derzeit zwei Szenarien für den Bereich „Verkehr“, in dem mögliche Einsparpotentiale identifiziert und bewertet werden. Damit soll aufgezeigt werden, welche Potentiale für den Klimaschutz nutzbar gemacht werden können. Aktuell wird hierzu ein Referenz-Szenario erarbeitet, das vor allem die Maßnahmen des Integrierten Energie- und Klimaprogramms (IEKP) evaluiert. Zusätzlich zu diesem Referenz-Szenario wurde ein Positiv-Szenario erarbeitet, das zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen untersuchen soll, die über diejenigen des Referenz-Szenarios hinaus gehen. Aspekte dieses Positiv-Szenarios sind die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien und die Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Personennahverkehr. Beide Themen sollen in diesem Forschungsprojekt für die folgenden Verkehrsarten detailliert untersucht werden:

- konventionelle Dieselbusse einschließlich des Einsatzes von Biokraftstoffen und Möglichkeiten der Hybridisierung des Antriebsstranges,
- Erdgasbusse einschließlich des Einsatzes von Biogas,
- Oberleitungsomnibus (O-Busse/Trolley-Busse),
- Stadt- und Straßenbahnen sowie
- U-Bahnen,

da es derzeit keine Studien in Deutschland gibt, die ganzheitlich die Energieeffizienzpotentiale sowie die Steigerungsmöglichkeiten des Einsatzes erneuerbarer Energieträger speziell für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) untersucht haben. Ausgeschlossen sind S-Bahnen sowie weitere im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) eingesetzte Zugarten und LPG- oder Wasserstoffbusse.

Zwar gibt es diverse Untersuchungen zu Einzeltechnologien, beispielsweise Bus-Hybrid-Technologien, oder zu einzelnen Verkehrsträgern wie Bussen<sup>1</sup> in Bezug auf die genannten

---

<sup>1</sup> So wurde beispielsweise derzeit in Kooperation mit dem VDV die Studie „Strategische Optimierung von Linienbusflotten“ erstellt, die Umwelt- und Kosteneffekte verschiedener Technologien für Linienbusse detailliert untersucht hat. Siehe: Pütz, R.: Strategische Optimierung von Linienbusflotten. Düsseldorf: Alba Fachverlag, 2010.

Fragestellungen. In den übergeordneten zusammenführenden Studien wie TREMOD<sup>2</sup> werden sie jedoch allenfalls am Rande betrachtet.

Die Erkenntnisse aus diesem Forschungsprojekt sind umso bedeutender, da auf Basis der genannten Studien erwartet wird, dass in Zukunft der Klimavorteil des ÖPNV sich im Vergleich zum Pkw deutlich reduzieren wird. Für eine langfristige und nachhaltige Sicherung der Mobilität muss es aber auch darum gehen, die Potentiale des ÖPNV hinsichtlich Energieeffizienzpotentialen und dem Einsatz der erneuerbaren Energien zu forcieren und systematisch zu erschließen. Der Vergleich zum Pkw verdeutlicht, dass der ÖPNV in diesen Feldern noch bisher unerschlossene Potentiale aufweist. Bei Diskussionen zur Verkehrsverlagerung vom motorisierten Individualverkehr (MIV) auf den ÖPNV muss eigentlich vorausgesetzt werden, dass diese Potentiale weitestgehend erschlossen sind.

## 1.2 Zielstellung

Ziel des Forschungsprojektes „Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien sowie die Steigerung der Energieeffizienz im ÖPNV“ ist es, den Akteuren aus Bund, Ländern, Kommunen und Aufgabenträgern sowie ÖPNV-Unternehmen Handlungsmöglichkeiten aufzuzeigen, die Treibhausgas – Emissionen bis 2020 bzw. 2050 weiter zu senken sowie den Anteil an erneuerbaren Energien zu erhöhen.

Potentialabschätzungen zur Energieeffizienz und zum Einsatz regenerativer Energien sind derzeit meist losgelöst von einer detaillierten Analyse des Status quo und der noch nicht umgesetzten Potentiale bekannter Maßnahmen.

Um auch in diesem Sinne vollständige Potentialanalysen durchzuführen, bedarf es einer Rückkopplung mit der Branche. Nur wenn detailliert bekannt ist, welche Maßnahmen bereits mit welchem Durchdringungsgrad umgesetzt sind, können zukünftige Klimaschutzpotentiale des ÖPNV ermittelt werden. Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) hat zwar in den letzten Jahren damit begonnen, in den jährlichen Befragungen der Mitgliedsunternehmen systematisch auch das Thema Umwelt- und Klimaschutz aufzunehmen; diese Erkenntnisse sind bisher aber noch nicht adäquat in die entsprechenden Analysen zum ÖPNV eingeflossen. Ein Teilziel muss es daher sein, den Umsetzungsstand von Effizienzmaßnahmen und den derzeitigen Einsatz von erneuerbaren Energien systematisch zu erheben.

Konkretisierungsbedarf besteht auch hinsichtlich des Einsatzes erneuerbarer Energien im ÖPNV. Die Erhebungen des VDV zeigen, dass immer mehr ÖPNV-Unternehmen für U- und Straßenbahnen regenerativ erzeugten Strom einsetzen. Aus Sicht des Klimaschutzes muss der Bezug des regenerativen Stroms bei ÖPNV-Unternehmen zu realen Minderungen von Treibhausgas-Emissionen führen. Dies kann nach Auffassung verschiedener Wissenschaftler

---

<sup>2</sup> Transport Emission Modell: im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickeltes Verkehrsemissionsmodell

nur durch zusätzliche, neue Anlagen zur Erzeugung erneuerbaren Stroms gewährleistet werden.<sup>3</sup>

All die derzeitigen Diskussionen zeigen, dass sowohl der Stand des Einsatzes erneuerbarer Energien als auch die unter Klimagesichtspunkten optimale Strategie für den ÖPNV bisher nur unzureichend untersucht wurden.

### 1.3 Aufbau des Berichtes

Den Aufbau des Berichtes zeigt im Überblick Tabelle 2.

Kapitel	Inhalt
<b>0. Zusammenfassung</b>	Zusammenfassende Betrachtung
<b>1. Einführung</b>	Hintergrund und Zielstellung
<b>2. Methodisches Vorgehen</b>	Datengrundlagen und Modelle
<b>3. Entwicklungen im ÖPNV seit 1990 bis heute</b>	Status Quo Energieverbrauch, THG-Emissionen, Effizienzpotentiale und Einsatz EE
<b>4. Maßnahmen zur zukünftigen Steigerung der Energieeffizienz und der erneuerbaren Energien im ÖPNV</b>	Maßnahmenbeschreibung zur Senkung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen bis 2030
<b>5. Entwicklung des ÖPNV im Referenzszenario bis 2030</b>	Potentialbetrachtung EE und Energieeffizienz ohne besondere Schwerpunktsetzung
<b>6. Entwicklung des ÖPNV im Szenario Energieeffizienz und erneuerbare Energien bis 2030</b>	Potentialbetrachtungen EE und Energieeffizienz mit Schwerpunktsetzung
<b>7. Entwicklung des ÖPNV bis 2050</b>	Potentialbetrachtung zur Senkung der THG-Emissionen nach 2030 bis 2050
<b>8. Einflussmöglichkeiten von Politik, Aufgabenträgern und ÖPNV-Unternehmen</b>	Hemmnisse und Handlungsmöglichkeiten
<b>9. Zusammenfassung und Ausblick</b>	Resümee und Ausblick
<b>10. – 12. Verzeichnisse und Anhang</b>	Literatur-, Abkürzungsverzeichnis und Anhänge

**Tabelle 2 Aufbau des Berichts**

<sup>3</sup> Siehe hierzu: Seebach, D. (Öko-Institut); Pehnt, M. (ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg); Irrek, W. (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie); Seifried, D. (Büro Ö-Quadrat): Umweltnutzen von Ökostrom: Vorschlag zur Berücksichtigung in Klimaschutzkonzepten. Diskussionspapier. Freiburg, Heidelberg, Wuppertal: 2009.

*Schlussbericht*

Der einleitende Teil, nach der wie üblich vorangestellten Zusammenfassung, beginnt im ersten Kapitel mit der Einführung in das Thema, dem Projekthintergrund und der Zielstellung. Außerdem wird der Aufbau des Berichtes skizziert.

Das zweite Kapitel stellt das methodische Vorgehen im Projekt dar. Neben den Details zur Verwendung der Datenquellen werden die erarbeiteten Rechenmodelle zum Fahrstrom und Kraftstoff näher vorgestellt.

Die Entwicklungen im ÖPNV seit 1990 bis heute sind Gegenstand des dritten Kapitels. Dabei werden die Entwicklungen in den Themenfeldern Energieverbrauch, Treibhausgas-Emissionen, erneuerbare Energien und bisher realisierte Energieeffizienzpotentiale beschrieben.

Im vierten Kapitel werden die Maßnahmen erläutert, die zu einer Steigerung der Energieeffizienz und des Anteils erneuerbaren Energien bis 2030 führen.

Die zukünftigen Entwicklungen ohne zusätzliche Impulse beleuchtet das fünfte Kapitel. Hierbei wird ein Referenzszenario beschrieben, bei dem keine besondere Schwerpunktsetzung auf die Themen Energieeffizienz und erneuerbare Energien gelegt wird.

Das sechste Kapitel beschäftigt sich mit dagegen mit einem Szenario, bei dem Energieeffizienz und erneuerbare Energien bewusst in den Mittelpunkt der Entscheidungen der ÖPNV-Unternehmen gestellt werden.

Im siebten Kapitel werden mögliche Minderungen der Treibhausgasemissionen bis 2050 untersucht. Vorausgesetzt werden dabei, dass Verkehrsunternehmen nach 2030 weiterhin Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz umsetzen und den Anteil erneuerbarer Energie erhöhen.

Mit den Einflussmöglichkeiten von Bund, Ländern, Kommunen, Aufgabenträgern und ÖPNV-Unternehmen beschäftigt sich das achte Kapitel. Zunächst werden Hemmnisse beschrieben, die dem derzeit noch existierenden Umweltvorteil des ÖPNV entgegenwirken. Anschließend werden konkrete Handlungsmöglichkeiten für Politik, Aufgabenträger und ÖPNV-Unternehmen aufgezeigt.

Resümee und Ausblick bilden den Abschluss des Berichtes im neunten Kapitel.

## 2 Methodisches Vorgehen

### 2.1 Datenquellen

In diesem Forschungsprojekt wurde auf verschiedene Datenquellen zurückgegriffen, da Daten zum Energieverbrauch des öffentlichen Personennahverkehrs für Deutschland nicht an einer Stelle spezifisch erfasst werden.

#### 2.1.1 Datengrundlagen

Eine Quelle waren die jährlich erhobenen statistischen Daten des **Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen** (VDV). Hinzu kommen drei Sondererhebungen des VDV in den Jahren 2006, 2009 und 2010, in welchen der Energieverbrauch für die eingesetzten Busse, Straßen-/Stadtbahnen, U-Bahnen und Bahnen besonderer Bauart (z. B. Wuppertaler Schwebbahn) erhoben wurde [VDV 2007, 2010 und 2011]. Auch wurde in diesen Sondererhebungen der Anteil des Stromes aus erneuerbaren Energien für den elektrisch betriebenen ÖPNV und Kenngrößen bezüglich des Einsatzes von alternativen Kraftstoffen bei ÖPNV-Busunternehmen abgefragt [VDV 2007 und 2010; Pfeiffer 2010] und dem Projektkonsortium zur Verfügung gestellt. Diese Energiedaten decken allerdings für den Busbereich nur einen Teil des Gesamtenergieverbrauches aller ÖPNV-Unternehmen in Deutschland ab; außerdem liegen diese Daten bisher nur für die drei genannten Jahre vor.

Als weitere Quelle, die jährlich für den gesamten ÖPNV in Deutschland den Energieverbrauch ermittelt und auf dieser Basis die Treibhausgas-Emissionen ausweist, ist das sogenannte „**Transport Emission Modell**“ (**TREMOD**). TREMOD als Modell zur Berechnung der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland wurde im Jahr 1993 vom Umweltbundesamt (UBA) initiiert. Die wissenschaftliche Betreuung des Emissionsmodells wird vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu) wahrgenommen [ifeu 2005 und 2010]. TREMOD ist die wichtigste Datenbasis für die Berechnung der Gesamt- und Durchschnittsemissionen der Verkehrsträger in Deutschland. Im Frühjahr 2011 wurde die TREMOD-Version 5.22 veröffentlicht, die zum Herbst 2011 nochmals aktualisiert wurde (Version 5.24). TREMOD weist die jährlichen Energieverbräuche und Gesamtemissionen differenziert nach Verkehrsträgern und einzelnen Verkehrsmitteln in Deutschland aus. Durch die Verbindung dieser Werte mit Fahr- und Verkehrsleistungsdaten der einzelnen Verkehrsträger ergeben sich auch durchschnittliche Energieverbräuche bzw. CO<sub>2</sub>- oder CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen je Fahrzeug- bzw. Personenkilometer.

Um die Gesamtenergieverbräuche und Treibhausgas-Emissionen des Verkehrs in Deutschland zu berechnen, fließen in das Modell Daten aus dem Handbuch der Emissionsfaktoren (HBEFA), den Studien des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), den Fachserien des Statistischen Bundesamtes, die teilweise noch durch Verbands- und Unternehmensstatistiken ergänzt werden (z. B. VDV, DB AG) sowie Daten zum Kfz-Bestand und zu den Kfz-Neuzulassungen des Kraftfahrt-Bundesamtes ein. Diese Energieverbräuche werden schließlich mit den von der AG Energiebilanzen für

Schlussbericht

Deutschland ausgewiesenen Energieverbräuchen abgeglichen. Gegebenenfalls erfolgt bei einer Abweichung die Korrektur einzelner Parameter (z. B. Fahrleistungen).

TREMODO enthält neben dem Energieverbrauch für folgende Treibhausgas Emissionsdaten:

- Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>),
- Methan (CH<sub>4</sub>) und
- Distickstoffoxid / Lachgas (N<sub>2</sub>O).

Andere im Kyoto-Protokoll eingeschlossene Treibhausgas wie z. B. teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW) und perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW) werden über TREMOD nicht erfasst. Diese Treibhausgas spielen in der Regel bei Kältemittelverlusten von z. B. Klimaanlage eine Rolle. TREMOD berücksichtigt aber ausschließlich verbrennungsbedingte Emissionen; Kältemittelverluste sind daher nicht enthalten. Die Summe der Treibhausgasemissionen wird im Rahmen dieser Studie als so genannten CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen ausgewiesen. Hierzu werden die Emissionen der einzelnen Treibhausgas über ihre Treibhausgaswirkung (Global Warming Potential -GWP) gewichtet und zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen addiert. Beispielsweise hat Methan ein GWP von 25. Dies bedeutet, dass 1 kg Methanemissionen 25 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen entspricht.

Im Gegensatz zu vielen anderen Untersuchungen werden in TREMOD die direkten Emissionen am Fahrzeug einschließlich der Verdunstungs- und Kaltstartemissionen ebenso wie diejenigen Emissionen, die in der energetischen Vorkette durch Förderung und Transport der Primärenergieträger, Umwandlung in Kraftwerken und Raffinerien, Transport bis zum Stromabnehmer bzw. zur Tankstelle entstehen, bilanziert. Der Einbezug der Emissionen der Energievorkette ist notwendig, da sonst ein Vergleich der verschiedenen Verkehrsmittel kaum möglich ist – elektrisch betriebene Verkehrsmittel würden sonst keine direkten Emissionen aufweisen. In dieser Studie werden ausschließlich die Gesamtemissionen einschließlich Vorkette (well-to-wheel) ausgewiesen.

Viele Analysen zum Energieverbrauch und zu den Treibhausgasemissionen des ÖPNV in Deutschland basieren auf TREMOD. Der Vergleich der Daten für Straßen-, Stadt- und U-Bahnen hat aber gezeigt, dass die zugrunde liegenden Energieverbrauchsdaten nur für die Jahre 2006 bis 2009 auf Messwerten basieren. Zudem decken CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen der Stromproduktion für die aktuellen Jahre nicht mehr den Trend zu einem steigenden Anteil erneuerbarer Energien ab. Aus diesem Grund wurden die Daten für den Bereich der Straßen-, Stadt- und U-Bahnen lediglich als Ausgangspunkt für ein eigenes, im Rahmen dieses Forschungsprojektes entwickeltes Emissionsmodell verwendet. Dieses basiert auf eigenen Werten zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Stromproduktion sowie auf Detailanalysen zum Energieverbrauch einzelner Verkehrsunternehmen (siehe unten).

Beim Busbereich wurden die spezifischen Verbrauchswerte pro Busklasse dem TREMOD-Modell und damit indirekt dem Modell HBEFA entnommen. Allerdings wurden diese Verbrauchswerte in ein eigenes Bestandsmodell eingespeist, das von höheren Bestandszahlen für Busse des ÖPNV und von einer anderen Verteilung der Busgrößenklassen ausgeht (siehe Kapitel 2.3.2). Die für die ÖPNV-Busse in diesem Vorhaben

ermittelten Gesamtenergieverbräuche und Gesamtreibhausgasemissionen liegen somit über den Werten von TREMOD; die spezifischen Werte pro Bus-Kilometer sind hingegen in der gleicher Größenordnung.

Um die Energieverbräuche für den Zeitraum 1990 bis 2008 qualifiziert abbilden zu können und die Energieeffizienzpotentiale abschätzen zu können, wurde neben den Daten des VDV und von TREMOD auch auf bereits realisierte und geplante **Einzelmaßnahmen von 10 Verkehrsunternehmen** in Deutschland, die dem Projektkonsortium vorliegen, zurückgegriffen. Mit dieser Datengrundlage werden, bezogen auf die Zugkilometer, bereits Maßnahmen von 27 % aller Verkehrsunternehmen in Deutschland<sup>4</sup> erfasst. Diese Einzelmaßnahmen bilden die Grundlage zur Erarbeitung der beiden Rechenmodelle für Fahrstrom und Kraftstoff (siehe Kapitel 2.2.1 und 2.2.2).

### 2.1.2 Zusätzliche eigene Datenerhebungen (Interviews und Workshop)

Um die vorhandene lückenhafte Datenbasis zu ergänzen und eine größere statistische Sicherheit zu erreichen, wurden im Laufe des Projektes weitere Verkehrsunternehmen hinsichtlich ihres Energieverbrauchs für Busse sowie für den elektrisch betriebenen ÖPNV, ihres Einsatzes erneuerbarer Energien sowie ihrer Energieeffizienzmaßnahmen befragt. Bei insgesamt 13 Verkehrsunternehmen wurden Interviews mit dem Ziel durchgeführt, die Einsparpotentiale und den Erfüllungsgrad einzelner Effizienzmaßnahmen herauszufinden. Außerdem wurden Angaben zum Einsatz erneuerbarer Energien und zum Energieverbrauch abgefragt.

In einem Workshop am 16.9.2011 in Berlin mit den Experten der befragten Verkehrsunternehmen aus den Bereichen Schiene, Busse und Infrastruktur sowie mit Vertretern von Verbänden und Fahrzeugherstellern von Bussen und Schiene wurden erste Untersuchungsergebnisse hinsichtlich zukünftiger Potentiale für die Minderung von Treibhausgas-Emissionen im ÖPNV vorgestellt und zur Diskussion gebracht.

Die Erkenntnisse aus den Interviews sowie die Rückkopplungen aus der Branche im Rahmen des Workshops sind in die Ergebnisse des Vorhabens eingeflossen.

---

<sup>4</sup> Grundlage bilden die Verkehrsunternehmen in Deutschland, die Straßen-, Stadt- und/oder U-Bahnen betreiben [VDV 2010].

## 2.2 Differenzierung durch Modellbildung

Wesentlicher Bestandteil dieses Forschungsprojektes ist die Ermittlung von Energieeffizienzpotentialen für den ÖPNV. Zum einen lassen sich anhand bereits realisierter Maßnahmen in Verkehrsunternehmen deren unterschiedlichem Stand der Umsetzung sowie den damit erzielbaren Effizienzpotentialen Rückschlüsse auf den Energieverbrauch und die Treibhausgas-Emissionen seit 1990 ziehen. Zum anderen ist auch eine Abschätzung zukünftiger Einsparpotentiale anhand geplanter Energieeinsparmaßnahmen möglich. Ziel ist es, sowohl für den elektrisch betriebenen ÖPNV als auch den ÖPNV mit Verbrennungsmotoren festzustellen, welche Entwicklung der Energieverbrauch und die Treibhausgas-Emissionen

- anhand bisher realisierter Energieeffizienzpotentiale sowie dem Umsetzungsstand der Maßnahmen (Referenzentwicklung),
- anhand weitergehender Umsetzung bereits existierender Maßnahmen,
- anhand derzeit noch nicht verfügbarer Technologien und Maßnahmen genommen haben bzw. nehmen werden (siehe Abbildung 3).

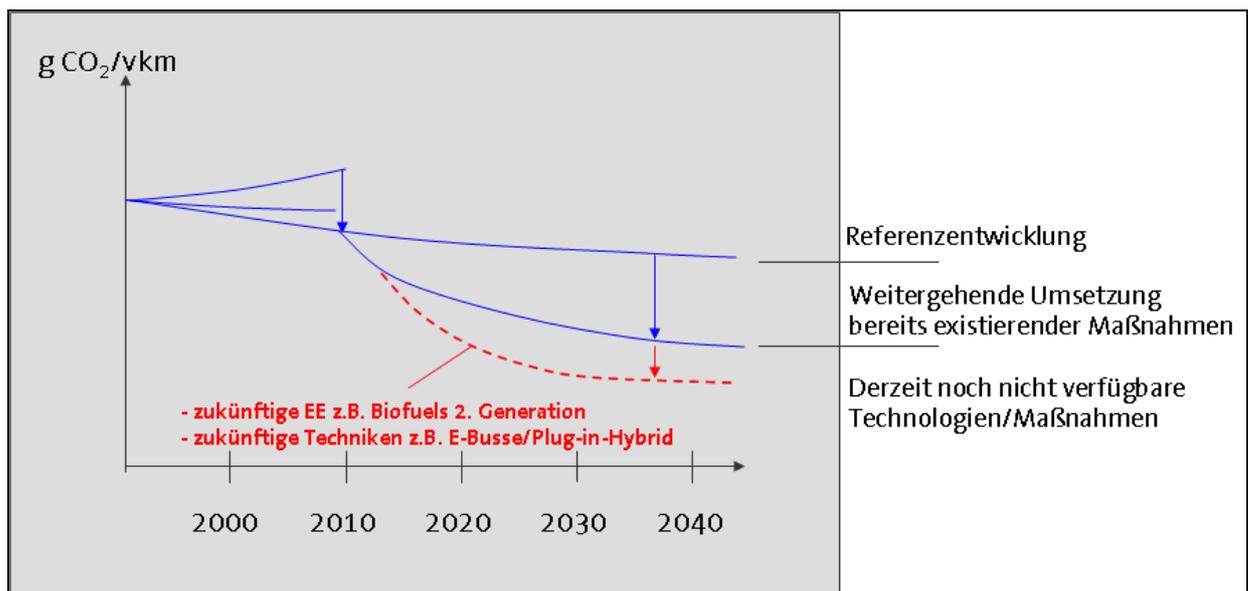


Abbildung 3 Projektverständnis [Eigene Darstellung]

Für die Ermittlung der Energieeffizienzpotentiale wurden für den elektrisch betriebenen ÖPNV und den ÖPNV mit Verbrennungsmotoren Rechenmodelle entwickelt, die anhand von

- Verbrauchsanteilen,
- Erfüllungsgrad und
- Einsparpotentialen von Maßnahmen

erkennen lassen, wie sich diese Maßnahmen auf den Gesamt-Strom- bzw. Kraftstoffverbrauch eines Verkehrsunternehmens auswirken. Die Rechenmodelle für Fahrstrom und Kraftstoff werden in den folgenden Kapiteln beschrieben. Das methodische Vorgehen zur Erstellung der

Rechenmodelle ist in Anhang 1 Methodisches Vorgehen zur Erstellung der Rechenmodelle dargestellt.

### **2.2.1 Fahrstrom-Rechenmodell**

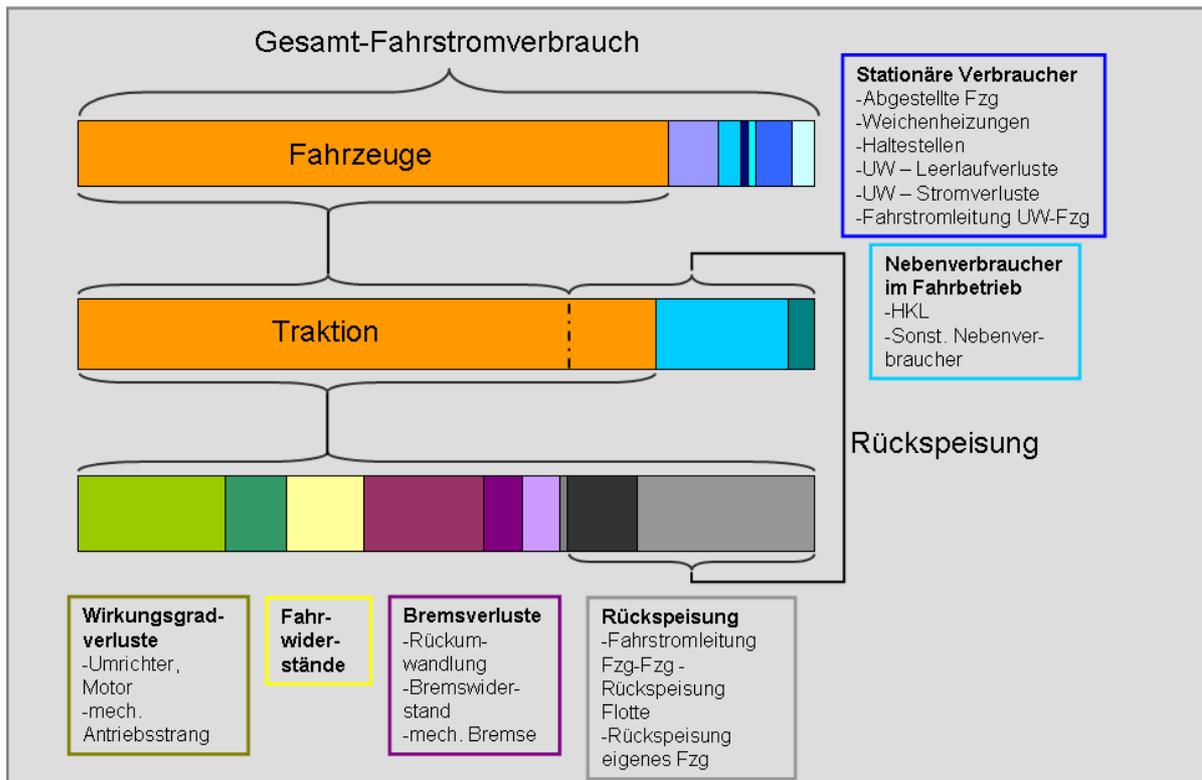
Als Systemgrenze für die Betrachtung des elektrisch betriebenen ÖPNV hinsichtlich der Effizienzpotentiale wird der Fahrstromverbrauch, gemessen an den Übergabepunkten vom Energieversorgungsunternehmen (EVU) in das Netz der Verkehrsunternehmen, angenommen. Er bildet die Eingangsgröße des Modells. Betrachtet werden für den Fahrstromverbrauch alle Fahrzeuge und die für den Betrieb erforderliche Infrastruktur eines Verkehrsunternehmens.

Energieeffizienzmaßnahmen wirken auf bestimmte Fahrstromverbraucher. Um die Wirkung dieser Maßnahmen abschätzen zu können, muss daher bekannt sein, welchen Anteil diese Verbraucher am Gesamtverbrauch haben.

Gibt es Potentiale, die zu einem Minderverbrauch anderer Energieträger führen (z. B. bei der Abwärmenutzung), wird dies gewertet als wenn anstelle des tatsächlichen Energieträgers der Fahrstrom im Verbrauch gemindert würde und die damit verbundene methodische Unschärfe (anderer Primärenergieeinsatz) vernachlässigt. Haltestellen und weitere betriebliche Anlagen wie Weichenheizungen, die zum Teil mit Fahrstrom betrieben werden, sind Teil des Systems, weil sie zum Betrieb der Straßen-, Stadt- und U-Bahnen gehören.

Das Fahrstrom-Rechenmodell ist dreistufig aufgebaut (siehe Abbildung 4):

- Stufe 1: Gesamtstromverbrauch für Fahrzeuge und stationäre Verbraucher
- Stufe 2: Gesamtstromverbrauch des Fahrzeuges für Traktion und Nebenverbraucher
- Stufe 3: Stromverbrauch für Traktion im Detail



**Abbildung 4 Aufbau des Fahrstrom-Rechenmodells [Eigene Darstellung]**

Verbrauchsminderungen durch geplante oder umgesetzte Maßnahmen werden nicht durchgehend auf den Gesamt-Fahrstromverbrauch (Stufe 1), sondern auch auf das Fahrzeug (Stufe 2) oder auch allein auf die Traktion (Stufe 3) bezogen angegeben. Durch das dreistufige Modell können alle diese Angaben berücksichtigt werden. Es deckt sich mit erfahrbaren bzw. messbaren Betrachtungsebenen und technischen Schnittstellen.

Mit Hilfe dieses dreistufigen Verfahrens können Angaben zu prozentualen Minderungen, die sich auf die 3. Stufe beziehen, auf den Gesamt-Fahrstromverbrauch (1. Stufe) umgerechnet werden. Dabei wurden folgende Grundannahmen getroffen:

- Ein ideales **Fahrzeug**, das nachts an dieselbe Abstellposition zurückkehrt, die es morgens verlassen hat, hat weder kinetische noch Lageenergie benötigt, weil es insgesamt in gleichem Maße beschleunigt und verzögert hat und Steigungen und Gefälle sich insgesamt ausgleichen. Der gesamte „Fahr“-Strom wird also entweder zum Ausgleich von Verlusten verwendet oder nicht zum Fahren, sondern beispielsweise zum Heizen oder für die Beleuchtung. Vor diesem Hintergrund wird im Modell nicht unterschieden zwischen „Verbrauchern“ und „Verlusten“ sondern es werden Energiewandler betrachtet, die alle einen Anteil des Fahrstromes nutzen. Das Fahren selbst findet statt, kommt aber, wie oben begründet, im Modell nicht vor. Die in der Bewegung zwischengespeicherte kinetische Energie wird im Wesentlichen im Bremswiderstand vernichtet oder bei der Rückspeisung genutzt.

- Bei der **Rückspeisung** gibt es nicht nur das eigene Fahrzeug als Quelle, sondern, da keine Zwischenspeicherung stattfindet, notwendigerweise auch andere Fahrzeuge der Flotte als Abnehmer. Im Jahresdurchschnitt und über die gesamte Flotte betrachtet lässt sich also ein gedachtes Fahrzeug vorstellen, dass scheinbar einen Anteil seiner Traktionsenergie selbst wieder nutzt. Es findet also eine Art virtuelle Zwischenspeicherung innerhalb der Fahrzeugflotte statt.

## 2.2.2 Kraftstoff-Rechenmodell

Inwieweit technische Minderungsmaßnahmen wie Motoroptimierung, Aerodynamik oder Energieoptimierung der Nebenaggregate Wirkungen auf den Gesamtenergieverbrauch eines Busses haben, hängt entscheidend auch davon ab, an welchen Stellen beim Bus Energieverluste auftreten. Abbildung 5 zeigt dies beispielhaft anhand eines Sankey-Diagramms für einen Dieselbus. Die einzelnen Bestandteile können jedoch abhängig von der Fahrsituation deutlich variieren. Trotzdem eignet sich die Darstellung gut, um den Einfluss von Einzelmaßnahmen auf das Gesamtsystem bewerten zu können. Es wird zudem deutlich, dass die größten Energieverluste mit nahezu zwei Dritteln am Motor selbst entstehen. Daneben spielen die Nebenaggregate (über >10 %) und Fahrwiderstände (>5 %) eine wesentliche Rolle. Die Verluste am Antriebsstrang schlagen mit fast 5 % zu Buche.

Im Gegensatz zum Fahrstrom-Rechenmodell ist das Kraftstoff-Rechenmodell somit lediglich ein einstufiges Modell. Prozentuale Kraftstoffeinsparungen von einzelnen Bereichen (z. B. bei den Nebenaggregaten) können über die prozentualen Anteile der Bereiche, wie sie in Abbildung 5 aufgeführt sind, direkt auf die Kraftstoffeinsparungen auf Busebene umgerechnet werden. Auf die genannten Einsparpotentiale wird in Kapitel 4.1.1.1 im Einzelnen eingegangen.

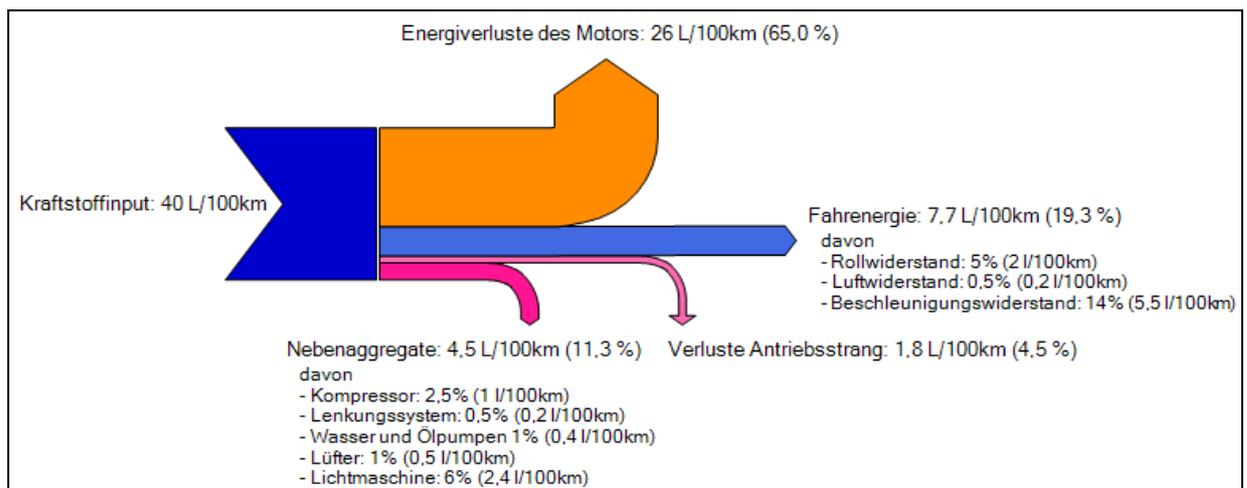


Abbildung 5 Sankey-Diagramm der Energieverluste beim Dieselbus [eigene Darstellung]

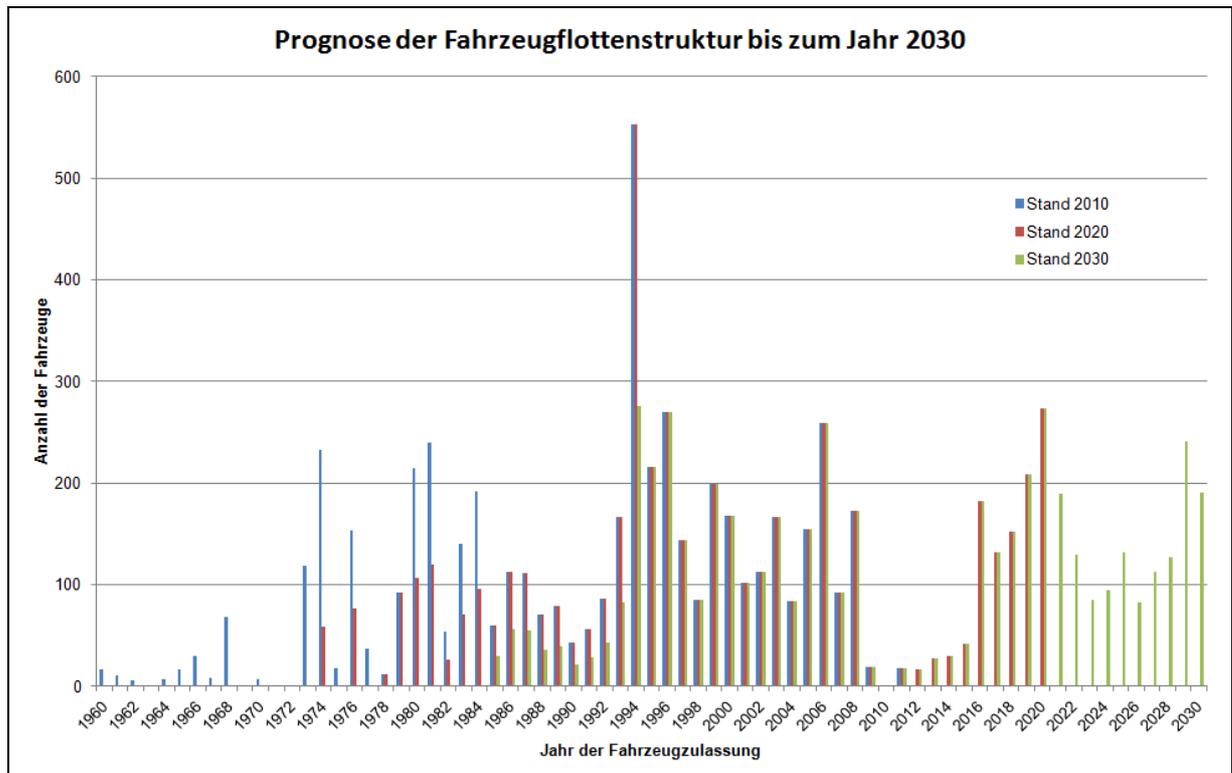
## **2.3 Ergänzende Untersuchung zum Fahrzeugbestand**

### **2.3.1 Straßen-, Stadt- und U-Bahnen**

Im Workshop (siehe Kapitel 2.1.2) wurde die schubweise erfolgende Fahrzeugbeschaffung im Bereich Straßen-, Stadt- und U-Bahnen thematisiert. Als Gründe dafür wurden die gleichzeitigen Beschaffungen vieler Fahrzeuge im Rahmen von Förderprogrammen wie dem Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) oder massiven Streckenausbauten (Stadtbahnära) und die lange Lebensdauer der Fahrzeuge (32 - 40 Jahre) benannt. Diese Prägung der Beschaffungsprozesse erschwert die Prognose über die Ausnutzung von Effizienzpotentialen solange nicht abgeschätzt werden kann, wie viele Fahrzeuge bis 2020 in Deutschland noch ausgetauscht oder modernisiert werden.

Deshalb wurde eine detaillierte Bestandsaufnahme der Fahrzeugflotten (Straßen-, Stadtbahnen/U-Bahnen) im Bundesgebiet basierend auf einem mehrschichtigen Vorgehen vorgenommen. Dazu gehören intensive Recherchen in Printmedien und Fachforen („Stadt- und Straßenbahnen“ Geramont Verlag; strassenbahnen.de; etc), die Befragungen von Fachleuten und telefonische Interviews von Verkehrsbetrieben zusätzlich zu den vorliegenden Informationen aus den bereits durchgeführten Interviews. Die Nutzung der Effizienzpotentiale, kann jetzt mit Hilfe des im Rahmen des Forschungsprojekts erstellten Berechnungsmodells in sinnvollen Zeitschritten ermittelt und dargestellt werden.

So kann auch eine Fortschreibung der Verbrauchsentwicklung über das Jahr 2020 hinaus deutlich genauer erfolgen. Die Erhebung zur Fahrzeugflottenstruktur wurde für die Jahre 2006 und 2011 durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Erhebung sind grafisch in der Abbildung 43 dargestellt. Die so gewonnene Altersstruktur der Fahrzeugflotte wurde im ersten Schritt bis zum Jahr 2030 fortgeschrieben. Dabei wurde in Jahresschritten überprüft, ob Fahrzeuge das Alter von 35 Jahren überschreiten. Für die Fahrzeuge im Bestand, die dieses Alter überschritten haben wird ein dreijähriger Abstellungsprozess eingeleitet, bei dem in jedem Jahr die Anzahl der Fahrzeuge im Bestand halbiert wird. Sinkt die Anzahl der Fahrzeuge im Ausmusterungsprozess unter 30, werden die Fahrzeuge dieses Alters im Folgejahr vollständig aus dem Betrieb genommen. Zeitgleich erfolgt auf Basis der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Annahmen zum Fahrzeugbedarf ein Neubeschaffungsprozess. Das Ergebnis dieser Modellierung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 6 Prognose der Fahrzeugflottenstruktur (SSU) bis zum Jahr 2030 [eigene Berechnung]**

Beruhend auf den Wartungsfristen 8 bzw. 16 Jahre werden die Energiebedarfe der Fahrzeuge neu berechnet. Ausschlaggebend ist dabei das Fahrzeugalter im Jahr 2010. Fahrzeuge die zu diesem Zeitpunkt älter als 20 Jahre sind, erhalten auf Grund der geringen Restlebensdauer nur deutlich weniger kostenintensive Überholungen als Fahrzeuge, die diesem Zeitpunkt nicht älter als 10 Jahre sind. Die Maßnahmen, die im Rahmen der Fahrzeugüberholung auf die jeweiligen Fahrzeuge angewendet werden, sind in den Kapitel 5.2.2 und 6.2.2 beschrieben. Für die Straßen und U-Bahnfahrzeuge werden die gleiche Altersstruktur und Alterungsprozesse im Modell hinterlegt. Dafür wird die Infrastruktur beider Verkehrssysteme differenzierter betrachtet. Der Alterungsprozess der Infrastruktur wird linearisiert. Das heißt, dass die Austauschprozesse von Unterwerken und Haltestelleneinrichtungen gleichmäßig verteilt stattfinden.

### 2.3.2 Busse

Wie bei den Straßen-, Stadt- und U-Bahnen gelangen effiziente Technologien nur langsam über die jährlichen Neuzulassungen in den Fahrzeugbestand. Um diese Diffusion neuer Technologien bzw. verbrauchsarmer Technologien abbilden zu können, wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein eigenes Busbestandsmodell für den ÖPNV aufgebaut. Der Busbestand für den ÖPNV wurde auf die Ergebnisse der Fahrleistungserhebung des Jahres 2002 abgestellt [IVT 2004]. Demnach waren in Deutschland im Jahr 2002 rund 58,1 Tausend

Linienbusse angemeldet (einschließlich vorübergehend still gelegter Fahrzeuge), wovon 39,3 Tausend Standardlinienbusse und 18,8 Tausend Überlandlinienbusse waren. Damit liegt der für das Bestandsmodell zugrunde gelegte Fahrzeugbestand deutlich über dem, der für Linienbusse im Verkehrsemissionsmodell TREMOD (siehe oben) eingeflossen ist (45,3 Tausend Busse) [ifeu 2010].

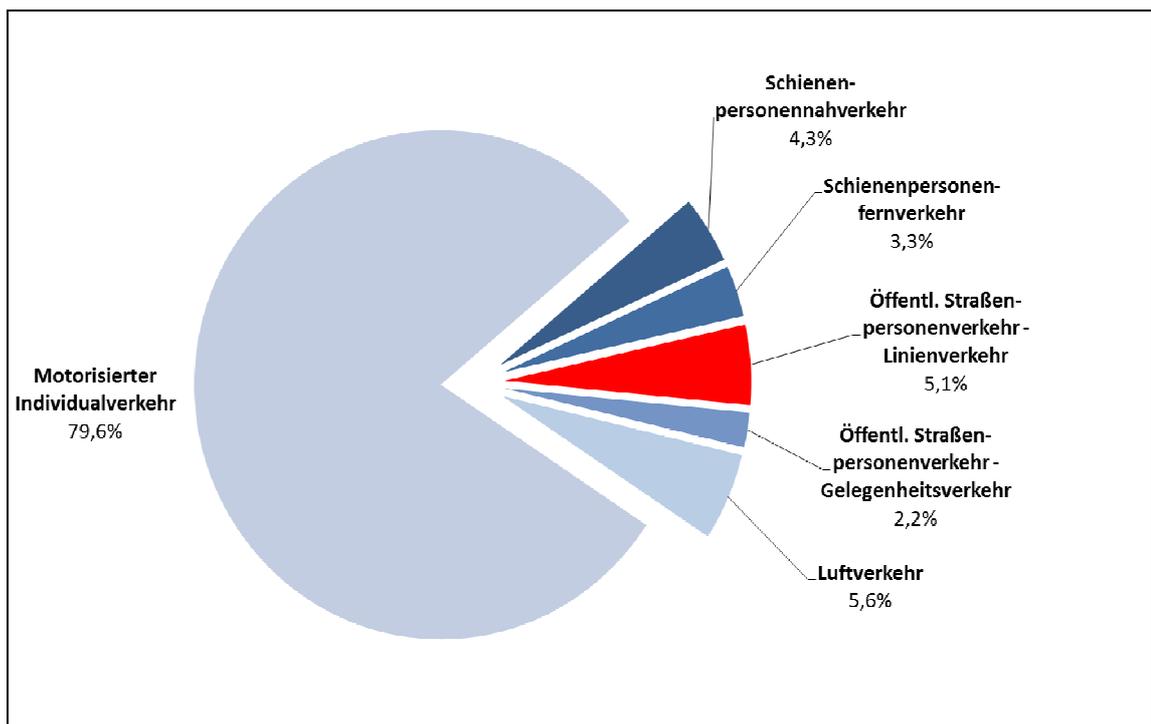
Zur Fortschreibung des Modells wurde die Verteilung der Altersklassen in Abhängigkeit vom Zulassungsjahr zugrunde gelegt. Diese Überlebenskurven wurden dem vom IFEU-Institut entwickeltem Verkehrsemissionsmodell TREMOD für Busse bis zu 18 t zulässiges Gesamtgewicht und für Busse über 18 t zGG entnommen [ifeu 2010]. Insgesamt konnte mit Hilfe der Startbestände und den Überlebenskurven ein Bestandsmodell aufgebaut werden, dass den Busbestand der Jahre 1992 bis 2008, wie er in der Statistik des Kraftfahrt-Bundesamtes ausgewiesen ist, gut erklärt. Für die Fortschreibung über das Jahr 2008 hinaus wurden für die neu zugelassenen Busse die gleichen Überlebenskurven wie für den Altbestand verwendet. Somit konnte allein über die Höhe der jährlichen Neuzulassungen der zukünftige Fahrzeugbestand bis zum Jahr 2030 modelliert werden. Die Annahmen zu den im Rahmen dieses Vorhabens unterstellten Neuzulassungen bis 2030 sind in Kapitel 5.1 dokumentiert.

Für den Zeitraum von 2030 bis 2050 ist die Fortführung des Busbestandsmodells nicht möglich, insbesondere weil davon ausgegangen wird, dass nach 2030 verstärkt alternative Antriebskonzepte wie beispielsweise vollelektrische Busse in den Markt kommen, welche nicht Untersuchungsgegenstand der Studie sind. Aus diesem Grund betrachtet Kapitel 7.2 abweichend von den Straßen-, Stadt- und U-Bahnen nicht den Fahrzeugbestand, dessen Zusammensetzung unbekannt ist, sondern untersucht neu zugelassene Busse und stellt diese dem Pkw-Bestand gegenüber.

### 3 Entwicklungen im ÖPNV seit 1990 bis heute

Auch in den zurückliegenden Jahren haben die ÖPNV-Unternehmen Maßnahmen umgesetzt, die dazu beigetragen haben, den Energieverbrauch und damit auch die Treibhausgasemissionen pro Fahrgast zu reduzieren. Ein wichtiges Motiv für die Unternehmen war in der Vergangenheit die Senkung der Energiekosten. Schließlich entfällt bereits heute beim ÖPNV ein beachtlicher Teil der Kosten auf die Beschaffung von Energie. Im Jahr 2009 haben beispielsweise die Mitgliedsunternehmen des VDV für den Personenverkehr insgesamt 244 Mio. Euro für Fahrstrom und 524 Mio. Euro für Dieselmotorkraftstoff ausgegeben [VDV 2011].

In den folgenden Unterkapiteln wird in Kapitel 3.1 einerseits aufgezeigt, wie sich der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen von 1990 bis 2008 entwickelt haben. Zum anderen wird – soweit dies rückblickend möglich ist – analysiert, was die Gründe für diese Entwicklung waren. Hierbei wird betrachtet, welchen Beitrag einerseits Energiesparmaßnahmen (Kapitel 3.2), andererseits der Einsatz erneuerbarer Energien (Kapitel 3.3) gebracht hat. In Kapitel 3.4 wird ein Zwischenfazit hierzu gezogen.



**Abbildung 7** Anteile der einzelnen Verkehrssegmente an der Gesamtverkehrsleistung im Personenverkehr im Jahr 2008 in Deutschland [ViZ 2011]

Entsprechend der Ausrichtung des gesamten Gutachtens bezieht sich auch die dargestellte Entwicklung lediglich auf den elektrisch betriebenen ÖPNV und den ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor. Wird im Folgenden daher vom ÖPNV gesprochen, sind weder S-Bahnverkehre noch Regionalbahnverkehre enthalten. Betrachtet werden ausschließlich Straßen-, Stadt- und U-Bahnen, Oberleitungsbusse (im Folgenden als O-Busse bezeichnet) sowie Linienbusverkehre mit konventionellem Verbrennungsmotor. Betrachtet

wird somit der in den offiziellen Statistiken ausgewiesene Bereich „Linienverkehr“ des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs. Auf diesen Bereich entfielen im Jahr 2008 rund 55,6 Mrd. Personenkilometer (Pkm) bzw. rund 5 % der Verkehrsleistung des Personenverkehrs in Deutschland (siehe Abbildung 7) [ViZ 2011].

### 3.1 Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen des ÖPNV im Zeitraum von 1990 bis 2008

Der Endenergieverbrauch des ÖPNV ist von rund 49.990 TJ im Jahr 1990 auf rund 46.300 TJ im Jahr 2008 gefallen; dies entspricht einem Rückgang von 7,4 % (siehe Abbildung 8).

Die Verkehrsleistung ist im gleichen Zeitraum sogar um 8,4 % von 60,7 Mrd. Pkm im Jahr 1990 auf 55,6 Mrd. Pkm im Jahr 2008 zurückgegangen. Damit hat sich der spezifische Endenergieverbrauch des ÖPNV bezogen auf die Verkehrsleistung von 0,82 MJ/Pkm im Jahr 1990 leicht um 1,1 % auf 0,83 MJ/Pkm verschlechtert.

Zum Vergleich: Der Endenergieverbrauch des Pkw-Verkehrs in Deutschland belief sich im Jahr 2008 auf rund 1,512 Mio. TJ bei einer Verkehrsleistung von insgesamt 871,6 Mrd. Pkm. Damit ist der spezifische Endenergieverbrauch mit rund 1,73 MJ/Pkm rund doppelt so hoch als der des ÖPNV. Gegenüber 1990 ist allerdings trotz eines Anstiegs der Verkehrsleistung um 28 % der Energieverbrauch des Pkw-Verkehrs lediglich um 4 % gestiegen. Die Energieeffizienz des Pkw-Verkehrs ist damit zwischen 1990 und 2008 um 19 % gestiegen.

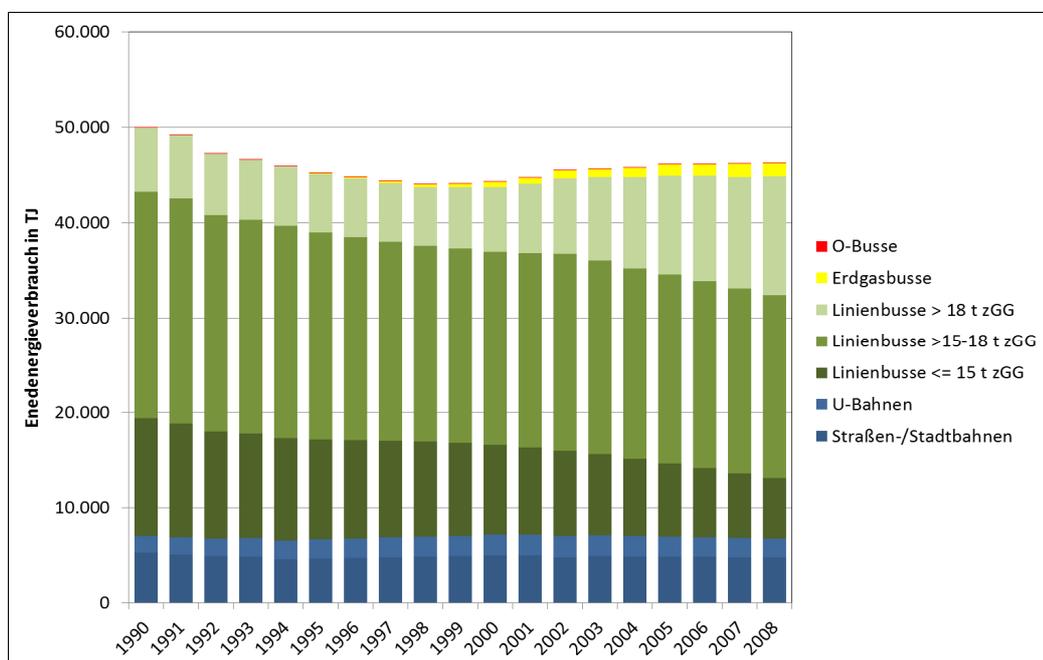


Abbildung 8 Entwicklung des Endenergieverbrauchs des ÖPNV in Deutschland von 1990 bis 2008 [Richter 2011a; HBEFA 2010; Dziambor 2011; Pfeifer 2010; eigene Berechnungen]

Schlussbericht

Der größte Anteil des Energieverbrauchs des ÖPNV entfällt auf die Linienbusse mit konventionellem Dieselmotor. Im Jahr 2008 sind 82,3 % des Endenergieverbrauchs auf sie zurückzuführen. Wie Abbildung 8 zeigt, hat der Energieverbrauch der Linienbusse mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 18 Tonnen in den letzten Jahren stark zugenommen. Allein auf diese Busklasse entfallen 27,0 % des gesamten Endenergieverbrauchs des ÖPNV und damit mehr als auf Straßen-, Stadt- und U-Bahnen zusammen: Letztere verursachen rund 14,6 % des Endenergieverbrauchs – das sind rund 1,88 Mrd. kWh Strom. Die Deutsche Bahn AG verbraucht pro Jahr fast sechsmal so viel Strom (rund 11 Mrd. kWh) [IWES et al. 2011].

Beim Vergleich von elektrisch und mit Diesel betriebenen Verkehrsmitteln ist allerdings zu beachten, dass der Endenergieverbrauch nur eingeschränkt für Vergleiche aussagekräftig ist, da aufgrund der Umwandlungsverluste in den Strom-Kraftwerken deutlich mehr Primärenergie benötigt wird als bei der Herstellung von Kraftstoffen wie z. B. Diesel oder Erdgas. Beim Primärenergieverbrauch liegt der Anteil von Straßen-, Stadt- und U-Bahnen immerhin bei 29,4 % und damit ist der Anteil in einer ähnlichen Größenordnung wie bei der Verkehrsleistung (siehe Abbildung 9). Erdgas- und O-Busse fallen derzeit in Deutschland für den Energieverbrauch des ÖPNV kaum ins Gewicht.

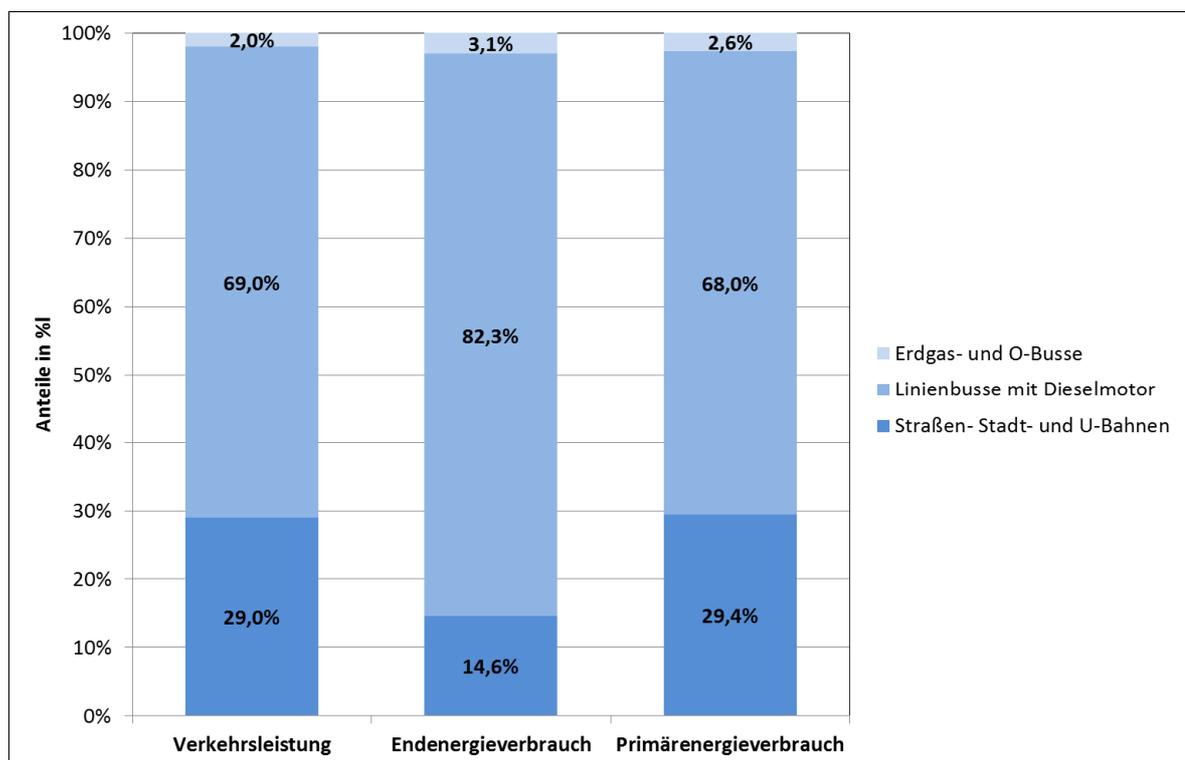


Abbildung 9 Anteil der Verkehrsmittel des ÖPNV an der Verkehrsleistung, des Endenergie- und Primärenergieverbrauchs im Jahr 2008 [ViZ 2011; Richter 2011a; eigene Berechnungen]

Auswertungen zum spezifischen Verbrauch pro Personenkilometer sind allerdings nur bedingt aussagekräftig, um zu analysieren, ob der ÖPNV in den letzten 20 Jahren energieeffizienter geworden ist oder nicht. Bei Zeitreihen von Energieverbrauchswerten pro Personenkilometer wird die Entwicklung der Energieeffizienz durch die Entwicklung der Auslastung überlagert. Gerade im ÖPNV sind nach der Wiedervereinigung die Verkehrsleistung und damit die Auslastung der Verkehrsmittel stark zurückgegangen, weshalb Vergleiche aktueller Verbrauchswerte pro Personenkilometer mit dem Jahr 1990 keine Aussage zur Entwicklung der Energieeffizienz des ÖPNV zulassen. Beim Busverkehr besser geeignet ist die Angabe des spezifischen Energieverbrauchs pro Fahrzeugkilometer. Bei Bussen mit Dieselmotor wird üblicherweise der Energieverbrauch in Liter Diesel pro 100 km angegeben.

Abbildung 10 zeigt die Entwicklung des spezifischen Dieserverbrauchs pro 100 Bus-Kilometer für die drei Busklassen bis 15 t zulässiges Gesamtgewicht (zGG), über 15 bis zu 18 t zGG und über 18 t zGG. Zusätzlich ist in der Abbildung der durchschnittliche Verbrauch gemittelt über alle drei Größenklassen dargestellt. Nach einem Anstieg des spezifischen Dieserverbrauchs in allen drei Größenklassen bis 1994, der unter anderem auf den Ersatz von alten DDR-Bussen in Ostdeutschland durch neuere Busse mit höherem Verbrauch zurückzuführen ist, ist in den Folgejahren der spezifische Kraftstoffverbrauch deutlich gesunken. Insbesondere die Beschaffung neuer Busse führte zu dieser Minderung [ifeu 2001]. So lagen beispielsweise die spezifischen Dieserverbräuche von Bussen mit Abgasstandard Euro I, der seit Oktober 1993 in Europa verbindlich war, zwischen 12 und 18 % niedriger als der von Vor-Euro I-Bussen (siehe auch Tabelle 3) [HBEFA 2010].

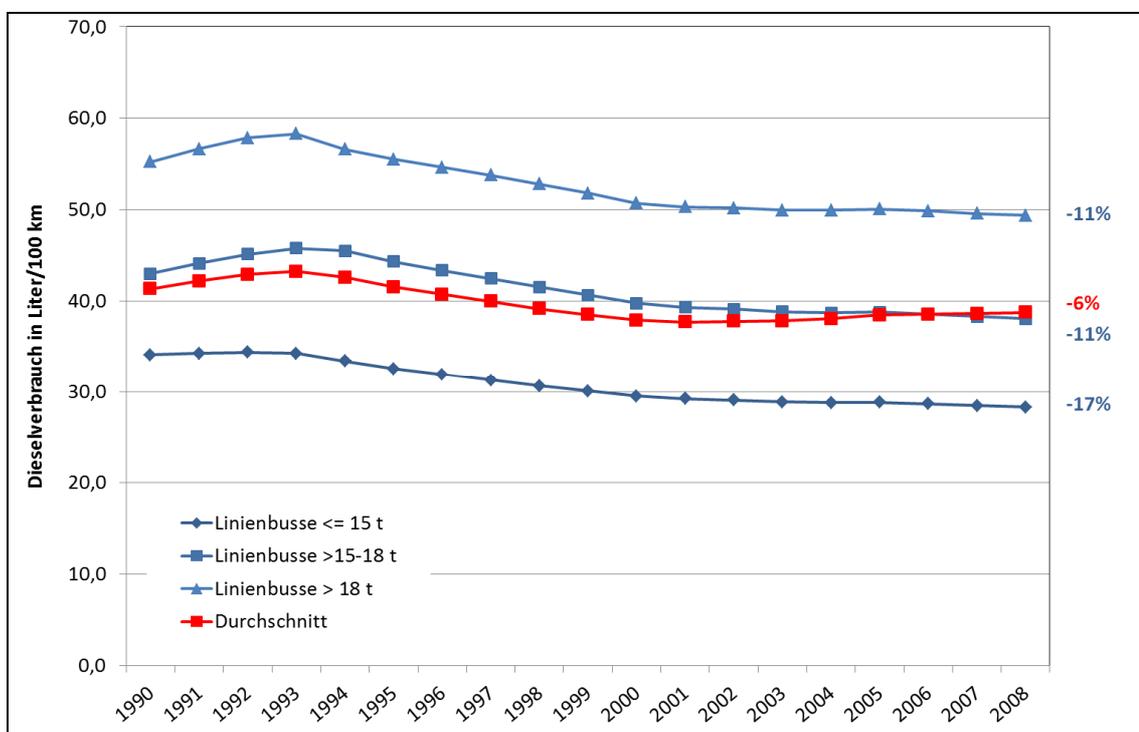


Abbildung 10 Entwicklung des spezifischen Dieserverbrauchs von Linienbusse im Zeitraum 1990 bis 2008 [HBEFA 2010; Richter 2011a; eigene Berechnungen]

Für Linienbusse der Klassen „über 15 bis zu 18 t zGG“ und „über 18 t zGG“ ist der Verbrauch im Zeitraum von 1990 bis 2008 um 11 % gesunken. Der spezifische Dieserverbrauch von Linienbussen bis zu 15 t zGG hat sich in dem gesamten Zeitraum gar um 17 % reduziert. Gemittelt über alle Busklassen ging der Verbrauch allerdings lediglich um 6 % zurück. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in den letzten Jahren der Anteil großer Busse am Bestand stetig zugenommen hat. Lag der Anteil der Linienbusse über 18 t zGG am Gesamtbestand im Jahr 1990 noch bei etwas mehr als 10 %, ist der Anteil heute bereits auf 23 % angestiegen. Die höheren Kraftstoffverbräuche dieser Busse wirken sich somit negativ auf die Gesamteffizienz der Linienbusse – gemessen pro Bus-Kilometer – aus. Um die Effizienzgewinne besser einordnen zu können, ist ein Vergleich mit dem Pkw sinnvoll. Der Kraftstoffverbrauch von Pkw mit Ottomotor sind zwischen 1990 und 2008 um durchschnittlich 10 %, die von Pkw mit Dieselmotor um 12 % gesunken. Die innerhalb einer Busklasse erzielten Verbesserungen liegen damit in ähnlicher Größenordnung wie die der Pkw [Richter 2011a; ifeu 2010].

Abgasstandard	Einheit	Linienbusse bis zu 15 t zGG	Linienbusse über 15 t bis zu 18 t zGG	Linienbusse über 18 t zGG
Vor Euro I	<i>l/100 km</i>	34,1	43,0	55,2
Euro I	<i>l/100 km</i>	28,1	37,5	48,8
Euro II	<i>l/100 km</i>	27,2	36,9	48,3
Euro III	<i>l/100 km</i>	28,8	38,7	49,9
Euro IV	<i>l/100 km</i>	26,9	36,6	48,3
Euro V	<i>l/100 km</i>	27,1	36,8	48,5

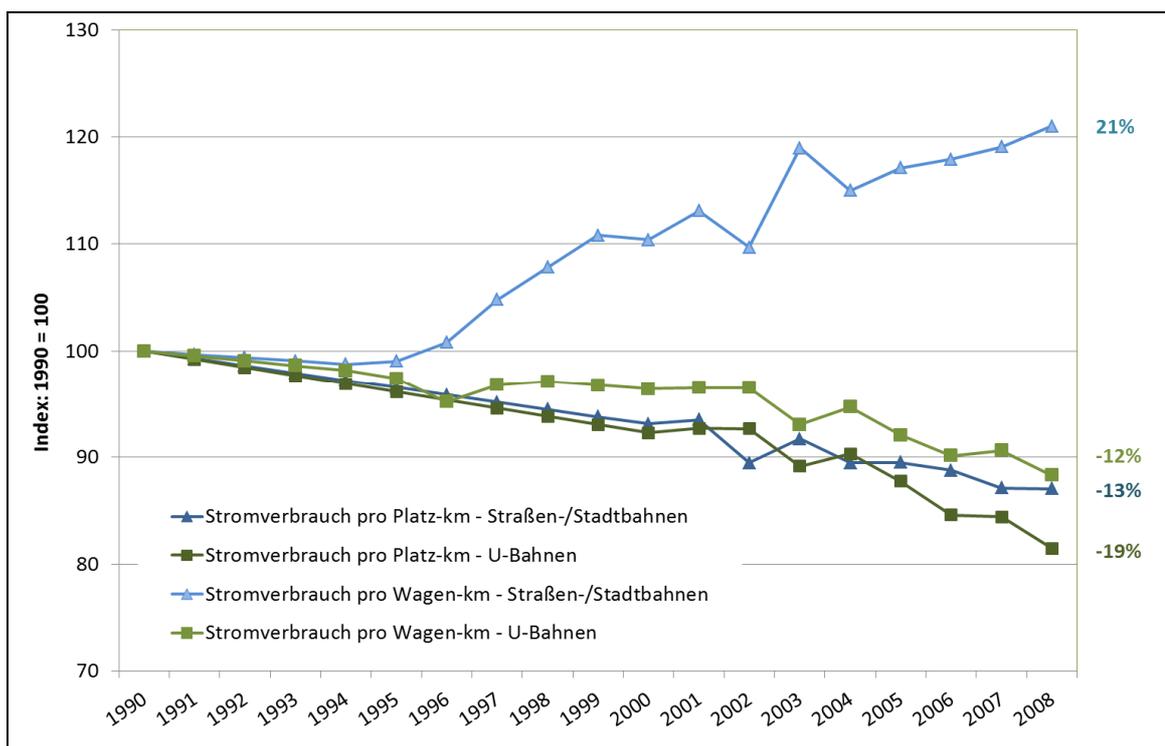
**Quellen:** [HBEFA 2010]; [Richter 2011a]; [ifeu 2010]; eigene Berechnungen.

**Tabelle 3 Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch von neuen Linienbussen nach Größenklassen und Abgasstandards**

Unberücksichtigt bei der bisherigen Betrachtung bleibt allerdings die in den letzten Jahren verstärkt stattgefundenene Ausstattung der Busse mit Klimaanlage. Die oben dargestellten Verbrauchsentwicklungen basieren auf Angaben des Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [HBEFA 2010], die lediglich die Verbräuche ohne Klimaanlage wiedergeben. In einem Workshop mit Busherstellern im Rahmen dieses Forschungsprojektes haben Bushersteller einen Mehrverbrauch von bis zu 1 Liter Diesel pro 100 km genannt [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]. Allerdings waren nach Angaben der BVG in Deutschland im Jahr 1993 nur 5 % aller neuen Stadtbusse klimatisiert; im Jahr 2008 lag der Anteil bereits bei 64 % [BVG 2010a]. Es kann davon ausgegangen werden, dass lediglich ein Drittel der Busse im Bestand mit Klimaanlage ausgestattet sein dürfte. Der durchschnittliche Mehrverbrauch gemittelt über die gesamte Busflotte dürfte damit lediglich bei rund 0,3 Liter Diesel pro 100 km liegen.

Der spezifische Energieverbrauch von Straßen-, Stadt- und U-Bahnen könnte ebenfalls wie bei Bussen pro Fahrzeug-Kilometer und damit pro Zug-Kilometer ausgewiesen werden. Gebräuchlicher ist der Bezug des Stromverbrauchs auf die Wagen-Kilometer, da insbesondere U-Bahnen teilweise mit einer stark fluktuierenden Anzahl von Wagen unterwegs sind. In Abbildung 11 ist daher die Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs pro

Wagen-Kilometer dargestellt. Der Energieverbrauch der Straßen- bzw. Stadtbahnen einerseits und der U-Bahnen andererseits ist hierbei bezogen auf 1990 dargestellt (1990 = 100). Der spezifische Stromverbrauch pro Wagen-Kilometer liegt bei U-Bahnen im Jahr 2008 rund 12 % unter dem Wert von 1990. Bei Straßenbahnen hingegen ist der Stromverbrauch pro Wagen-Kilometer im Zeitraum von 1990 bis 2008 um rund 21 % angestiegen. Zurückzuführen ist dies einerseits auf Fahrzeuge mit höherem Komfort, der zu einem Anstieg des Energieverbrauchs führt (z. B. Klimaanlage, Fahrgastanzeigen etc.). Andererseits – und das ist der Hauptgrund – ist dies auf neue, größere Generationen von Straßen- und Stadtbahnen zurückzuführen, die wesentlich mehr Sitzplätze bieten, die allerdings dadurch pro Wagen-km mehr Energie verbrauchen. Daher ist gerade bei Straßen-, Stadt- und U-Bahnen der Stromverbrauch pro angebotenen Platz-Kilometer eine sinnvolle Kenngröße um den Anstieg der Energieeffizienz zu beschreiben. Im Vergleich zu 1990 ist der Stromverbrauch pro Platz-km bei den Straßen- und Stadtbahnen um 13 %, bei U-Bahnen sogar um 19 % gesunken. Verursacht ist das durch den Ersatz von Schaltwerksteuerungen mit Anfahrwiderständen durch Stromrichtersteuerungen (mit Leistungshalbleitern). Im Jahr 2008 liegt damit der Stromverbrauch für Straßen- und Stadtbahnen bei 24,4 Wh pro Platz-km, der von U-Bahnen bei 17,9 Wh pro Platz-km.

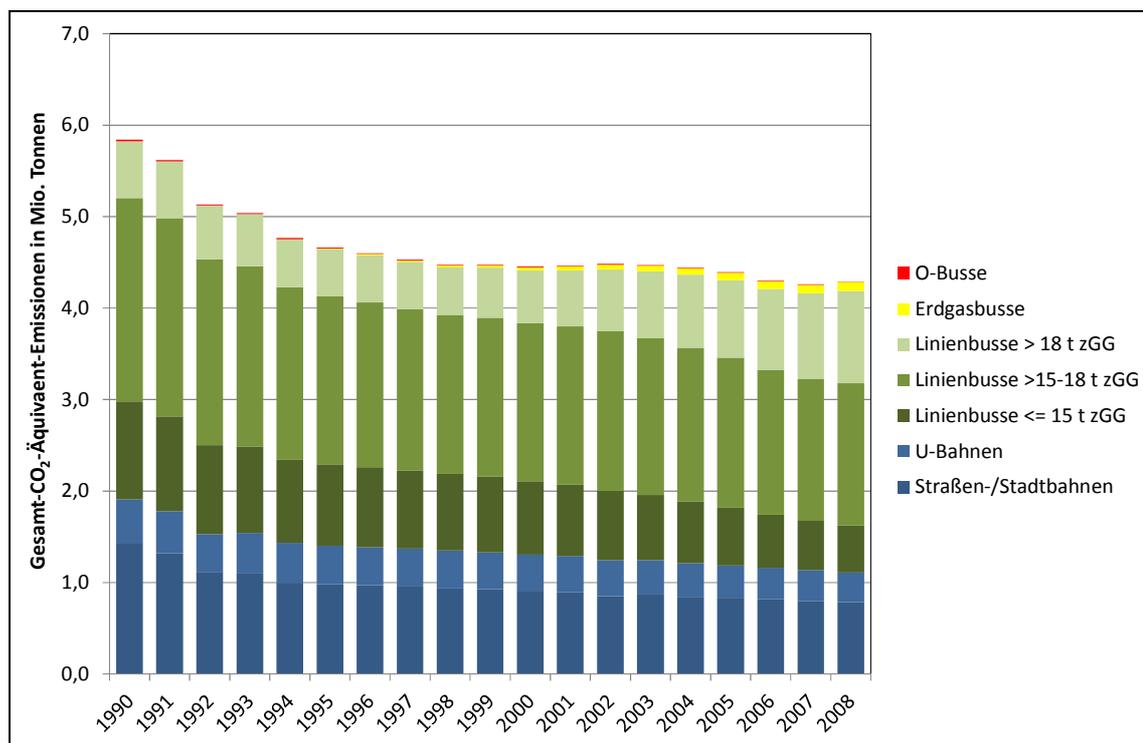


**Abbildung 11** Indizierte Entwicklung des spezifischen Stromverbrauchs pro Wagen- und Platz-Kilometer für Straßen-/Stadtbahnen sowie U-Bahnen im Zeitraum 1990 bis 2008 (Index: 1990 = 100) [Dziambor2011; Richter 2011a; Pfeifer 2010; VDV 2011; eigene Berechnungen]

Schlussbericht

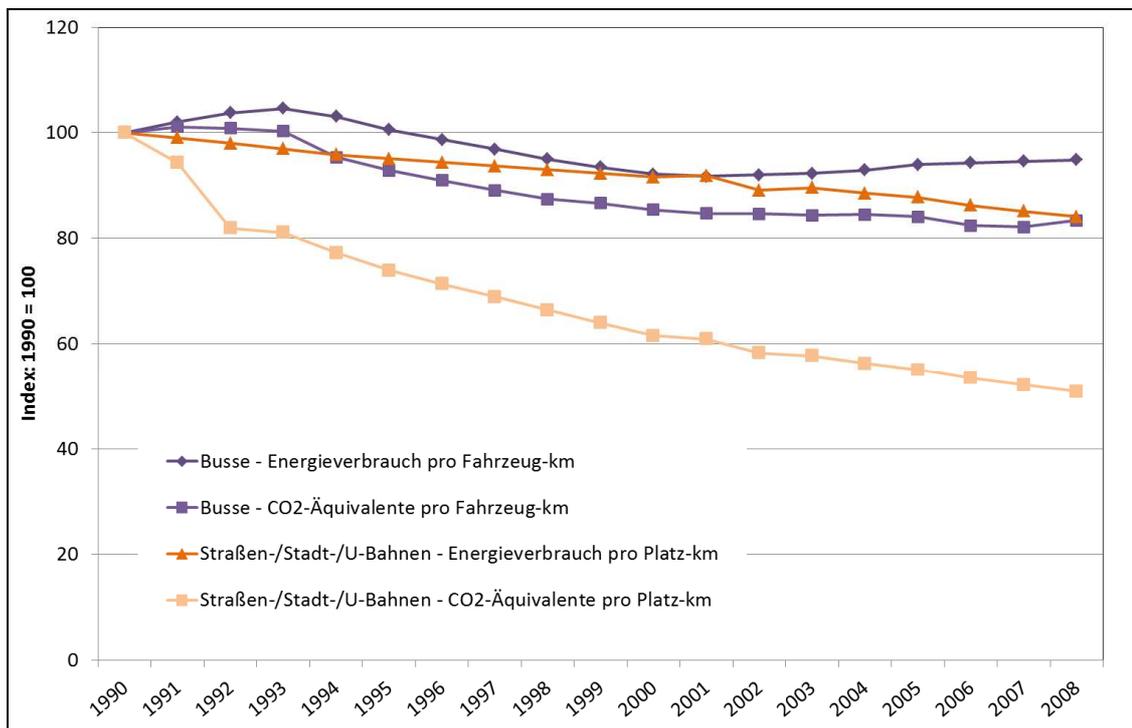
Die sich aus dem Energieverbrauch des ÖPNV ergebenden Treibhausgasemissionen für den Zeitraum 1990 bis 2008 sind in Abbildung 12 dargestellt. Die Treibhausgasemissionen werden dabei als CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen ausgewiesen. Wie in Kapitel 2 ausgeführt, werden dabei neben CO<sub>2</sub> auch andere Treibhausgase wie z. B. Methan oder Distickstoffoxid berücksichtigt, auch wenn sie nur kleine Beiträge zum Gesamtergebnis liefern. Neben den direkten verbrennungsbedingten Emissionen (auch als Tank-to-Wheel bezeichnet) sind zudem die indirekten Emissionen, die bei der Herstellung der Kraftstoffe oder des Stroms entstehen, berücksichtigt. Alle Darstellungen im Folgenden beziehen sich in der Regel auf die Gesamtemissionen, die die Summe aus direkten und indirekten Emissionen darstellen (auch als Well-to-Wheel-Emissionen bezeichnet). Dies ist notwendig, da elektrisch betriebene Verkehrsmittel des ÖPNV keine direkten Treibhausgasemissionen besitzen. Unberücksichtigt bleiben bei den folgenden Darstellungen Treibhausgasemissionen durch Kältemittelverluste – auf diese wird am Ende des Unterkapitels in einem Exkurs eingegangen.

Im Jahr 2008 emittierte der ÖPNV in Deutschland rund 4,29 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente. 1990 hat der ÖPNV seine Umwelt noch mit rund 5,84 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente belastet. In den letzten zwei Jahrzehnten hat somit der ÖPNV seinen Klimafußabdruck um rund 27 % reduziert. Während bei den Busverkehren die Minderung gegenüber 1990 mit 19 % unter dem Durchschnitt lag, sanken die Emissionen der Straßen-, Stadt- und U-Bahnen gar um 42 %. Den größten Anteil an den Treibhausgasemissionen im Jahr 2008 haben analog zum Energieverbrauch die Linienbusse mit Dieselantrieb. Die drei Linienbus-Größenklassen zusammen sind für 71,8 % der CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen verantwortlich. Auf Straßen-, Stadt- und U-Bahnen entfallen 25,9 % der Emissionen, auf die übrigen Busantriebskonzepte (Erdgas- und O-Busse) rund 2,3 %. Im Jahr 1990 lag der Anteil der Straßen-, Stadt- und U-Bahnen noch bei 32,7 %. Die Abnahme ist ein Resultat der überproportionalen Abnahme der Treibhausgasemissionen dieser Verkehrsmittel im Betrachtungszeitraum.



**Abbildung 12 Entwicklung der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen des ÖPNV in Deutschland von 1990 bis 2008 [Richter 2011a; HBEFA 2010; Dziambor 2011; Pfeifer 2010; eigene Berechnungen]**

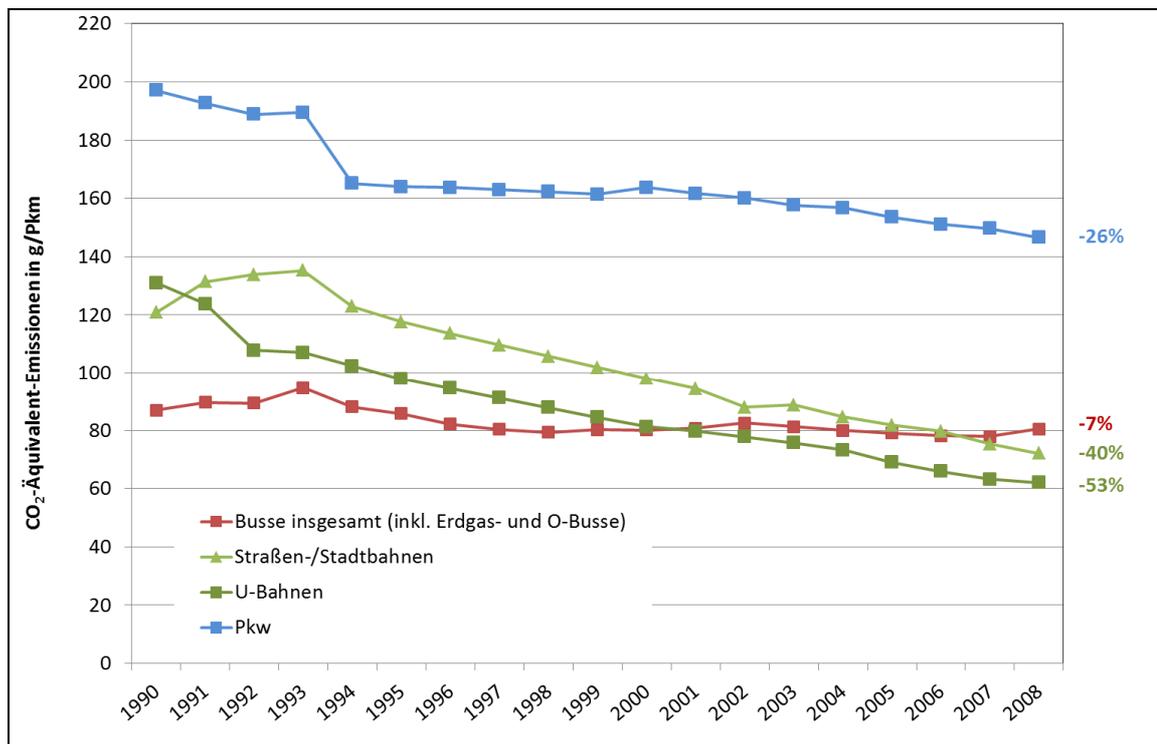
Auffällig in diesem Zusammenhang ist, dass der Rückgang der Treibhausgasemissionen der Straßen-, Stadt- und U-Bahnen deutlich höher ausfiel als der Rückgang des absoluten Endenergieverbrauchs (-4 %). Dies deutet darauf hin, dass die Emissionen des verwendeten Stroms sich deutlich reduziert haben. Dies belegt auch Abbildung 13. In dieser Abbildung ist die auf 1990 indizierte Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs und der spezifischen CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Fahrzeug-Kilometer bei Bussen (einschließlich Erdgas- und O-Busse) bzw. pro Platz-Kilometer bei Straßen-, Stadt- und U-Bahnen angegeben. Der Vergleich zeigt, dass im Busverkehr zwar in den ersten Jahren bis 2004 die spezifischen Treibhausgasemissionen reduziert haben, während der spezifische Endenergieverbrauch gestiegen ist. Die Reduktionen der Treibhausgasemissionen in den Anfangsjahren sind auf die Angleichung der Kraftstoffqualitäten von Ost- und Westdeutschland nach der Wiedervereinigung zurückzuführen. In den Folgejahren sind die jährlichen Veränderungen aber in ähnlicher Größenordnung. Erst in den Jahren ab 2005 sind die Treibhausgasemissionen nochmals zurückgegangen, während der spezifische Endenergieverbrauch gestiegen ist. Hier wirkt sich der Einsatz von Biokraftstoffen vor allem als Beimischung in konventionellem Dieselmotorkraftstoff emissionsmindernd aus.



**Abbildung 13 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs und der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen von Bussen (einschließlich Erdgas- und O-Busse) und Straßenbahnen in Deutschland von 1990 bis 2008 [Richter 2011a; HBEFA 2010; Dziambor 2011; Pfeifer 2010; eigene Berechnungen]**

Bei Straßen-, Stadt- und U-Bahnen zeigt Abbildung 13 eine starke Entkoppelung der Entwicklung der spezifischen Treibhausgasemissionen vom spezifischen Energieverbrauch. Die Reduktionen der Treibhausgasemissionen liegen dabei immer über den Reduktionen des Energieverbrauchs. Ursache ist die Modernisierung des Kraftwerksparks zur Stromerzeugung, der Ersatz von Braunkohle-Kraftwerke in Ostdeutschland durch emissionsärmere Kraftwerke (z.B. Steinkohle, Erdgas) und der verstärkte Einsatz von regenerativen Energien. Die spezifischen Emissionen pro verbrauchte Kilowattstunde (kWh) Strom sind von rund 980 g im Jahr 1990 auf 590 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Jahr 2008 gesunken – dies entspricht einem Rückgang von rund 40 %.

Abbildung 14 zeigt abschließend für Busse (einschließlich Erdgas- und O-Busse), Straßen-/Stadtbahnen sowie U-Bahnen im Vergleich zum Pkw die Entwicklung der spezifischen Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer. Wie bereits oben ausgeführt, fließen bei dieser Art der Darstellung neben Energieeffizienzverbesserungen auch Auslastungsveränderungen mit ein. Gerade der Rückgang der Auslastungen des ÖPNV Anfang der 1990er Jahre in Ostdeutschland führt bei Bussen und Straßen-/Stadtbahnen zu einem Anstieg der spezifischen Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer.



**Abbildung 14 Entwicklung der spezifischen Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer des ÖPNV- und Pkw-Verkehrs in Deutschland von 1990 bis 2008 [Richter 2011a; HBEFA 2010; Dziambor 2011; Pfeifer 2010; eigene Berechnungen]**

Im Vergleich zum Pkw fiel beim Busverkehr der Rückgang der Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer im Zeitraum von 1990 bis 2008 deutlich geringer aus. Aufgrund des viel geringeren Startwertes besteht aber immer noch ein erheblicher Abstand zum Pkw-Verkehr. Die spezifischen Treibhausgasemissionen des Busverkehrs (einschließlich Erdgas- und O-Busse) liegen im Jahr 2008 bei 81 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Personenkilometer und damit 45 % niedriger als die des Pkw-Verkehrs (147 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/Pkm). Straßen- und Stadtbahnen liegen mit 72 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/Pkm rund 51 %, U-Bahnen mit 62 g/Pkm sogar rund 58 % niedriger als die spezifischen Emissionen des Pkw-Verkehrs. Der ÖPNV besitzt heute gemittelt über ein Jahr und alle ÖPNV-Linien einen klaren Umweltvorteil gegenüber dem Pkw-Verkehr. Unabhängig davon können im Einzelfall auf schwach ausgelasteten Linien die spezifischen Treibhausgasemissionen auch schlechter sein als im Pkw-Verkehr.

#### **Exkurs: Treibhausgasemissionen durch Kältemittelverluste**

Unberücksichtigt blieben in den bisherigen Betrachtungen die Kältemittlemissionen aus Klimaanlageanlagen. Kältemittel gelangen dabei durch Undichtigkeiten, bei Wartungsarbeiten oder durch Beschädigungen der Klimaanlageanlagen in die Umwelt. Die derzeit eingesetzten Kältemittel besitzen in der Regel hohe Treibhausgaswirkungen (GWP - Global Warming Potential), so dass bereits kleine Menge klimarelevant sind (siehe auch Kapitel 2.1). Beispielsweise hat das Kältemittel R134a (Tetrafluorethan), das in Bussen und Bahnen ebenso wie in Pkw und Lkw eingesetzt wird ein GWP von 1.430. Damit entspricht 1 kg des Kältemittels 1.430 kg CO<sub>2</sub>-

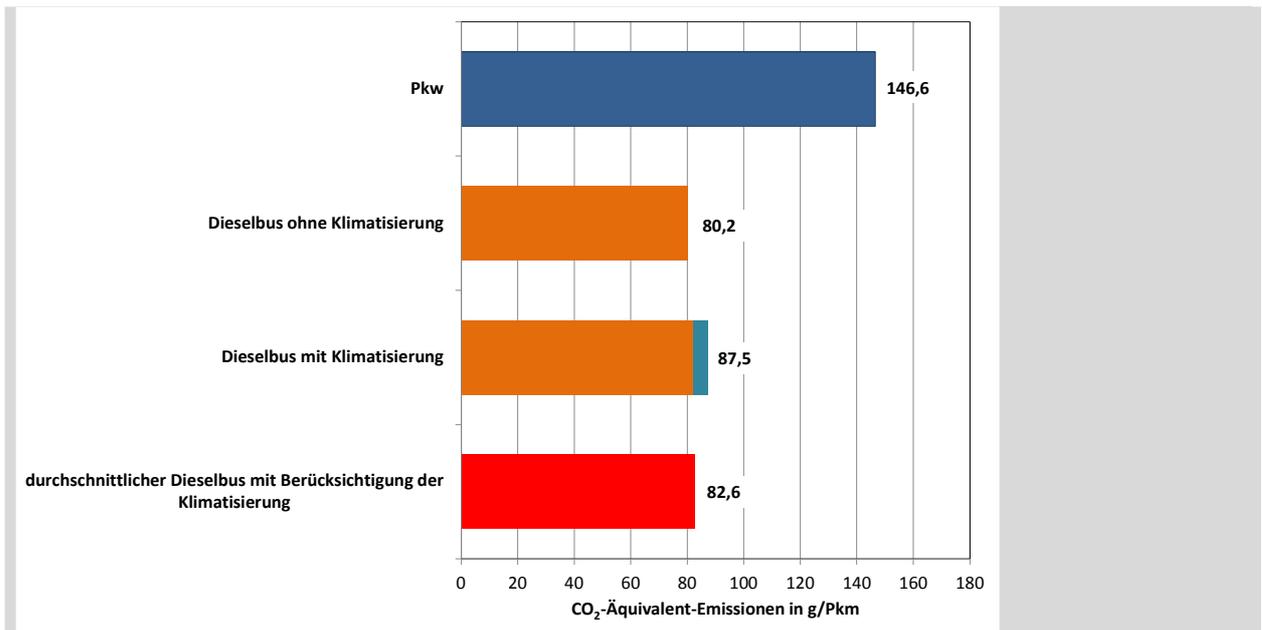
Äquivalent-Emissionen. Während die EU für ab 2011 neu zugelassenen Pkw und leichte Nutzfahrzeuge Kältemittel mit einem GWP von mehr als 150 verboten hat, ist der Einsatz von Kältemitteln mit hohem GWP wie R134a in Bussen und Bahnen weiter möglich.

Eine Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes hat ermittelt, dass im Jahr 2008 rund 94 Tonnen R134a aufgrund der Klimatisierung der Busse in die Umwelt gelangt ist [UBA 2010]. Das entspricht CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen in Höhe von rund 134.000 t. Alle Schienenfahrzeuge (überwiegend Eisenbahnen) emittierten 2008 rund 14 t R134a, was etwa rund 20.000 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente entspricht. Im Vergleich zu 1995 haben damit sowohl beim Busverkehr (+680 %) als auch beim Schienenverkehr (+590 %) die Kältemittellemissionen und damit auch die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen durch Kältemittelverluste stark zugenommen (siehe Tabelle 4).

	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen
<b>Menge an R134a</b>										
Busse	12,0	46,0	53,0	60,0	69,3	75,3	85,5	87,5	89,7	93,9
Schienenfahrzeuge	2,0	6,4	7,4	8,9	10,0	10,8	11,7	12,7	13,2	13,6
<b>CO<sub>2</sub>e-Emissionen</b>										
Busse	17.200	65.800	75.800	85.800	99.200	107.700	122.300	125.200	128.300	134.300
Schienenfahrzeuge	2.800	9.200	10.600	12.700	14.300	15.500	16.800	18.100	18.900	19.500
<b>Quellen:</b> [UBA 2010a]; [IPCC 2007]; Berechnungen des Öko-Instituts.										

**Tabelle 4 Menge der in die Umwelt gelangten Kältemittel aus mobilen Klimaanlage von Bussen und Schienenfahrzeugen sowie die damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen**

Wie oben ausgeführt, dürften maximal rund ein Drittel der Busse im Bestand mit Klimaanlage ausgestattet sein. Bei den Reisebussen hat der Anteil klimatisierter Busse bei den Neuzulassungen in der Zwischenzeit 100 % erreicht; im Bestand dürfte der Anteil bei mindestens 80 % der Busse liegen. Geht man von einem Gesamtbestand von 83.000 Omnibusse in Deutschland aus (einschließlich der vorübergehend abgemeldeten Fahrzeugen), von denen es sich bei rund 58.000 Bussen um Linienbusse handelt, ergibt sich grob, dass sich die Kältemittelverluste und damit die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen in Höhe von 134.000 Tonnen durch Klimaanlage je zur Hälfte auf Linien- und Reisebusse verteilen. Geht man weiterhin davon aus, dass vor allem Dieselsebusse mit Klimaanlage ausgestattet sind, ergeben sich pro Personenkilometer im Durchschnitt der gesamten Linienbusflotte mit Dieselmotor Mehremissionen von 1,7 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente durch Kältemittelverluste (siehe Abbildung 15). Der geschätzte Dieselmehrverbrauch der Klimaanlage im Durchschnitt der gesamten Diesel-Busflotte von 0,3 Liter pro 100 km (siehe oben) führt hingegen zu Mehremissionen von 0,7 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Personenkilometer (siehe ebenfalls Abbildung 15).



**Abbildung 15 Spezifische CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer von Linienbussen mit Dieselmotor mit und ohne Berücksichtigung der Klimaanlage im Vergleich zum Pkw [UBA 2010a; eigene Berechnungen]**

Diese Abschätzung zeigt, dass auch die Berücksichtigung der Kältemittelverluste nicht wesentlich die Umweltbilanz des Busverkehrs beeinflusst. Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen liegen im Bundesdurchschnitt mit Berücksichtigung der Kältemittelverluste und des Mehrverbrauchs von Klimaanlage bei 82,6 g/Pkm statt bei 80,2 g/Pkm. Der Klimavorteil gegenüber dem Pkw schwindet in diesem Fall allerdings lediglich von 45 % auf 44 %. In den folgenden Ausführungen dieses Berichts, insbesondere bei der Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Zukunft, werden die Mehremissionen durch Klimaanlage nicht weiter betrachtet, da hierzu die Datengrundlagen unzureichend sind. Der dadurch entstehende Fehler ist vertretbar. Bei der Betrachtung der Maßnahmen wird aber der Umstieg auf Kältemittel mit niedrigerem GWP diskutiert.

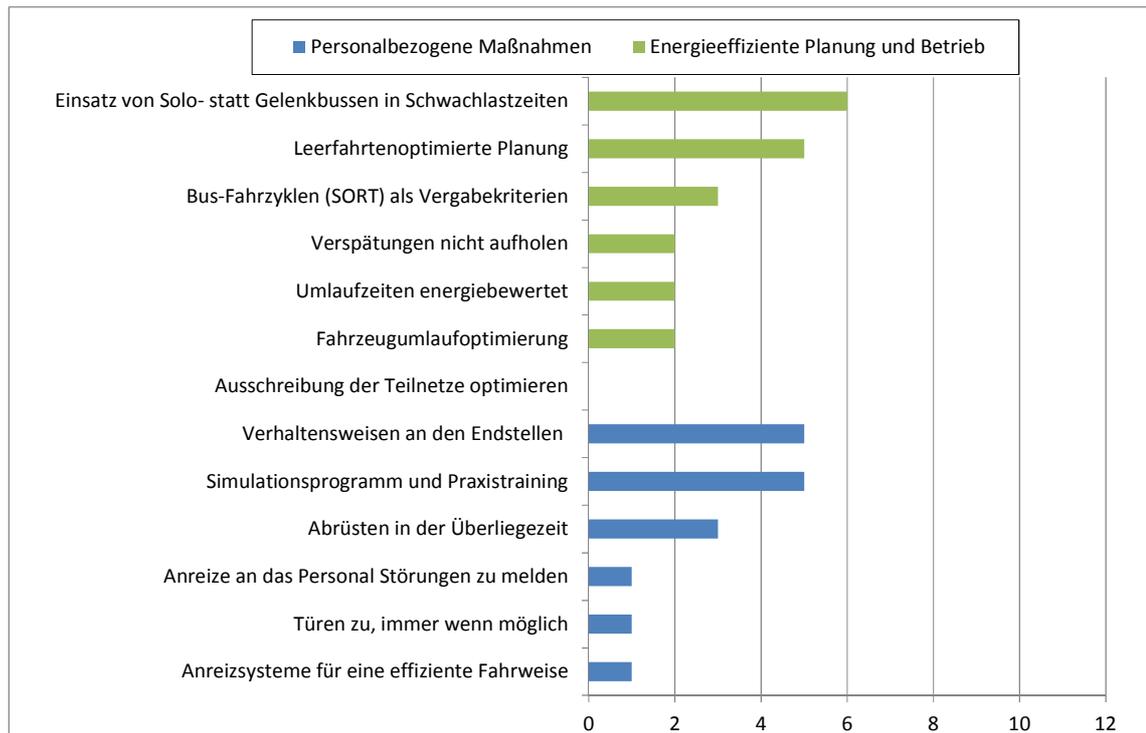
## **3.2 Bisher realisierte Energieeffizienzpotentiale**

Im vorangegangenen Kapitel wurden bereits erste Begründungen für die beobachtete Entwicklung der Energieeffizienz gegeben. Unter anderem hat die Modernisierung des Fahrzeugparks in den letzten 20 Jahren sowohl im Busbereich als auch im Bereich der Straßen-, Stadt- und U-Bahnen zur Steigerung der Energieeffizienz beigetragen. Allerdings traten in der Vergangenheit auch gegenläufige Trends auf, die die erzielten Kraftstoffeinsparungen teilweise wieder kompensiert haben. Im folgenden Unterkapitel wird auf Basis von umfangreichen Interviews, die mit 13 Verkehrsunternehmen im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführt wurden, vorgestellt, welche Energiesparmaßnahmen in der Vergangenheit bereits umgesetzt wurden und welche gegenläufige Trends auftraten, die zu Mehrverbräuchen führten. Die Darstellung erfolgt getrennt für den ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor (vornehmlich Dieselbusse) und dem elektrisch betriebenen ÖPNV (Straßen-, Stadt- und U-Bahnen).

### **3.2.1 ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren**

Im Rahmen der Interviews wurden gezielt Energiesparmaßnahmen für den Busbereich abgefragt; von den 13 befragten Verkehrsunternehmen konnten 12 Interviews ausgewertet werden. In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 16 bis Abbildung 19) sind jeweils die Anzahl der Unternehmen aufgeführt, die die entsprechende Maßnahme bereits durchgeführt haben. Ein genauer Umsetzungsstand, sei es auf die Fahrzeugflotte bezogen oder auf den Grad der Umsetzung betrieblicher Maßnahmen, kann aus den Ergebnissen der Interviews nicht abgeleitet werden. Auch die tatsächlich erzielten Einsparpotentiale einzelner Maßnahmen konnten nicht immer quantifiziert werden. Die Ergebnisse zeigen allerdings gut auf, in welchen Bereichen die Verkehrsunternehmen bereits aktiv waren, und sei es nur um mit bestimmten Technologien Erfahrungen zu sammeln, und welche Bereiche bislang im unternehmerischen Handeln überwiegend unberücksichtigt geblieben sind.

Abbildung 16 zeigt die Anzahl der Unternehmen, die bereits Maßnahmen in den aufgeführten Bereichen im Betrieb umgesetzt haben. Es zeigt sich, dass der optimierte Einsatz größerer Fahrzeuge und eine Planung zur Verringerung der Leerfahrten weit verbreitet sind. Lediglich drei Unternehmen verwenden Verbrauchswerte entsprechend der SORT-Fahrzyklen als Kriterium bei der Fahrzeugbeschaffung. Ebenfalls weit verbreitet sind Maßnahmen, die ein effizientes Verhalten der Fahrer zum Ziel haben, wie beispielsweise energiesparendes Verhalten an den Endhaltestellen (fünf Unternehmen). Wenig verbreitet sind hingegen Anreizsysteme, die die Busfahrer motivieren, möglichst kraftstoffsparend zu fahren. Lediglich ein Unternehmen hatte Erfahrungen damit gesammelt, es letztlich jedoch nicht weiter verfolgt.



**Abbildung 16 Umsetzung betrieblicher Effizienzmaßnahmen [Quelle: Interviews]**

Die Ergebnisse der Interviews zu den Maßnahmen im Bereich Motoren- und Getriebeoptimierung (siehe Abbildung 17) als auch des durchgeführten Expertenworkshops zeigen, dass der Fokus neben dem Downsizing, also dem Einsatz von Motoren kleineren Hubraumes mit gleicher Leistung, in den vergangenen Jahren klar auf der Hybridisierung der Fahrzeuge liegt. So setzten sechs der befragten Unternehmen Hybridbusse ein. Bei den meisten handelt es sich dabei um Fahrzeuge, die das Anfahren oder das Fahren kürzerer Strecken auch elektrisch ermöglichen. Ein Unternehmen gab an, dass das Fahrzeug auch weitere Strecken elektrisch betrieben zurücklegen kann. Kaum ein Unternehmen erwartet beim Einsatz von Fahrzeugen mit niedrigeren Abgasstandards, dass sie den Kraftstoffverbrauch mindern. Hinsichtlich der Getriebe sind adaptive Schaltprogramme, die das Sachaltprofil an den tatsächlichen Bedarf anpassen, bereits weit verbreitet in den Unternehmen angekommen. Der Einsatz getriebeloser Fahrzeuge ist hingegen nicht von Bedeutung.

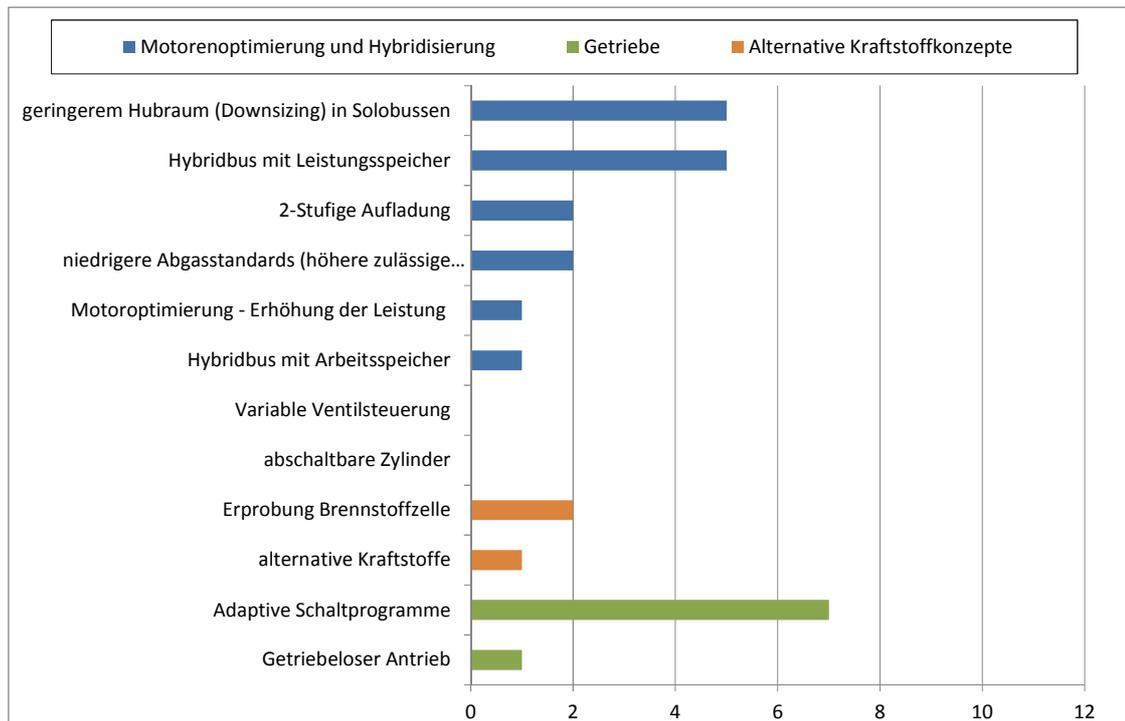


Abbildung 17 Umsetzung von technischen Effizienzmaßnahmen im Bereich Motor und Getriebe [Quelle: Interviews]

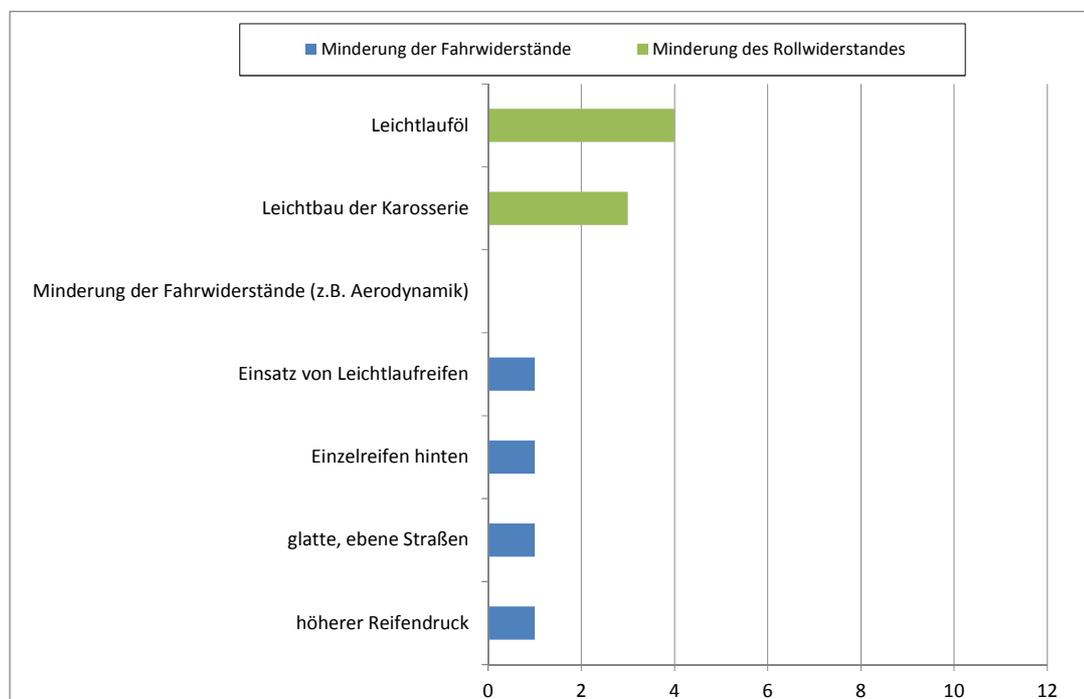
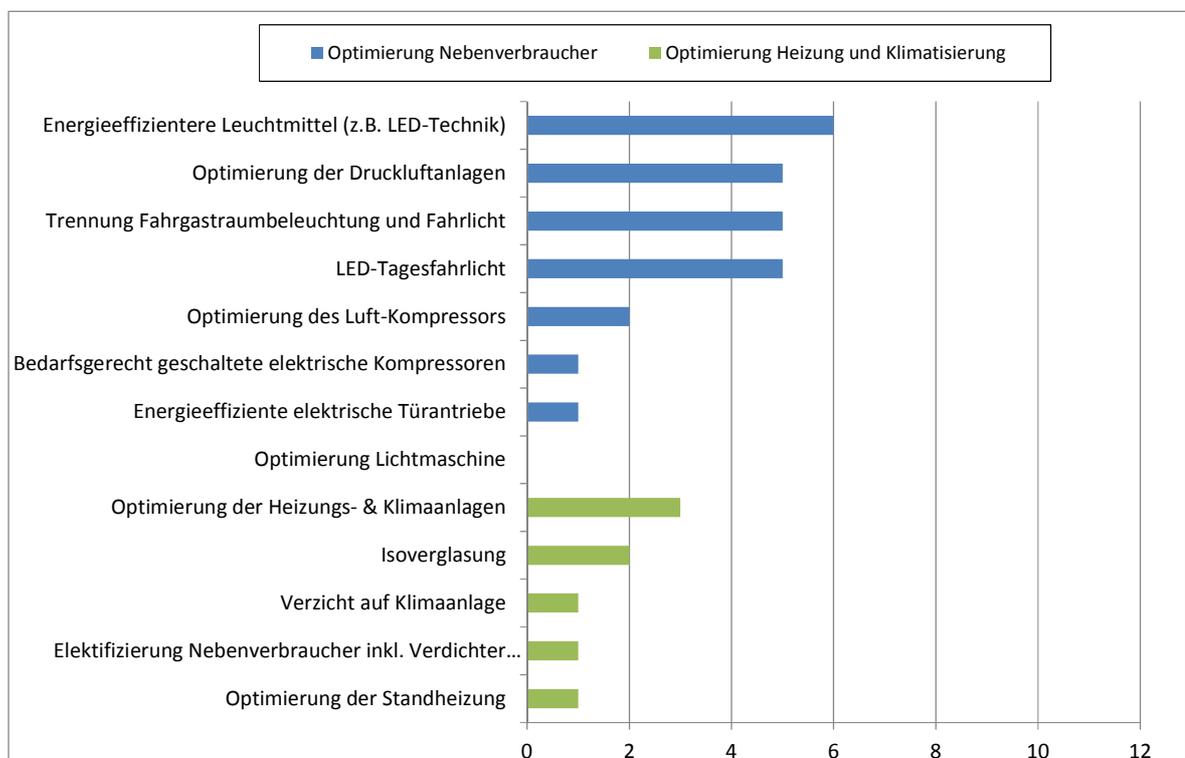


Abbildung 18 Umsetzung von Maßnahmen zur Verringerung der Fahrwiderstände [Quelle: Interviews]

Schlussbericht

Im Vergleich zu den vorangegangenen Maßnahmen haben die befragten Unternehmen relativ wenige Erfahrungen gesammelt mit Maßnahmen zur Reduktion der Roll- und Fahrwiderstände (siehe Abbildung 18). Vier Unternehmen gaben an, Leichtlauföle zur Verringerung der innermotorischen Reibung einzusetzen, drei gaben an, bei der Beschaffung auf besonders leichte Fahrzeuge zu achten. Lediglich ein Unternehmen praktiziert den Einsatz expliziter Leichtbaufahrzeuge. Keine große Rolle spielten Maßnahmen zur Verringerung der Rollwiderstände. Einige Unternehmen haben dies ausprobiert, sind aber teilweise aufgrund von Komfortverlusten wieder davon abgekommen.

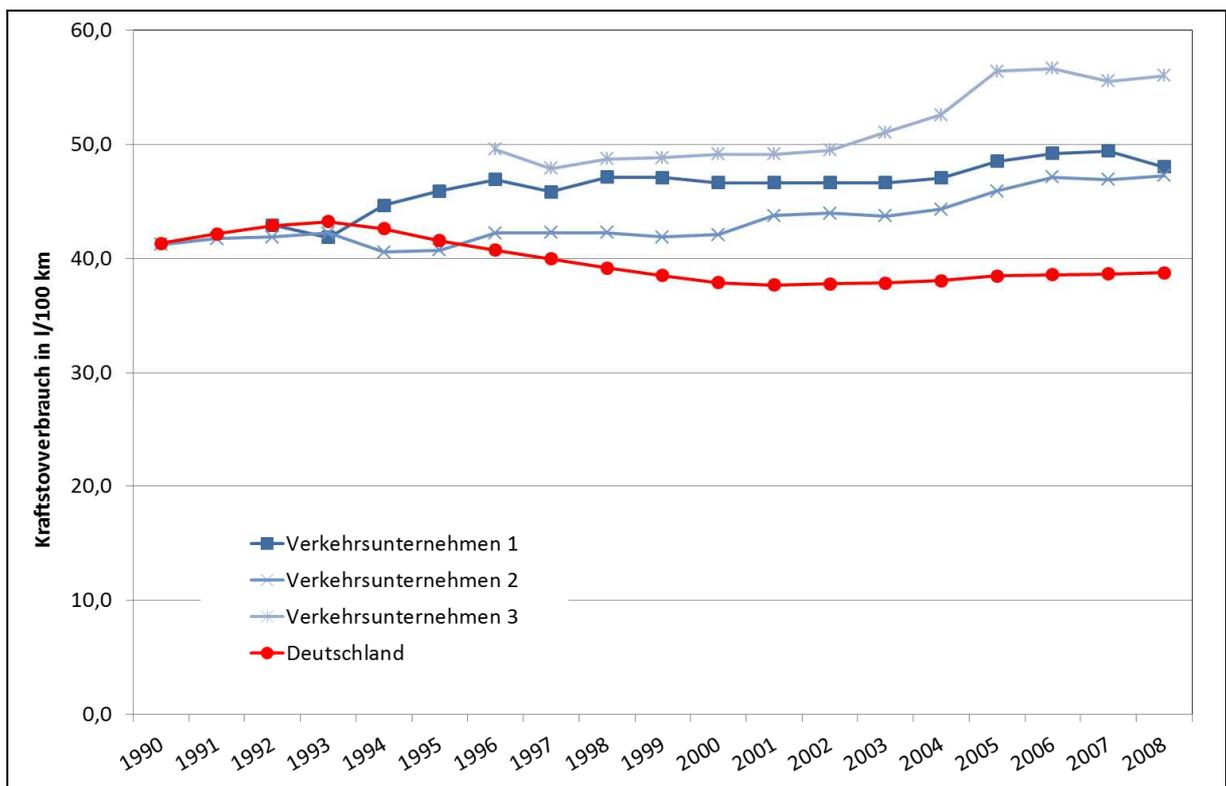
Ein nicht zu vernachlässigender Anteil der Energieverluste im Busbetrieb entfällt auf die Nebenverbraucher. Dies sind z. B. die Druckluftanlagen, die u. a. für den Türbetrieb und die Ausgleichs- und Kneelingfunktionen benötigt werden, die Anlagen für die Komfortfunktionen und die Beleuchtung. Die Umfrage hat gezeigt, dass die Unternehmen am häufigsten auf den Einsatz energieeffizienter Leuchtmittel wie z. B. die LED-Technik setzen (siehe Abbildung 19). Letztlich ist das Einsparpotential dadurch aber beschränkt, führt aber zu verringertem Wartungsaufwand. Ein größeres Potential besteht bei der Optimierung der Druckluftanlagen. Auch in diesem Feld waren die Verkehrsunternehmen bereits zu einem großen Teil aktiv. Der nächste Schritt nach den energieeffizienten Kompressoren wäre die Elektrifizierung von Nebenaggregaten und Kompressoren, die dann nur bei Bedarf genutzt würden. Dies allerdings spielt aufgrund der hohen Investitionskosten derzeit keine Rolle.



**Abbildung 19 Umsetzung von Maßnahmen im Bereich der Nebenverbraucher und Komfortfunktionen [Quelle: Interviews]**

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Verkehrsunternehmen in der Vergangenheit bereits eine Vielzahl an Minderungsmaßnahmen durchgeführt oder deren Einsatz zumindest erprobt haben.

Die Umsetzungen der aufgeführten Maßnahmen führten in der Vergangenheit zu reduzierten Kraftstoffverbräuchen, die sich allerdings mit gegenläufigen Trends überlagert haben, die für die Gesamtentwicklung der Verbräuche entscheidend sind. Nach Auskunft der Verkehrsunternehmen spielten beispielsweise die höheren Anforderungen an die Abgasaufbereitung in den vergangenen Jahren eine Rolle. Insbesondere der Umstieg von Euro II auf Euro III führte zu einem höheren Kraftstoffverbrauch (siehe Tabelle 3). Ebenfalls verbrauchsrelevant ist eine Entwicklung hin zu größeren Gefäßen, die einen höheren Kraftstoffverbrauch aufweisen. Weiterhin ist der Anteil von klimatisierten Fahrzeugen gestiegen. Weiterhin sind die Fahrzeuge häufiger mit Bildschirmen zur Anzeige von Fahrgastinformationen ausgestattet, was ebenfalls zu einem höheren Verbrauch führt. Auch der Luftverbrauch dürfte durch den häufigeren Einsatz von Kneeling ebenfalls gestiegen sein.



**Abbildung 20 Entwicklung des durchschnittlichen berechneten Kraftstoffverbrauchs für Linienbusse im Vergleich zu drei Verkehrsunternehmen für den Zeitraum 1990 bis 2008** [[Quelle: Interviews; eigene Berechnungen]

In Abbildung 20 ist der Durchschnittsverbrauch von Linienbussen mit Dieselmotor von 1990 bis 2008 dargestellt, wie er in Kapitel 3.1 dargestellt wurde und auf Modelrechnungen basiert (siehe Kapitel 2.1.1). Diesen berechneten Werten wurden beispielhaft die durchschnittlichen Dieserverbrauchswerte von drei befragten Verkehrsunternehmen gegenübergestellt. Aus der Abbildung wird deutlich, dass bei allen befragten Unternehmen die Durchschnittsverbräuche in

Schlussbericht

den letzten Jahren angestiegen sind, was sich in den berechneten Werten nicht so widerspiegelt. Ursache können die oben beschriebenen, den Energieeinsparungen gegenlaufenden Trends sein (z. B. Klimatisierung, Kneeling). Zum anderen können es aber spezifische Entwicklungen der ÖPNV-Unternehmen sein (z. B. Umstieg auf eine größere Anzahl von Gelenkbussen). Eine weiter nicht quantifizierbare Auswirkung können auch die Zunahme von Staus und kalte Winter oder die Verkürzung von Haltestellenabständen mit der Zunahme von Stopps sein. Aus den vorliegenden Befragungsergebnissen können die Ursachen für die Anstiege aber nicht auf konkrete einzelne Ursachen zurückgeführt werden. Die Zahlen belegen aber, dass die in Kapitel 3.1 aufgezeigten Energieverbrauchsentwicklungen die realen Entwicklungen tendenziell unterschätzen. Aufgrund einer fehlenden, umfangreichen Befragung von ÖPNV-Unternehmen zu deren Verbrauchsentwicklung können allerdings die berechneten Werte keiner Korrektur unterzogen werden.

### **3.2.2 Elektrisch betriebener ÖPNV**

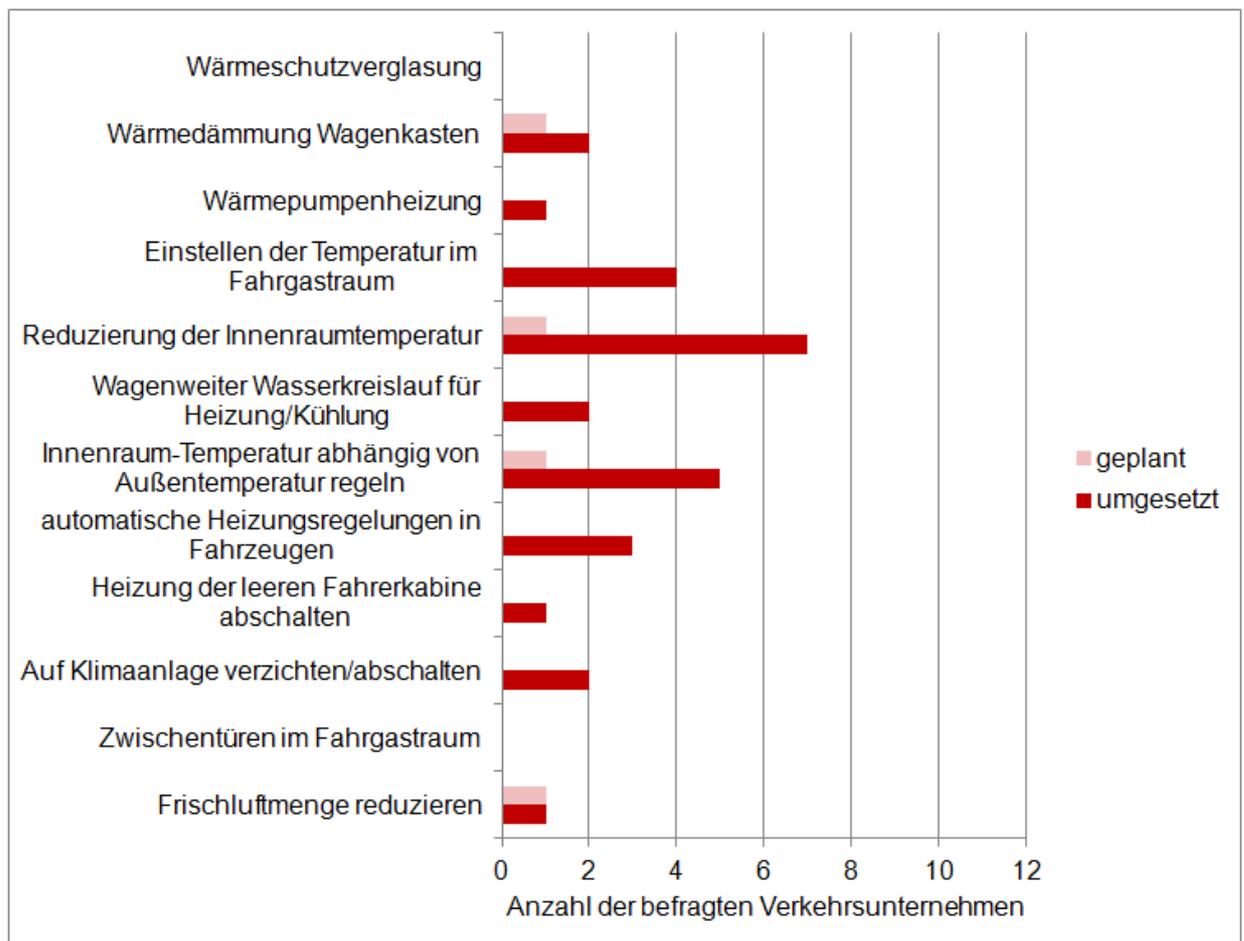
Beim elektrisch betriebenen ÖPNV ist eine getrennte Betrachtung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz auf Seiten des Fahrzeugs und auf Seiten der Infrastruktur sinnvoll, da nicht alle am Schienenpersonennahverkehr beteiligten Unternehmen und Institutionen die Möglichkeit haben, auf die Infrastruktur und die Fahrzeuge einzuwirken. Da aber zwischen beiden Maßnahmengruppen Wechselwirkungen bestehen, sollte bei allen Beteiligten ein Bewusstsein existieren, dass die Abstimmung von Maßnahmen den größten Nutzen für die Steigerung der Energieeffizienz hervorbringt.

Im Folgenden werden die bisher umgesetzten Maßnahmen und Techniken zur Effizienzsteigerung getrennt nach ihrem Anwendungsgebiet beschrieben.

Potentiale zur Erhöhung der Energieeffizienz, die seit 1990 verstärkt genutzt werden, betreffen die Komponenten der Heizung, Lüftung und der Klimatisierung, sofern vorhanden. In diesem Bereich wurden bisher Maßnahmen umgesetzt, die größtenteils ohne Anschaffung neuer Komponenten realisierbar sind. Dazu gehört die Temperaturführung im Fahrzeuginnenraum in Abhängigkeit von der Außentemperatur und die Anpassung von Heizkurven bzw. die Leistungsbegrenzung der Heizungsanlage. Aus den vorliegenden Daten lässt sich aber nicht ableiten, wie groß der Effekt dieser Maßnahmen auf den Energieverbrauch ist. Das liegt daran, dass im realen Betrieb die Umgebungsbedingungen schwanken und nicht aufgezeichnet werden. So lässt sich nachträglich nicht feststellen, ob der Energiebedarf der Heizung auf Grund des Wetters, der Auslastung oder auf Grund der Effizienzmaßnahmen gestiegen oder gesunken ist. Um exakte Werte für ein Fahrzeug erhalten zu können, wären Messungen in einem Klimawindkanal notwendig. Der Umsetzungsgrad einzelner Maßnahmen der befragten Verkehrsunternehmen im Bereich Heizung, Lüftung und Klimatisierung wird in der Abbildung 21 dargestellt. Diese Angaben innerhalb dieser Abbildungen stammen aus den durchgeführten Interviews und zeigen die Anzahl von Verkehrsunternehmen, die eine bestimmte Maßnahme umsetzen oder noch planen umzusetzen. Die Angaben zum Einsatz

einer Wärmepumpenheizung basieren auf dem Einsatz eines einzelnen Prototypen und sind nicht auf den flächendeckenden Einsatz bezogen.

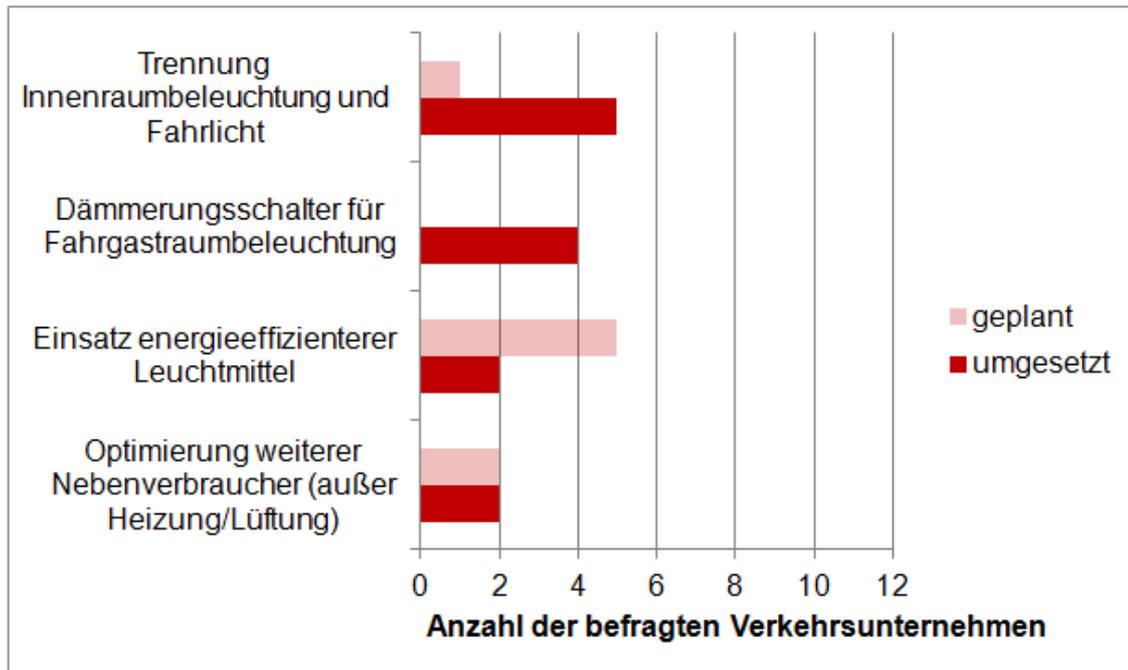
Bezieht man den Umsetzungsgrad auf die zurückgelegten Wege im Betrieb, kommt man beispielsweise zu folgenden Ergebnissen: 58,4 % der erbrachten Fahrleistungen im Jahr 2010 erfolgen mit Fahrzeugen, deren Innenraumtemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur geregelt wird. Diese Technik planen weitere Verkehrsunternehmen einzuführen. Dabei geht es um die Umrüstung von Fahrzeugen mit denen weitere 4,9 % der Transportleistung des Jahres 2010 erbracht wurden.



**Abbildung 21 Umsetzungsgrad von Maßnahmen im Bereich Heizung, Klima, Lüftung [Quelle: Interviews]**

Ungefähr 3,5 % des Fahrstromverbrauchs, ermittelt an den Unterwerken, entfallen auf Nebenverbraucher in den Fahrzeugen, die nicht zur Heizung, Klimatisierung oder Lüftung gehören. Zu diesen Nebenverbrauchern gehören die Beleuchtung des Fahrzeugs innen wie außen und Komponenten wie z. B. Kompressoren zur Druckluftherzeugung, falls vorhanden, was jedoch eher selten zutrifft. Der Energiebedarf dieser Verbraucher lässt sich durch folgende Maßnahmen reduzieren: Einsatz effizienter Leuchtmittel, Trennung der Fahrzeuginnenraumbeleuchtung von den Schaltkreisen der Außenbeleuchtung wie Scheinwerfer und Signallampen sowie die bedarfsgerechte Ansteuerung der

Fahrzeuginnenraumbelichtung. Die nachstehende Abbildung 22 zeigt den Verbreitungsgrad dieser Maßnahmen bei den befragten Verkehrsunternehmen.



**Abbildung 22 Umsetzungsgrad von Maßnahmen im Bereich sonstige Nebenverbraucher [Quelle: Interviews]**

Effizienzsteigernde Maßnahmen im Bereich der Traktion umfassen Maßnahmen, die zum Teil am Fahrzeug und zum Teil an der Infrastruktur angreifen.

Bis etwa 1980 waren Schaltwerkssteuerungen mit Widerständen üblich, die insbesondere beim Anfahren viel Energie verbrauchten. Sowohl bei Neubauten als auch teilweise durch Umbauten bestehender Fahrzeuge wurden diese dann sukzessive durch widerstandslose Halbleitersteuerungen, anfänglich Thyristorsteuerungen, später IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ersetzt, mit stets zunehmenden Wirkungsgraden und einfacherer Rückspeisefähigkeit.

Die Rückspeisefähigkeit ist bei annähernd allen Fahrzeugen, die seit 1990 modernisiert oder zugelassen wurden, gegeben. Hier stellt sich die Frage nach der Aufnahmefähigkeit des Versorgungsnetzes für die zurückgespeiste Leistung. An diesem Punkt besteht bei vielen Verkehrsunternehmen noch Handlungsbedarf. In der Abbildung 23 sind einige Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz bei der Rückspeisung von Strom in die Oberleitung aufgeführt. Dazu gehören die Nutzung der Bremsenergie für stationäre Verbraucher, rückspeisefähige Unterwerke, die Nutzung der Bremsenergie für Nebenverbraucher im Fahrzeug, die Optimierung des Spannungshubs bei Rückspeisung und der Einsatz von Energiespeichern im Fahrzeug.

Als betriebliche Maßnahmen, die sich positiv auf den Fahrstromverbrauch auswirken, kommen die Fahrplanoptimierung nach Energieverbrauchskriterien, die Erhöhung der Anzahl von

*Schlussbericht*

Bedarfshaltestellen, Nachfrageorientierte Fahrpläne und Fahrzeugumlaufoptimierung sowie die Optimierung des Fahrspiels in Frage. Stimmt man diese Maßnahmen sinnvoll auf einander ab, steigt die Pünktlichkeit und Energieeffizienz ohne dass die Fahrzeit durch Verwendung von Pufferzeiten steigt. Beschleunigungsmaßnahmen, wie zum Beispiel Vorrangschaltungen für Straßenbahnen, Fahrerschulungen und Motivation des Fahrpersonals, Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit unter Einhaltung des Fahrplans und der Einsatz von Energieverbrauchsanzeigen dienen ebenfalls der Minderung des Fahrstromverbrauchs. Alternativ kann auch ein teilautomatisierter Betrieb oder energieoptimales Fahren mit Linienzugbeeinflussung (LZB) eingesetzt werden.

Solange Energiespeicher weder im Fahrzeug noch in den Unterwerken eingesetzt werden, sollten gleichzeitige Abfahrten mehrerer Züge von einer Haltestelle vermieden werden. So müssen die Unterwerke für einen solchen Streckenabschnitt nicht überdimensioniert werden und die Verluste fallen geringer aus. Auch der Einsatz energieeffizienter Antriebstechnik senkt die Verluste. Die primären Vorteile der energieeffizienten Antriebstechnik liegen in den höheren Wirkungsgraden beim Wandeln der elektrischen Energie in Bewegung und in umgekehrter Richtung bei der Rückspeisung beim Bremsen.

In Starklastzeiten ist der Einsatz von Beiwagen ebenfalls ein probates Mittel den Energiebedarf gering zu halten. Dabei muss berücksichtigt werden, dass Leerfahrten zum An- und Abkuppeln des Beiwagens im Depot so kurz wie möglich gehalten werden sollten.

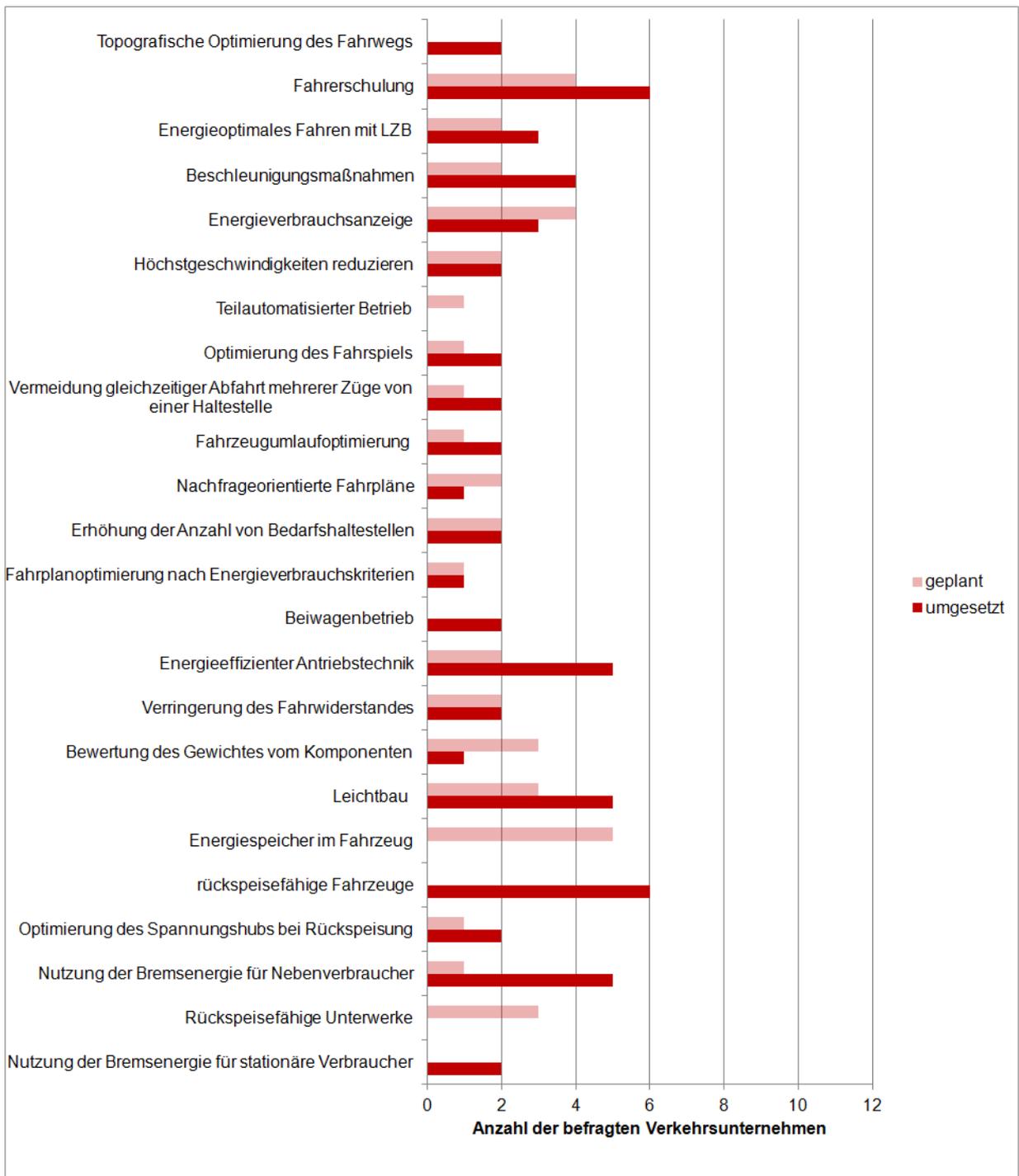
Weiterhin sollte auf Leichtbau von ganzen Fahrzeugrohbauten und von darin eingesetzten Komponenten geachtet werden. Eine Möglichkeit dieses zu realisieren besteht in der Bewertung des Gewichts von Komponenten im Rahmen der Fahrzeugausschreibung oder Aufrüstung. Außerdem sollte bei der Ausschreibung von Neufahrzeugen auf einen möglichst geringen Fahrwiderstand, auch in Bögen, geachtet werden (siehe dazu Kapitel 4.1.2.1 und Anhang 2 Technische Erläuterungen). Dieser ist nicht allein physikalisch bedingt unvermeidbar, sondern hängt auch von der Konstruktion des Fahrzeuges ab.

Eine weitere Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz liegt in der topografischen Optimierung des Fahrwegs. Darunter versteht man die Anhebung des Haltestellenbereichs um einige Zentimeter im Verhältnis zur Umgebung. So wird beim Einfahren kinetische Energie des Fahrzeugs in potentielle Energie gewandelt. Gegenteiliges geschieht dann beim Verlassen der Haltestelle. Problematisch sind dabei die städtebaulichen Aspekte. So ist unbedingt zu vermeiden, dass diese Erhebungen keine Hindernisse für Menschen mit eingeschränkter Mobilität darstellen. Außerdem sollte bei der Planung von neuen Haltestellen darauf geachtet werden, dass diese nicht in Senken angelegt werden.

Ein weiteres Potential zur Steigerung der Energieeffizienz in Netzen von Gleichstrombahnen liegt in der Nutzung von Betriebsspannungen an der oberen Grenze des zulässigen Spannungsbereichs. Üblich sind Bahnstromsysteme mit einer Nennspannung von 750 V, zu zulässige höchste Spannung unbestimmter Dauer kann jedoch bei 900 V liegen. Eine höhere Spannung führt bei gleicher Leistung zu verminderten Strömen und dadurch zu reduzierten Verlusten bei der Stromleitung.

*Schlussbericht*

Betrachtet man die Aussagen der befragten Verkehrsunternehmen dargestellt in den Abbildungen 21 bis 23, kann man auch feststellen, dass das Bewusstsein bzw. das Wissen um die Möglichkeiten zum Einsatz energieeffizienter Techniken noch nicht ausreichend in allen Unternehmen vorhanden ist. Das kann man unter anderem an dem Punkt rückspeisefähige Fahrzeuge (Abbildung 23) sehen. Zu dieser Frage äußern sechs Unternehmen, Sie hätte diese Maßnahme bereits umgesetzt. Davon ausgehend, dass keine Neufahrzeuge mehr hergestellt werden, die nicht rückspeisefähig sind, müssten also die verbleibenden sechs Verkehrsunternehmen antworten, dass sie planen, die Maßnahme umzusetzen.



**Abbildung 23 Umsetzungsgrad von Maßnahmen im Bereich Traktion [Quelle: Interviews]**

Am folgenden Beispiel (Abbildung 24) lassen sich anhand der Verbrauchsdaten dreier Verkehrsunternehmen die Auswirkungen verschiedener Maßnahmen auf den Fahrstromverbrauch über den Zeitraum von 1990 bis zum Jahr 2010 zeigen. Dabei sind die jeweiligen Fahrstromverbräuche der Verkehrsunternehmen im Jahr 1990 die Bezugsgröße.

Bei Verkehrsunternehmen 1 steigt der Fahrstromverbrauch seit 1990 beinahe kontinuierlich an. Ausnahmen bilden der Zeitraum zwischen 1997 und 2000 und der Zeitraum ab 2007. Zu Beginn beider Zeiträume steht die Einführung neuer Fahrzeugtypen im Austausch gegen Altfahrzeuge. Der Anstieg im Fahrstromverbrauch zwischen 2000 und 2001 ist auf eine Netzreform des Verkehrsunternehmens zurückzuführen. Der ab 2007 etwas stärker ansteigende Fahrstromverbrauch ist hauptsächlich auf die steigende Gefäßgröße und durch die wachsende Anzahl an Fahrzeugen mit Klimatisierung im Fahrgastbereich zurückzuführen.

Das Sinken des Fahrstromverbrauchs beim Verkehrsunternehmen 5 zwischen 1990 und 1998 ist auf die Ausmusterung und Modernisierung alter Fahrzeuge zurückzuführen. Zwischen den Jahren 1994 und 1998 wurde ein Wechsel in der Antriebstechnik bei den Neufahrzeugen von Gleichstrommotoren mit Widerstandsschaltwerksteuerung auf Wechselstrommotoren mit Halbleitersteuerung durchgeführt. Damit ist auch ein erheblicher Effizienzgewinn verbunden.

Beim Verkehrsunternehmen 1 sind die Effizienzsteigerungen durch den Einsatz neuer und damit rückspeisefähiger Fahrzeuge nicht sichtbar. Das liegt an den Netzausbauten die zwischen 1990 und 1998 stattfanden. Aus den Interviews und den vorliegenden Daten können keine Aussagen über den Fahrstromverbrauchsanstieg zwischen 2003 und 2006 gewonnen werden. Als mögliche Auslöser kommen außergewöhnliche Witterung und das höhere Verkehrsaufkommen im Rahmen der Fußball WM 2006 in Frage.

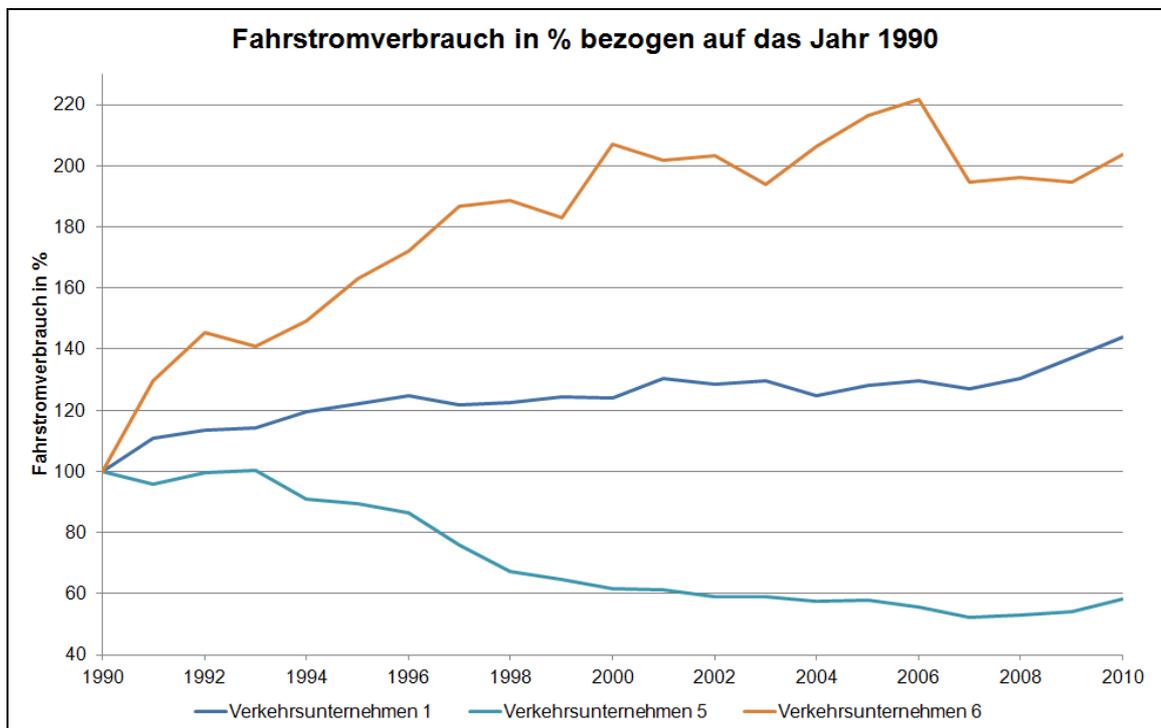


Abbildung 24 Fahrstromverbrauch am Beispiel dreier Verkehrsunternehmen [Quelle: Interviews]

Der Fahrstromverbrauch pro Zugkilometer sinkt seit dem Jahr 1996. Ausgehend von dem in Abbildung 24 dargestellten Trend des Fahrstromverbrauchs ist seit dem Jahr 1996 ein Effizienzgewinn zu verzeichnen.

Im Fall von Verkehrsunternehmen 1 ist in Abbildung 25 zu erkennen, dass der Fahrstromverbrauch pro Personenkilometer bis zum Jahr 2001 anwächst und danach stagniert. Dieser Gewinn geht einher mit der Einführung einer neuen Fahrzeuggeneration. Weiterhin wachsende Fahrgastzahlen führen dann ab 2002 dazu, dass trotz wachsenden Fahrstromverbrauchs der Verbrauch pro Personenkilometer sinkt. Dieses Beispiel zeigt, dass stets der Verbesserung der Fahrzeugauslastung Vorrang geben werden muss und alle anderen Maßnahmen nachzuordnen sind. Beispielsweise führt die Verbesserung der Umsteigebeziehungen, egal ob mit Taktfahrplan oder ohne, zunehmend dazu, dass mehr Fahrzeuge zunächst gleichzeitig bremsen und dann gleichzeitig anfahren müssen. Hier funktioniert die Energieverteilung im Gleichspannungsnetz dann schlechter und trotzdem ist die Maßnahme sinnvoll. Die Energie ist dann entweder in den Fahrzeugen oder im Unterwerk zwischen zu speichern oder es sind an diesen Umsteigestellen rückspeisefähige Unterwerke vorzusehen.

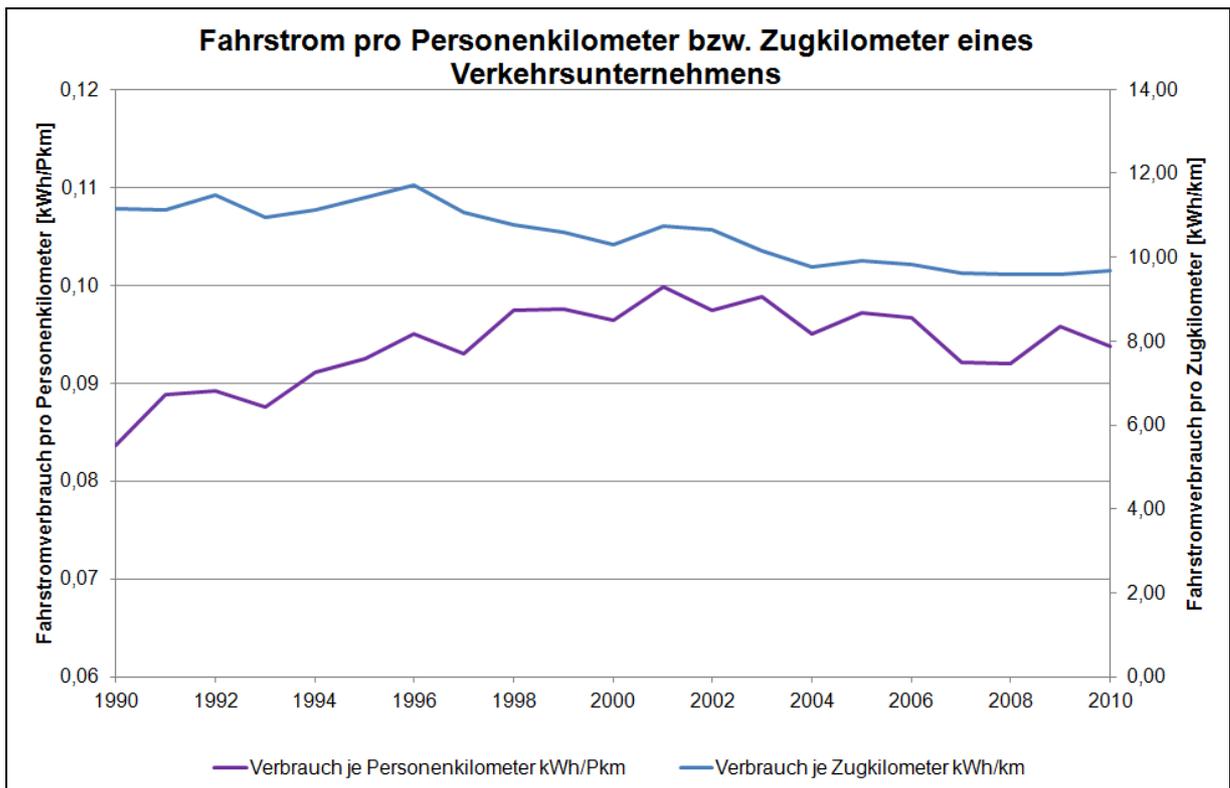


Abbildung 25 Fahrstromverbrauch pro Personen- und Zugkilometer [Quelle: Interviews]

### 3.3 Analyse erneuerbarer Energien

In Sondererhebungen zum Energieverbrauch 2006 und 2009 hat der VDV neben dem Einsatz erneuerbarer Energien für den elektrisch betriebenen ÖPNV auch Kenngrößen bezüglich des Einsatzes von alternativen Kraftstoffen bei ÖPNV-Busunternehmen abgefragt [VDV 2007 und 2010; Pfeiffer 2010]. Die Ergebnisse dieser Sondererhebungen wurden dem Projektkonsortium zur Verfügung gestellt und konnten somit spezifisch für die Frage des Einsatzes erneuerbarer Energien für den ÖPNV – insbesondere für den ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren – ausgewertet werden. Für den elektrisch betriebenen ÖPNV wurden die Sondererhebungen des VDV durch eigene Erhebungen ergänzt. Im Folgenden wird, getrennt nach ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor und elektrisch betriebenen ÖPNV, der Stand des Einsatzes erneuerbarer Energie vorgestellt.

#### 3.3.1 ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren

ÖPNV-Verkehre mit konventionellem Verbrennungsmotor sind derzeit im Wesentlichen Verkehre mit Bussen mit Dieselmotor. Aus diesem Grund stand die Analyse der verwendeten Dieselmotorkraftstoffe sowie alternativer Dieselmotorkraftstoffe im Mittelpunkt der Sondererhebungen des VDV. Dabei wurde konkret für das Jahr 2006 die Verwendung folgender Energieträger abgefragt [VDV 2007]:

- Biodiesel (z. B. Pflanzenölmethylester/PME),
- Pflanzenöl (z. B. Rapsöl) und
- sowie synthetischer Diesel.

Weiterhin wurde aber auch der Einsatz von fossilem Gas und Biogas für Erdgasbusse erhoben [VDV 2007].

Aus den Umfrageergebnissen leitet der VDV für das Jahr 2006 ab, dass 98,2 % des Gesamtverbrauches von 758,3 Mio. Liter Dieselmotorkraftstoff aus fossilen Quellen stammt. Auf Biodiesel (PME) entfallen 1,3 % und auf Pflanzenöl gerade noch 0,4 %. Der Einsatz von synthetischem Diesel im Busverkehr war im Jahr 2006 mit 0,1 % eher zu vernachlässigen [VDV 2007].

Von den 818 Gasbussen, die im Jahr 2006 von VDV-Unternehmen im Einsatz waren, wurde der überwiegende Teil mit konventionellem Erdgas betrieben. Der in Normkubikmetern ( $\text{Nm}^3$ ) gemessene Verbrauch an Gas lag bei 24,1 Mio.  $\text{Nm}^3$ . Dabei wurde fast ausschließlich Erdgas und nur zu einem verschwindend geringen Anteil (0,1 Mio.  $\text{Nm}^3$ ) Biogas verwendet [VDV 2007].

Aus den Umfrageergebnissen von 2009 geht neben dem Gesamtverbrauch an Dieselmotorkraftstoff lediglich der Einsatz von Biokraftstoff hervor; auf eine Differenzierung entsprechend der Umfrage aus dem Jahr 2006 wurde verzichtet [Pfeiffer 2010]. Der Einsatz von Biokraftstoffen liegt mit 0,5 % am Dieselmotorkraftstoffverbrauch unterhalb der Ergebnisse von 2006. Dies ist erstaunlich, da die oben genannten Werte von 2006 zusätzlich einer Korrektur hinsichtlich der nicht an der Umfrage teilnehmenden Unternehmen unterzogen worden sind. Dabei wurde für

alle Unternehmen ohne Rückmeldung angenommen, dass diese konventionellen Diesel einsetzen, wodurch sich das Verhältnis zu Ungunsten der Biokraftstoffe verschoben hat. Würde eine entsprechende Korrektur bei den Werten von 2009 ebenfalls durchgeführt werden, dürfte der Anteil an Biokraftstoffen noch geringer ausfallen.

	2006	2007	2008	2009	2010
Biodieselanteil	2,8%	4,3%	4,7%	6,4%	6,2%
<i>Quellen:</i> [ifeu 2010]; [Öko-Institut/IFEU 2011].					

**Tabelle 5 Beimischungsquoten von Biodiesel in konventionellem Diesel in Deutschland im Zeitraum 2006 bis 2010**

Der Rückgang des Einsatzes von reinen Biokraftstoffen bei ÖPNV-Busbetrieben ist durchaus plausibel, da in den letzten Jahren die Steuerbefreiung für Biokraftstoffe schrittweise aufgehoben wurde. Seit August 2006 wird reiner Biodiesel mit neun Cent pro Liter besteuert. Ab 2008 bis 2011 erhöht sich der Steuersatz jeweils um weitere sechs Cent, so dass ab 2012 der volle Steuersatz von 45 Cent greifen wird. Damit ist Preisvorteil von reinem Biodiesel in den letzten Jahren verloren gegangen, so dass sich für viele ÖPNV-Unternehmen der Einsatz von reinen Biokraftstoffen aus wirtschaftlichen Gründen nicht mehr lohnt. Allerdings hat in den letzten Jahren kontinuierlich die Beimischung von Biokraftstoffen in den konventionellen Dieselmotorkraftstoff zugenommen (siehe Tabelle 5) [Öko-Institut/IFEU 2011]. Damit hat indirekt der Anteil der Biokraftstoffe auch im ÖPNV über die Verwendung von konventionellem Dieselmotorkraftstoff zugenommen.

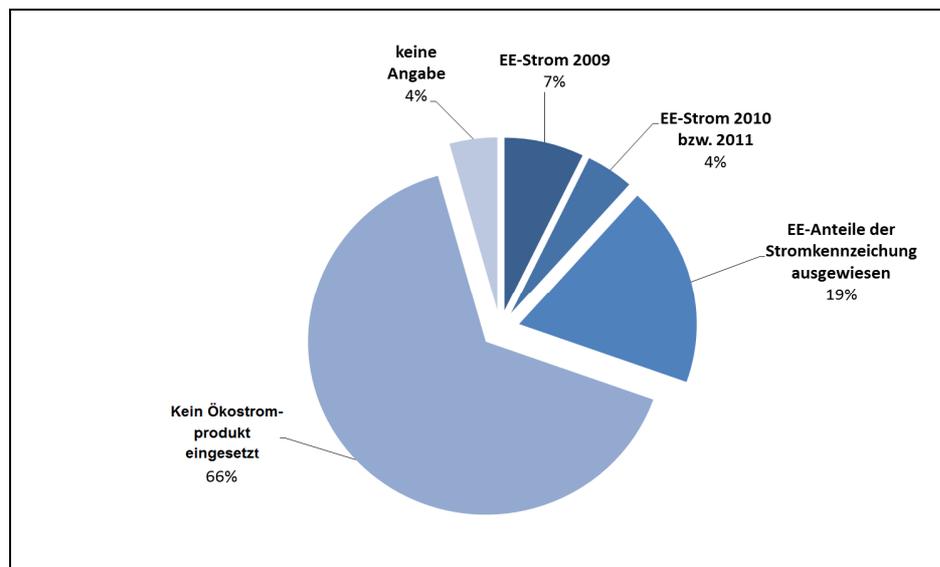
### 3.3.2 Elektrisch betriebener ÖPNV

In der Abfrage des VDV zum Fahrstrom für Straßen-, Stadt-, U-Bahnen und O-Busse wurde für das Jahr 2009 abgefragt, welcher Anteil des Stromes aus erneuerbaren Energie stammt [VDV 2010]. Demnach benötigten 2009 insgesamt 69 VDV-Unternehmen Fahrstrom in der Höhe von 1.866 Mio. kWh. Dieser Strom kommt nach Angaben der ÖPNV-Unternehmen bereits zu rund 23 % aus erneuerbaren Energiequellen. Da allerdings eine eindeutige Definition, um welche Art erneuerbarer Stromerzeugung es sich handelt, nicht abgefragt wurde, ist anzunehmen, dass ein Teil der Unternehmen hierbei oftmals auch den erneuerbaren Anteil des „konventionellen“ Stromlieferanten bei der Abfrage ausgewiesen hat (EE-Anteil nach der Stromkennzeichnung des Stromlieferanten). Hierbei handelt es sich in der Regel um erneuerbaren Strom aus Anlagen, die bereits existieren und somit faktisch zu keiner Minderung der Treibhausgas-Emissionen in Deutschland führen. Zu einer zusätzlichen Minderung der Treibhausgas-Emissionen kommt es nur, wenn durch den Strombezug der ÖPNV-Unternehmen neue, derzeit noch nicht existente Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien gebaut würden. Viele der auf dem Strommarkt erhältlichen so genannten Ökostrom- oder Grünstromangebote verpflichten sich daher, durch den Strombezug in gewissem Rahmen Neuanlagen zuzubauen. Das Label „ok-power“ beispielsweise schreibt für Ökostromangebote vor, dass ein Drittel des Strom in Neuanlagen, die nicht älter als sechs

Schlussbericht

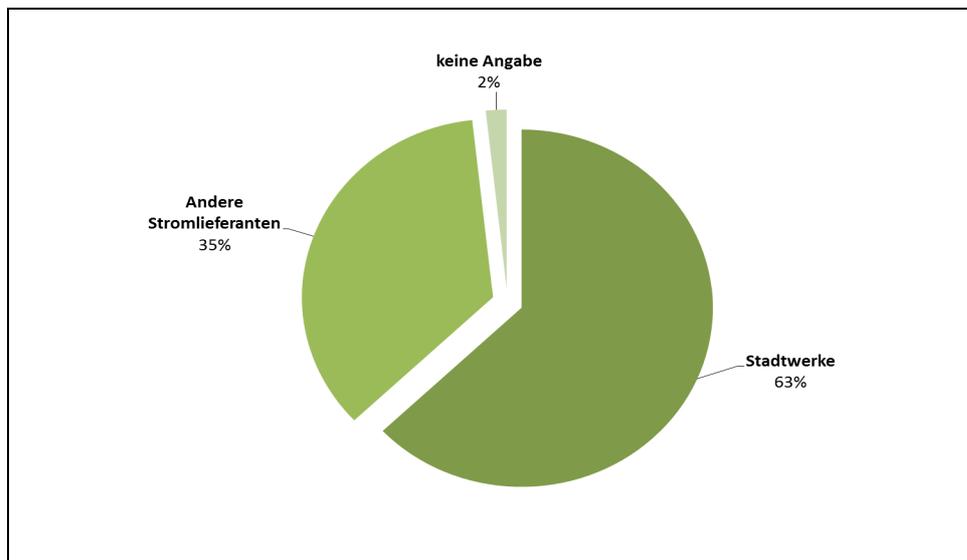
Jahre sind, und ein Drittel in neueren Bestandsanlagen, die nicht älter als 12 Jahre sind, erzeugt wird.

Aus diesem Grund wurde vom Projektkonsortium eine eigene Umfrage durchgeführt, in der nochmals die Stromlieferanten und die gelieferten Stromprodukte näher untersucht wurden. Insgesamt haben 2009 rund 7 % der Unternehmen (= 5 Unternehmen) im Jahr 2009 zu 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen eingesetzt (siehe Abbildung 26). Lediglich ein Unternehmen hat dabei ein Stromprodukt eingesetzt, dass mit einer Zubauverpflichtung versehen ist. Die Umfrage hat auch ergeben, dass zum 1.1.2010 bzw. zum 1.1.2011 drei weitere Unternehmen vollständig auf Strom aus erneuerbare Energien umgestellt haben. Bei keinem der neuen Unternehmen wird Ökostrom mit klar definierten Zubauverpflichtungen eingesetzt. Viele der Unternehmen, die bisher Strom aus erneuerbaren Energien einsetzen, beziehen diese aus „alten“ Wasserkraftwerken oder verwenden so genannte RECS-Zertifikate (Renewable Energy Certificate System). Letztere sichern ab, dass der verwendete Strom aus erneuerbaren Quellen innerhalb Europas kommt; RECS-Zertifikate bedeuten aber nicht, dass der Strom in Neuanlagen erzeugt wurde. Wie Abbildung 26 außerdem zeigt, setzen 19 % der Unternehmen (= 13 Unternehmen) zum Teil erneuerbaren Strom ein. Die Analyse der Lieferanten zeigt, dass es sich hierbei um die regenerativen Anteile des konventionellen Stromlieferanten handelt. Wenige Unternehmen beziehen für einen Teil ihres Stroms spezielle Stromprodukte aus erneuerbaren Energien (z. B. beziehen die Berliner Verkehrsbetriebe zusätzlichen Wasserkraftstrom, für den RECS-Zertifikate vorliegen [BVG 2010b]). Insgesamt 66 % der ÖPNV-Unternehmen (= 45 Unternehmen) setzten keine speziellen Ökostromprodukte für den Fahrstrom ein. Indirekt erhalten diese Unternehmen entsprechend der EEG-Umlage auch über Ihren Stromlieferanten regenerativ erzeugten Strom.



**Abbildung 26 Anteil der ÖPNV-Unternehmen, die Strom aus erneuerbaren Energiequellen (EE-Strom) für den Betrieb von Straßen-, Stadt- und U-Bahnen sowie O-Busse einsetzen (Stand: Januar 2011) [Pfeiffer 2010, eigene Recherchen]**

In Hinblick auf die Möglichkeit, inwieweit ÖPNV-Unternehmen gezielt durch die Auswahl Ihres Stromlieferanten Strom aus erneuerbaren Energiequellen einsetzen können, ist wichtig zu wissen, ob die ÖPNV-Unternehmen bei der Wahl des Stromlieferanten frei agieren können. Dies ist nur bedingt der Fall, wenn das ÖPNV-Unternehmen unter dem Dach eines Stadtwerkes fungiert und von den Stadtwerken den Strom bezieht. Aus diesem Grund wurde dieser Aspekt nochmals getrennt vom Projektkonsortium untersucht. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass 51 ÖPNV-Unternehmen derzeit Strom von den jeweiligen Stadtwerken beziehen; das entspricht 74 % der ÖPNV-Unternehmen, die elektrisch betriebenen ÖPNV betreiben. Bezogen auf den verbrauchten Fahrstrom, liegt der Anteil, der über die Stadtwerke geliefert wird, nur bei rund 63 % (siehe Abbildung 27). Der geringere Anteil hat den Grund, dass gerade kleinere ÖPNV-Unternehmen den Strom von den Stadtwerken beziehen. Einige der großen ÖPNV-Unternehmen sind hingegen eigenständige Unternehmen, die nicht unter dem Dach von Stadtwerken arbeiten. Diese Unternehmen sind auch diejenigen, die verhältnismäßig frei ihren Stromlieferanten wählen können.



**Abbildung 27 Anteil der Stromlieferanten am Fahrstromverbrauch der Straßen-, Stadt- und U-Bahnen sowie O-Busse 2009 in Deutschland [eigene Recherchen]**

### 3.4 Zusammenfassung

Öffentliche Verkehrsmittel sind in den letzten beiden Jahrzehnten wesentlich energieeffizienter geworden. Deutlich wird dies an Kenngrößen, die unabhängig von der Auslastung sind und berücksichtigen, dass sich die Fahrzeuggröße verändert hat. Als ein geeignetes Maß kann die Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs in Megajoule (MJ) pro Platz-Kilometer herangezogen werden (siehe Tabelle 6). Im Vergleich zum Jahr 1990 konnten bis zum Jahr 2008 die spezifischen Verbräuche des ÖPNV pro Platz-km deutlich gesenkt werden, im Einzelnen:

- Linienbusse (einschließlich Erdgas- und O-Busse): -15 %
- Straßen- und Stadtbahnen: -13 %
- U-Bahnen: -19 %.

Die Energieeinsparungen liegen damit in der gleichen Größenordnung bzw. über den Einsparungen in Höhe von 13 %, die im gleichen Zeitraum beim Pkw-Verkehr erzielt wurden. Bei dieser Betrachtung wird der ursprüngliche Ansatz des Projektes, nämlich eine Wertung bezogen auf Fahrzeuge, verlassen, denn würde nicht berücksichtigt, dass in den letzten Jahren verstärkt größere Busse (z. B. Gelenkbusse) bzw. Straßen- und Stadtbahnen mit höheren Platzkapazitäten eingesetzt wurden, ergäbe sich ein verfälschtes Bild. Ohne Berücksichtigung des Zuwachses an Plätzen pro Fahrzeug bzw. Wagen, führen die größeren Fahrzeuge zu mehr Energieverbrauch und kompensieren teilweise die Energieeinsparungen, die bei unveränderter Fahrzeuggröße erzielt würden. Tabelle 6 zeigt diesen Effekt im Vergleich. Bei den Straßen- und Stadtbahnen ergibt sich sogar ein Mehrverbrauch bezogen auf den Wagen jedoch ein deutlicher Minderverbrauch bezogen auf den Platz.

Größe	Einheit	1990	1995	2000	2005	2008	2008-1990
<b>Energieverbrauch pro Fahrzeug-/Wagen-km</b>							
Pkw	MJ/km	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	-13%
Busse	MJ/km	14,8	14,8	13,6	13,9	14,0	-5%
Straßen-/Stadtbahnen	MJ/Wagen-km	12,2	12,1	13,5	14,3	14,8	21%
U-Bahnen	MJ/Wagen-km	8,7	8,5	8,4	8,0	7,7	-12%
<b>Verbrauch pro Platz-km</b>							
Pkw	MJ/Platz-km	0,60	0,58	0,55	0,53	0,52	-13%
Busse	MJ/Platz-km	0,24	0,24	0,21	0,21	0,20	-15%
Straßen-/Stadtbahnen	MJ/Platz-km	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	-13%
U-Bahnen	MJ/Platz-km	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	-19%
<b>CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Platz-km</b>							
Pkw	g CO <sub>2</sub> e/Platz-km	54,8	50,4	48,7	45,8	44,0	-20%
Busse	g CO <sub>2</sub> e/Platz-km	21,7	20,1	18,2	16,9	16,2	-25%
Straßen-/Stadtbahnen	g CO <sub>2</sub> e/Platz-km	27,4	20,5	17,1	15,3	14,4	-47%
U-Bahnen	g CO <sub>2</sub> e/Platz-km	21,5	16,1	13,3	11,8	10,6	-51%
<b>CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Pkm</b>							
Pkw	g CO <sub>2</sub> e/Pkm	197,0	164,0	163,8	153,5	146,6	-26%
Busse	g CO <sub>2</sub> e/Pkm	86,9	85,7	80,1	79,1	80,5	-7%
Straßen-/Stadtbahnen	g CO <sub>2</sub> e/Pkm	120,8	117,6	98,0	81,8	72,1	-40%
U-Bahnen	g CO <sub>2</sub> e/Pkm	131,0	97,9	81,3	69,0	62,0	-53%
<b>Quellen:</b> Richter 2011a; HBEFA 2010; Dziambor 2011; Pfeifer 2010; ifeu 2010; eigene Berechnungen.							

**Tabelle 6 Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs und der spezifischen CO<sub>2</sub>-Äquivalente des ÖPNV und des Pkw-Verkehrs in Deutschland im Zeitraum 2006 bis 2010**

Ein wesentlicher Grund für die Energieeffizienzgewinne im ÖPNV ist die Modernisierung des bestehenden Fuhrparks mit der Neubeschaffung von energiesparenden Fahrzeugen gerade bei Straßen-, Stadt- und U-Bahnen. Die Modernisierung dieser Fahrzeuge hat beispielsweise den Anteil der Fahrzeuge, die Strom in das Netz zurück speisen können, deutlich erhöht. Neue, energieoptimierte Schaltprogramme haben bei Bussen ebenfalls zu Kraftstoffeinsparungen geführt. Neben der Optimierung des Antriebsstranges wurden in der Vergangenheit auch Nebenaggregate und Nebenverbraucher optimiert (z.B. Heizung und

Schlussbericht

Beleuchtung) sowie betriebliche Maßnahmen von den Verkehrsunternehmen ergriffen (z. B. Fahrertraining, Optimierung der Fahrzeugumläufe). Die Anhebung der Nennspannung der Bahnstromversorgung hat ebenfalls zur Reduktion des Stromverbrauchs beigetragen. Allerdings ist auch festzustellen, dass in den letzten Jahren Trends eingetreten sind, die die erzielten Energieeinsparungen zum Teil wieder aufgebraucht haben. Zu nennen ist in diesem Zusammenhang insbesondere, neben höhere Abgasstandards bei den Bussen, die Tendenz zur Klimatisierung der Busse und Bahnen.

Neben der Entwicklung der Energieeffizienz ist in der Tabelle 6 die Entwicklung der Treibhausgasemissionen (berechnet als CO<sub>2</sub>-Äquivalente einschließlich der Emissionen zur Herstellung der Kraftstoffe und des Stroms) für den Zeitraum 1990 bis 2008 dargestellt. Die Tabelle zeigt, dass die spezifischen CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Platz-km stärker zurückgegangen sind als der Energieverbrauch. Im Einzelnen wurden folgende Minderungen pro Wagen-km zwischen 1990 und 2008 erreicht:

- Linienbusse (inkl. Erdgas- und O-Busse): - 25 %
- Straßen- und Stadtbahnen: - 47 %
- U-Bahnen: - 51 %.

Ursache für den überproportionalen Rückgang ist bei den elektrisch betriebenen Verkehrsmitteln die Reduktion der spezifischen Treibhausgasemissionen pro Kilowattstunde Strom durch die Modernisierung des Kraftwerkparcs und durch den Ausbau erneuerbarer Energiequellen in Deutschland. Bei den Bussen ergibt sich die stärkere Reduktion durch den Einsatz verbesserter Kraftstoffqualitäten in Ostdeutschland nach der Wiedervereinigung und in den letzten Jahren durch den wachsenden Anteil von im konventionellen Diesel beigemischten Biokraftstoffs.

Detailanalysen zeigen aber auch, dass bisher nur wenige ÖPNV-Unternehmen gezielt erneuerbare Energien einsetzen. Reine Biokraftstoffe wurden von VDV-Unternehmen im Jahr 2006 zu 1,8 %, im Jahr 2009 zu 0,5 % bezogen auf die Gesamtkraftstoffmenge eingesetzt und sind damit vernachlässigbar. Lediglich acht Unternehmen (rund 11 % Unternehmen mit elektrisch betriebenen ÖPNV) beziehen 100 % regenerativ erzeugten Ökostrom. Aber lediglich ein Unternehmen nutzt bisher ein zertifiziertes Ökostromprodukt, das eine Verpflichtung zum Neubau von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energie enthält und damit auch real zu zusätzlichen Emissionsminderungen führt. Letztendlich sind ÖPNV-Unternehmen bisher lediglich Profiteure von nationalen Verbesserungen (z. B. Erhöhung des erneuerbaren Stromanteils durch das EEG oder Erhöhung der Beimischungsquoten im konventionellen Diesel).

Abbildung 28 zeigt für die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer, dass sich die Passivität in Bezug auf den Einsatz erneuerbarer Energien bisher nicht auf den Vergleich mit dem Pkw ausgewirkt hat. Im Jahr 2008 schneidet der Busverkehr über alle Fahrzeugkonzepte 45 % günstiger ab als der Pkw. Straßen- und Stadtbahnen liegen gar 51 % bzw. 58 % günstiger als der Pkw. Das Bild zeigt auch, dass heutzutage die Dieselmotoren mehr oder weniger die Treibhausgasemissionen des Busbereiches dominieren. Aus diesem Grund sind die Werte für Dieselmotoren und für den Gesamtdurchschnitt der Busse identisch.

Erstaunlich ist, dass die Erdgasbusse in Bezug auf die Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Pkm im Durchschnitt schlechter abschneiden als die Dieselsebusse. Zwar haben die Erdgasbusse bei der Betrachtung der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen einen leichten Emissionsvorteil gegenüber den Dieselsebussen. Werden aber die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen einschließlich der Herstellung und des Transportes des Erdgases betrachtet, wie es in der Abbildung der Fall ist, dann schneidet der Erdgasbus klimaseitig schlechter ab als der Dieselsebus. Ursächlich sind die verhältnismäßig hohen Treibhausgasemissionen bei der Herstellung des Erdgases.

Abbildung 28 zeigt aber auch, dass O-Busse unter Klimagesichtspunkten bereits heute besser abschneiden als alle anderen Verkehrsmittel des ÖPNV.

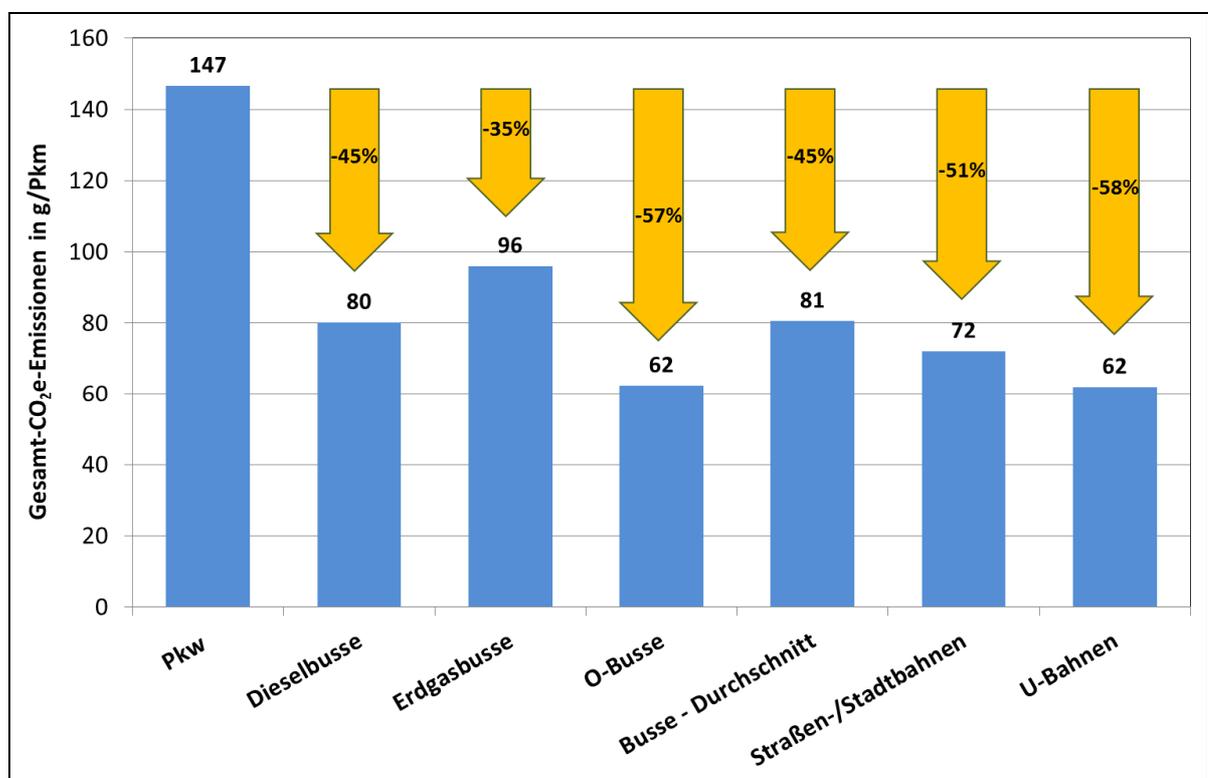


Abbildung 28 Spezifische CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personen-Kilometer für verschiedene Verkehrsmittel im ÖPNV im Vergleich zum Pkw für das Jahr 2008 [Richter 2011a; HBEFA 2010; Dziambor 2011; ifeu 2010; eigene Berechnungen]

## **4 Maßnahmen zur zukünftigen Steigerung der Energieeffizienz und der erneuerbaren Energien im ÖPNV**

Während das vorangegangene Kapitel beschreibt, wie sich der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des ÖPNV in den vergangenen Jahren entwickelten und welche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und des Einsatzes erneuerbarer Energien bereits umgesetzt wurden, werden in Kapitel 4.1 Maßnahmen beschrieben, mit denen sich der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen bis 2030 senken lassen.

In den folgenden Unterkapiteln wird konkret aufgezeigt, mit welchen Maßnahmen zukünftig der Energieverbrauch des ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren und des elektrisch betriebenen ÖPNV bis 2030 vermindert werden können (Kapitel 4.1). Darüber hinaus wird in Kapitel 4.2 aufgezeigt, welche Maßnahmen ergriffen werden können, um mit dem Einsatz erneuerbarer Energien die Treibhausgasemissionen im ÖPNV zusätzlich zur Energieeffizienz zu senken. Kapitel 4.3 fasst die Ergebnisse noch einmal zusammen.

Das Kapitel 4 zeigt somit grundsätzlich auf, welche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und des Einsatzes erneuerbarer Energien theoretisch möglich sind. Dabei werden auch die erzielbaren Reduktionspotentiale und dort wo möglich auch die damit verbundenen Kosten aufgezeigt. Ob diese theoretisch möglichen Minderungspotentiale auch wirklich realisiert werden, hängt auch davon ab, inwieweit die Hersteller von Bussen und Schienenfahrzeugen für den ÖPNV durch verstärkte Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf das Thema Energieeffizienz die Potentiale heben und die ÖPNV-Unternehmen zukünftig bewusst Investitionen in effiziente Technologien durchführen werden. Die Fragen, welche Minderungsmaßnahmen die Fahrzeughersteller und ÖPNV-Unternehmen priorisieren und welche der theoretisch verfügbaren Potentiale zur Energieeffizienz und zum Ausbau erneuerbarer Energien abgerufen werden, werden in den folgenden Kapiteln untersucht.

## **4.1 Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bis 2030**

Bei der Betrachtung der Effizienzmaßnahmen bis 2030 wird analog zum Vorgehen im vorangegangenen Kapitel zwischen dem ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor und dem elektrisch betriebenen ÖPNV unterschieden. Neben fahrzeugseitigen und betrieblichen Maßnahmen werden für den elektrisch betriebenen ÖPNV auch Maßnahmen erörtert, die sich auf Effizienzverbesserung bei der Infrastruktur beziehen.

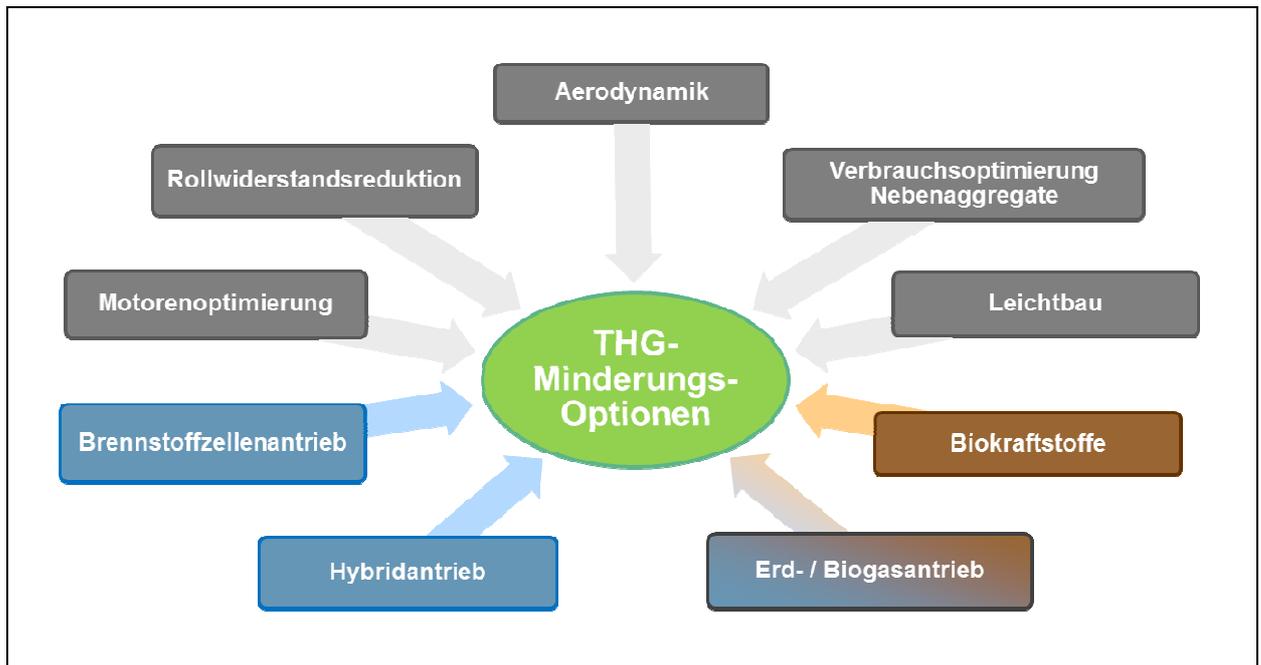
### **4.1.1 ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren**

Unter dem ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor werden im Weiteren die Busse mit Dieselmotor betrachtet, die den mit Abstand größten Anteil der Verkehrsleistung im Busbereich erbringen (im Jahr 2008 über 97 % der Verkehrsleistung). Nichtsdestotrotz können die unten beschriebenen Effizienzmaßnahmen im Einzelnen auch bei Bussen mit Erdgasantrieb oder Brennstoffzellenantrieb zu Minderungen des Energieverbrauches führen. Oberleitungsbusse werden aufgrund der geringen Verbreitung und des vorerst nicht zu erwartenden zusätzlichen Netzausbaus nicht hinsichtlich spezifischer Minderungsmaßnahmen untersucht. Streng genommen müssten deren Minderungsoptionen zudem im Kapitel elektrisch betriebener ÖPNV analysiert werden, resp. können von dort zum Teil übernommen werden.

In den folgenden Analysen der Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz wird zwischen Maßnahmen unterschieden, die fahrzeugseitig realisiert werden können und Maßnahmen, die betrieblicher oder planerischer Natur sind. Für beide Bereiche wird aufgezeigt, welche Maßnahmen im Einzelnen möglich sind, um die Energieeffizienz zu steigern.

#### **4.1.1.1 Fahrzeugseitige Maßnahmen**

Die nachfolgende Abbildung 29 stellt für Busse die grundsätzlich möglichen Ansatzpunkte zur Reduktion der Treibhausgasemissionen dar. Fokussiert wird dabei ausschließlich auf fahrzeugtechnische Maßnahmen.



**Abbildung 29 Fahrzeugseitige Möglichkeiten zur Minderung der Treibhausgasemissionen und Erhöhung der Energieeffizienz im ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor [eigene Darstellung]**

Bei den grau hinterlegten Feldern in der oben stehenden Abbildung handelt es sich um mögliche Ansatzpunkte für technische Minderungspotentiale. Blau hinterlegt sind mögliche alternative Antriebskonzepte, in braun sind Optionen für den Einsatz von alternativen Kraftstoffen wie Biokraftstoffen oder Biogas dargestellt. Im Rahmen dieses Kapitels werden ausschließlich die grau und blau hinterlegten Optionen untersucht, da sich die Treibhausgasemissionen durch die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs der Busse ergibt und damit auf Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zurückzuführen ist. Die braun hinterlegten Maßnahmen setzen den Einsatz von regenerativer Energie voraus und werden daher im Kapitel 4.2.1 behandelt.

Im Weiteren werden jeweils für die einzelnen Teilbereiche Minderungsmaßnahmen vorgestellt und deren Einsparpotential quantifiziert. Weiterhin werden vereinzelt Hindernisse aufgeführt, die einen Einsatz einzelner Maßnahmen in Zukunft wenig wahrscheinlich erscheinen lassen.

### Leichtlauföle

Durch den Einsatz von synthetischen Motorenölen mit geringerer Viskosität (0W20; 0W30 und 5W30) kann die innermotorische Reibung verringert und damit der Kraftstoffverbrauch gesenkt werden. In der Literatur werden für den Lkw-Bereich Einsparpotentiale von 1 - 2 % [NAP 2010] bis 3 % genannt [Öko-Institut 2009, VTT 2006, DVZ 2007]. Für den Einsatz in Linien- und Reisebussen, in dem zwar die Motoren identisch sind sich aber der Fahrzyklus deutlich unterscheidet, gehen Zimmer et al. ebenfalls von 3 % Verbrauchsminderung aus. Experten aus den Verkehrsunternehmen hingegen sehen geringere Einsparpotentiale (0 % bis 2%) im Busbereich. Aus Sicht einiger Bushersteller liegt das maximale Einsparpotential bei 1,5 %.

Zudem betonen die Teilnehmer des durchgeführten Experten-Workshops, dass der Einsatz von Leichtlaufölen das Risiko einer geringeren Motorenlebensdauer birgt und somit keine realistische Maßnahme im Stadtbetrieb darstellt.

### **Leichtlaufreifen**

Der Einsatz von Leichtlaufreifen kann den Rollwiderstand im Vergleich zu konventionellen Reifen um bis zu 30 % mindern [UBA 2010b]. Im Abschlussbericht zum Projekt Renewbility [Öko-Institut 2009] wird ebenfalls von derzeit um 20 % bis 30 % reduzierten Rollwiderständen ausgegangen. Es wird jedoch von Experimentalreifen berichtet, deren Rollwiderstand um 50 % reduziert ist, welche zukünftig eingesetzt werden könnten.

Friedrich (2002) beziffert die Verbrauchsminderung durch den Einsatz von rollwiderstands-optimierten Reifen auf 5 % bis 8 %. NAP (2010) zu Folge ist das mögliche Einsparpotential durch Leichtlaufreifen bei Linienbussen mit 0,8 % bis 1,2 % eher gering. Renewbility geht von je nach Fahrsituation unterschiedlichen Einsparpotentialen aus (6 % innerorts, 4 % außerorts bzw. 3 % auf der Autobahn) [Öko-Institut 2009].

Das maximale Einsparpotential im Busbetrieb wurde von mehreren Busherstellern im Rahmen des Expertenworkshops auf 2 % beziffert. Dem steht allerdings den Experten zu Folge eine verringerte Laufleistung gegenüber, weshalb der Einsatz durch die anwesenden Verkehrsunternehmen nicht vorgesehen ist.

### **Leichtbau**

Das Fahrzeuggewicht ist ein wichtiger Einflussfaktor für den Kraftstoffverbrauch. Durch den Einsatz von Leichtbaukomponenten und Materialien wie beispielsweise hochfesten Stählen, Sandwichkonstruktionen, Aluminium- und Glasfaserelementen kann das Fahrzeuggewicht reduziert werden. Die Reduktion des Kraftstoffverbrauches durch eine Gewichtsminderung von 1.000 kg beträgt laut OMNIBUS (2006) 6 %. VTT (2007) ermitteln einen zusätzlichen Verbrauch von 2 l/100km bzw. 5 % bei einer Gewichtserhöhung von 1.000 kg. NAP (2010) geht von 2 bis 3% Kraftstoffersparnis bei einer Reduktion um 1.000 lb (rund 450 kg) aus.

Auf dem Markt für Linienbusse sind bereits Leichtbaufahrzeuge erhältlich (bspw. Citea Light Low Entry von VDL) oder angekündigt (bspw. Volvo 7900). Das Gewicht des VDL-Fahrzeugs beträgt laut TNO (2007) bei einer Länge von 12 m rund 8.800 kg im Vergleich zu üblichen 11.000 kg bis über 13.000 kg. Die von TNO ermittelten Verbrauchswerte liegen je nach Testzyklus zwischen 20 % bis 22 % (Braunschweig Testzyklus) bzw. 15 % bis 23 % (Helsinki 3 Testzyklus) unter denen konventioneller Dieselsebusse.

Die bei Workshop anwesenden Experten bezifferten das maximale Minderungspotential durch Leichtbau hingegen auf 3,5 % bei einer Gewichtsreduktion von 1.000 kg. Maximal sollen den Experten zu Folge so 10 % Verbrauchsminderung möglich sein. Aus Sicht einiger Verkehrsunternehmen stellt der Einsatz von Leichtbaubussen derzeit keine Option dar. Sie erwarten, dass die Fahrzeuge eine wesentlich geringere Lebensdauer (-50 %) besitzen. Weiterhin bestünden erhebliche Komforteinbußen, insbesondere in Bezug auf die Geräuschemissionen. Ebenfalls bestehen auf Seite der Betreiber Bedenken hinsichtlich der Sicherheit der Fahrzeuge.

Ein weiteres deutsches Verkehrsunternehmen setzt die Fahrzeuge von VDL derzeit testweise ein und nennt eine Verbrauchsminderung von 22 %.

### **Optimierung von Motor und Getriebe**

Unter der Optimierung der Motoren ist die Verbesserung der Komponenten der Motoren zu verstehen, die nicht mit der Einführung neuer Fahrzeugtechnologien verbunden sind, wie beispielsweise geringere bewegte Masse im Motor, reduzierte Reibung, optimierte Einspritzpumpen und Ventile und eine effizientere Verbrennung.

NAP (2010) gibt ein Minderungspotential durch die Optimierung des Motors von 14 % an. Dabei nennt NAP die Maßnahmen variable Ventilsteuerung (1 %), Turboaufladung (1 %), zweifache Turboaufladung mit Ladeluftkühler (2 bis 5 %) und Abgasrückführung bei niedrigen Temperaturen (1 %). Jedoch bezieht NAP die Minderung auf ein 12-m Basisfahrzeug mit einem Verbrauch von über 70 l/100km, der deutlich über den in Europa üblichen Verbrauchswerten liegt. Renewbility geht von Effizienzsteigerungen der allgemeinen Motorenentwicklung von 6 % in 2020 und 8 % in 2030 aus [Öko-Institut 2009].

Erfahrungen eines Verkehrsunternehmens zeigen, dass alleine mit einer Optimierung der Motormanagement-Software (Chiptuning) der Dieserverbrauch um bis zu 10 % gesenkt werden kann. Dieses hohe Potential liegt nach Auskunft der Fahrzeughersteller darin begründet, dass aktuell in Bussen und Lkw die gleichen Motoren genutzt werden. Aufgrund des wesentlich größeren Absatzmarktes sind diese auf den Einsatz im Lkw hin optimiert. Unklar ist derzeit, wie sich das Chiptuning auf die Lebensdauer des Motors auswirkt.

NAP (2010) beziffert das Einsparpotential an Getriebe und Antriebswelle bei Stadtbussen mit 4 %. Möglichkeiten zur Minderung des Kraftstoffverbrauches ergeben sich beispielsweise aus verringerter Reibung, verringerten sonstigen Verlusten, verbesserter Schaltprogramme und Erhöhung der Anzahl der Gänge. NAP zu Folge liegt die Verbrauchsminderung durch eine automatische 8-Gang-Schaltung bei 2 % bis 3 %, durch vermeidbare Verluste bei 1 %, durch ein aggressiveres Schaltverhalten bei 0,5 % bis 1 %. Weiterhin beziffert NAP das Einsparpotential durch eine angemessene Auslegung auf 1 % bis 3 %.

Renewbility unterstellt Minderungspotentiale von 1 % (Autobahn); 3 % (AO) und 6 % (IO) durch den Einsatz von automatisierten Schaltgetrieben (ASG) und stufenloser Getriebe (CVT) [Öko-Institut 2009].

Die Experten der am Workshop teilnehmenden Bushersteller sehen mittelfristig bis 2030 Effizienzsteigerungspotentiale von 10 % bis 15 % durch Maßnahmen zur Optimierung von Motor und Getriebe.

### **Nutzung der Energie im Abgas**

Wie aus Abbildung 5 hervorgeht, treten die größten Verluste beim Busbetrieb direkt am Motor auf. Große Teile werden mit den Abgasen direkt an die Umwelt abgegeben, daher liegt es nahe zu betrachten, inwieweit diese Energie genutzt werden kann. Möglichkeiten bestünden beispielsweise durch den Einsatz eines mechanischen oder elektrischen Turbo-Compound-Antriebs, einer Nutzturbine die hinter der Turbine des Turboladers angeordnet ist. Damit

könnte die Druckdifferenz nutzbar gemacht werden. Turbo-Compound-Antriebe wurden vor knapp 20 Jahren bereits von Volvo und Scania in Lkws eingesetzt. Allerdings führen sie nur in bestimmten Bereichen des Motorkennfeldes zu Verbrauchsminderungen. Damit ist nach Auskunft der am Expertenworkshop teilnehmenden Bushersteller ein Einsatz in Bussen nicht sinnvoll. Auch im Lkw-Bereich wurde die Entwicklung aufgrund des konstruktiven und finanziellen Aufwandes vorerst eingestellt [Eurotransport 2011].

Daneben wäre die Nutzung der hohen Abgastemperatur durch einen nachgeschalteten Rankine-Prozess denkbar. Damit könnte elektrische Energie erzeugt werden die entweder den Motor elektrisch unterstützt (Hybridfahrzeuge) oder zum Betrieb elektrifizierter Nebenaggregate dient. Als Energiequelle könnten dafür neben den Abgasströmen auch die Ströme aus der Abgasrückführung, der Aufladung und der Motorenkühlung dienen [NAP 2010]. NAP führt Einsparpotentiale für Nutzfahrzeuge von bis zu 10 % auf. Den Experten der Bushersteller zu Folge ist der Einsatz einer solchen Technologie in Bussen auch zukünftig unwahrscheinlich, da das Einsparpotential ebenfalls nur in einem kleinen Bereich des Motorkennfeldes hoch ist und sich zudem ein hoher Platzbedarf ergeben würde.

Im Weiteren werden beide Technologien für den Zeitraum bis 2030 nicht weiter betrachtet.

### **Minderung des Luftwiderstands**

NAP (2010) zu Folge besteht bei Stadtbussen kein Einsparpotential. Mögliche Verbrauchsminderungen bei Überlandbussen beziffert NAP hingegen mit 8 %. Von den Teilnehmern des Expertenworkshops wurde die Einschätzung geteilt, dass geringe Einsparpotentiale bestehen.

Einige mögliche Maßnahmen zur Verbesserung des Luftwiderstandes wie beispielsweise die strömungsgünstige Optimierung des Heckbereiches können zu einer Verengung des Innenraumes führen, weshalb deren Umsetzung unwahrscheinlich ist [HUCHO 2005]. Realistisch erscheinen HUCHO (2005) zu Folge dagegen Heckkantenradien, eine leichte Absenkung am Dachende und geringfügige Verjüngungen in der Seitenwand. Verbesserungen des  $c_w$ -Werts bei nur mäßiger Verringerung des Transportvolumens können demzufolge durch Radien an den Heckkanten (4 % bis 8 %) und durch Seitenwand- und Dacheinzüge (6 % bis 20 %) erreicht werden. Daneben ist die Größe der Stirnkantenradien eine wesentliche Einflussgröße auf den Luftwiderstand eines Omnibusses.

In Renewbility wird von einer möglichen Minderung des Luftwiderstandes um 10 % und Kraftstoffverbrauchsminderungen von 1 % (IO) bzw. 3 % (AO) und 4 % (Autobahn) ausgegangen [Öko-Institut 2009].

### **Energieeffiziente Nebenaggregate**

In Abbildung 5 sind die Energieverluste im Busbetrieb dargestellt, wie sie bei einem Einsatz entsprechend dem Fahrzyklus SORT 2 auftreten können. Es wird deutlich, dass auch die Nebenaggregate wie beispielsweise Druckluftkompressoren für den Türbetrieb und die Kneeling-Systeme oder Lenkhilfpumpen einen hohen Einfluss auf den Gesamtverbrauch besitzen. So beträgt der Anteil der Nebenaggregate in Linienbussen in Nürnberg beispielsweise 13 % bis 30 % [MAN 2010].

## Schlussbericht

Es gibt einige mögliche Maßnahmen den Verbrauch der Nebenaggregate zu reduzieren. Beispielsweise spielen in Bussen die Kompressoren für die pneumatischen Systeme eine größere Rolle. Diese Kompressoren sind überwiegend fest mit dem Antriebsstrang verbunden. Sind die Vorratsbehälter für die Druckluft gefüllt wird ein Ventil geöffnet und die Kompressoren fördern weiter Luft ohne diese zu komprimieren, wodurch es zu Energieverlusten kommt. Andersson [2004] modelliert ein Vorgehen, bei dem die Ventile geschlossen bleiben, solange die Lufttanks gefüllt sind. Die komprimierte Luft in den Zylindern federt in diesem Fall zurück, wodurch sich der Energieverbrauch des Kompressors in diesem Zustand um 50 % verringert.

Unter den am Expertenworkshop teilnehmenden Busherstellern herrschte kein einheitliches Bild über das mögliche Einsparpotential einer Elektrifizierung der Nebenaggregate. Es wurden Einsparpotentiale von 0 % bis zu 5 % bis 6 % genannt.

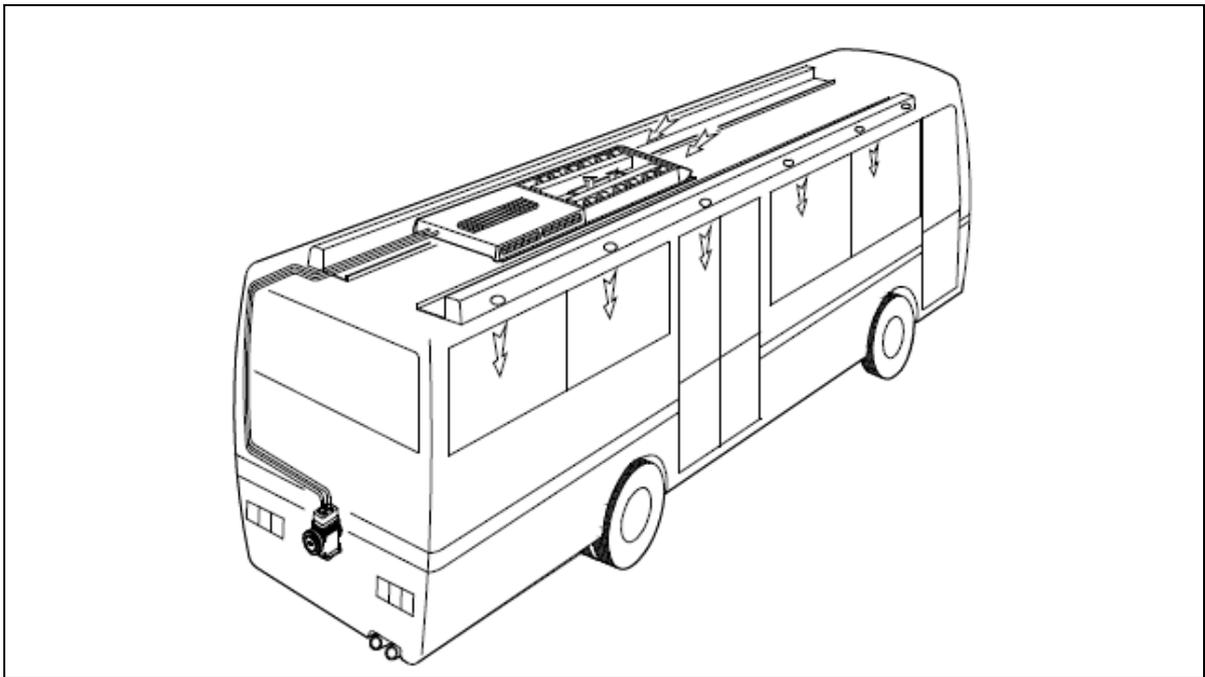
Letztlich stellt der Einsatz von effizienten Lichtmaschinen bei elektrifizierten Nebenaggregaten eine große Stellschraube für den Kraftstoffverbrauch dar. Üblicherweise besitzen eingesetzte Lichtmaschinen einen Wirkungsgrad von rund 50 %, wobei vergleichbare Bauteile aus dem stationären Bereich Wirkungsgrade von 80 % bis 90 % aufweisen können [Anderson 2004].

### **Klimatisierung**

Maßnahmen im Bereich der Fahrzeugklimatisierung können die Treibhausgasemissionen der Busse auf mehrere Arten mindern. Erstens kann die Energieeffizienz der Anlagen durch Optimierungen verbessert werden. Daneben kann der Energiebedarf durch eine optimierte Betriebsstrategie verringert werden. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Maßnahmen beeinflussen Klimaanlage die Treibhausgasemissionen allerdings nicht allein über Veränderungen des Kraftstoffverbrauches sondern auch durch Emissionen an klimaschädlichen Kältemitteln.

Grundsätzlich ließe sich der Mehrverbrauch von Klimaanlage ebenso wie die Emissionen von Kältemitteln durch einen Verzicht von Klimatisierung vermeiden. Dadurch würde sich der Kraftstoffverbrauch der Busse über das Jahr gesehen um rund 1 l/100 km verringern [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]. Einige der Befragten Verkehrsunternehmen verfolgen diese Strategie, berichten jedoch auch, dass es von Seiten der Kunden eine große Nachfrage nach klimatisierten Fahrzeugen gibt. Der Einsatz von klimatisierten Fahrzeugen in Deutschland ist in den letzten Jahrzehnten dementsprechend stark gestiegen. Nach Angaben der BVG waren in Deutschland im Jahr 1993 nur 5 % aller neuen Stadtbusse klimatisiert; im Jahr 2008 lag der Anteil bereits bei 64 % [BVG 2010a].

Durch eine Elektrifizierung der Klimakompressoren könnte auf die langen Leitungen durch die Fahrzeuge verzichtet (siehe Abbildung 30) und ein effizienterer Betrieb realisiert werden. Aktuell werden Klimaanlage mit einem unregelmäßigem Verdichter im Heck des Fahrzeuges betrieben, welcher von der Kurbelwelle her angetrieben wird und somit direkt an die Motordrehzahl gekoppelt ist.



**Abbildung 30 Standard-Aufdachklimaanlage auf 12m-Bus [Quelle: Sonnekalb 2006]**

Experten der Bushersteller sehen ein Kraftstoffminderungspotential von über 3,5 % durch eine Elektrifizierung des Verdichters [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]. Neben Downsizing und Gewichtsreduzierung ermöglicht ein elektrifizierter Verdichter bedarfsgerechte Klimakonzepte. Nach VDV 236 wird eine Solltemperatur in einem Stadtbus von 3 K unter der Außentemperatur im Fahrgastraum empfohlen. Üblicherweise werden Busklimaanlagen derzeit jedoch nicht temperaturgeführt betrieben [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]. Weiterhin könnten durch diese Maßnahme die Kältemittelverluste um rund 25 % gesenkt werden [Andersson 2004].

Eine weitere Möglichkeit zur Minderung der Treibhausgasemissionen könnte sich in Zukunft durch den Einsatz alternativer Anlagen ergeben. Derzeit wird beispielsweise der Einsatz von Anlagen mit dem Kältemittel R744 ( $\text{CO}_2$ ) bei der BVG und Saar-Pfalz-Bus erprobt. Weiterhin wird es einen Testbetrieb bei der VAG geben. Bezüglich der Auswirkungen der  $\text{CO}_2$ -Klimaanlagen auf den Kraftstoffverbrauch liegen derzeit keine eindeutigen Erkenntnisse vor. So wird sowohl von höheren Verbräuchen im Vergleich zu R134a-Anlagen berichtet [Eberwein 2011] als auch von Verbrauchsminderungen [Schirra 2011]. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sich der Betrieb mit weiterer Verbreitung der Technologie bei Marktreife effizienter gestalten lässt. Unstrittig ist aber, dass es im Fall von Kältemittelverlusten zu wesentlich geringeren Emissionen an  $\text{CO}_2$ -Äquivalenten kommt, da R744 eine Treibhauswirksamkeit (GWP) von 1 besitzt, das deutlich unter dem von konventionellen Anlagen verwendeten Kältemittel liegt. Das für den Betrieb eingesetzte Kältemittel ist üblicherweise Tetrafluorethan (R134a) mit einem GWP von 1.430. Während die EU für ab 2011 neu zugelassene Pkw und leichte Nutzfahrzeuge Kältemittel mit einem GWP von mehr als 150 verboten hat, ist der Einsatz von R134a in Busse und Bahnen weiter möglich.

Da die Klimaanlage keine hermetisch abgeschlossenen Systeme darstellen gelangen kontinuierlich Kältemittel in die Atmosphäre. Die durchschnittliche Leckagerate eines Linienbusses beträgt 13,7 % pro Jahr [BVG 2010a]. Die Leckagen pro Bus werden bei der BVG mit rund 7 kg Kältemittel pro Jahr, von Saarpfalzbus mit rund 4 kg pro Jahr beziffert [Eberwein 2011; Schirra 2011]. Die Kältemittelverluste verursachen demnach etwa 6 % der gesamten Treibhausgasemissionen aus dem Busbetrieb.

### Hybridantriebe

Die konventionellen Verbrennungsmotoren können mit einem Elektromotor kombiniert werden. Solche Fahrzeuge, die auf zwei verschiedenen Antriebssystemen beruhen, werden als Hybridfahrzeuge bezeichnet. Unterschieden wird grundsätzlich zwischen Parallelhybriden, bei denen beide Antriebssysteme das Fahrzeug antreiben können, und den seriellen Hybriden, bei denen der Verbrennungsmotor nur noch einen Generator antreibt und der Antrieb rein elektromotorisch ausgelegt ist. Zusätzlich sind Mischformen umsetzbar. Einen Überblick über die verschiedenen Konzepte gibt Abbildung 31.

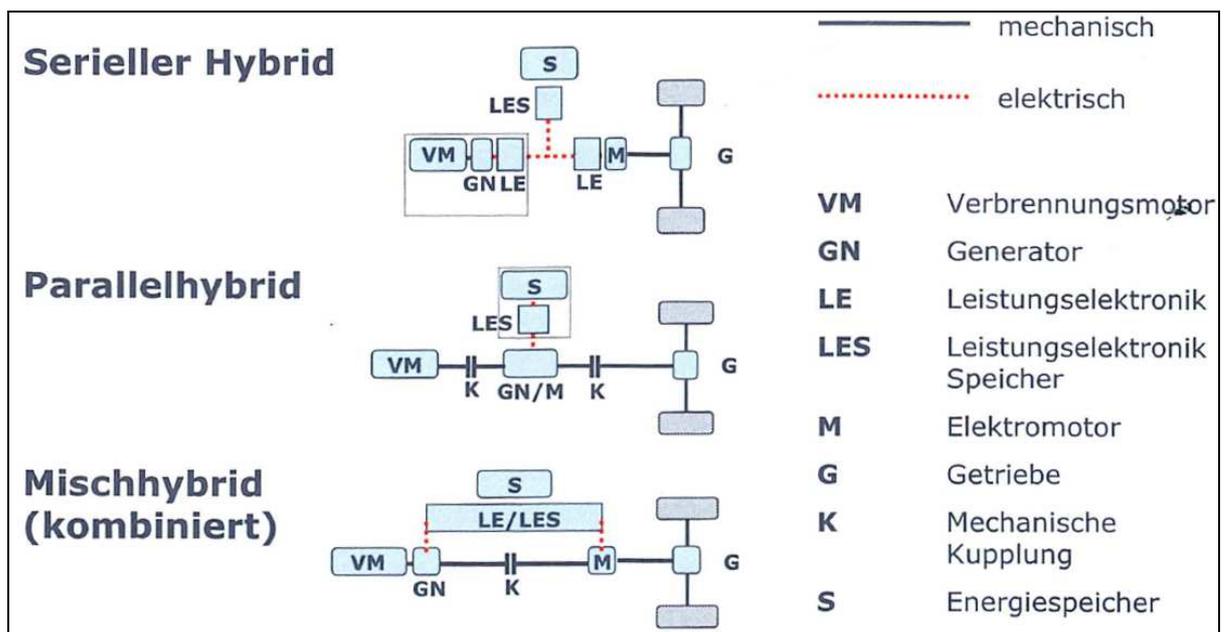


Abbildung 31 Konzeptüberblick der Hybridtechnik [Fraunhofer IVI in NachNa 2010]

Hybridbusse sind mit Energiespeichern ausgestattet, die die Rückgewinnung der Bremsenergie und das zeitweise Abschalten des Dieselmotors, sowie das rein elektrische Anfahren und Beschleunigen ermöglichen (serieller Hybrid). Omnibusse mit hybridisierten Antrieben werden insbesondere für den Linienverkehr inzwischen von zahlreichen Herstellern entwickelt, denn gerade Linienbusse eignen sich hierfür wegen ihres häufigen Bremsens und Anfahrens. Zudem kann zumindest beim seriellen Hybridantrieb auf ein herkömmliches Automatikgetriebe verzichtet werden, wodurch auch der Wirkungsgrad steigt. Ein Vorteil der parallelen Hybridbusse liegt darin begründet, dass der konventionelle Antriebsstrang erhalten bleibt und dadurch mit geringeren Gesamtkosten gerechnet werden kann [NachNa 2010]. Als

Schlussbericht

Energiespeichermedien befinden sich zurzeit neben Lithium-Ionen-Batterien auch Hochleistungskondensatoren im Praxistest.

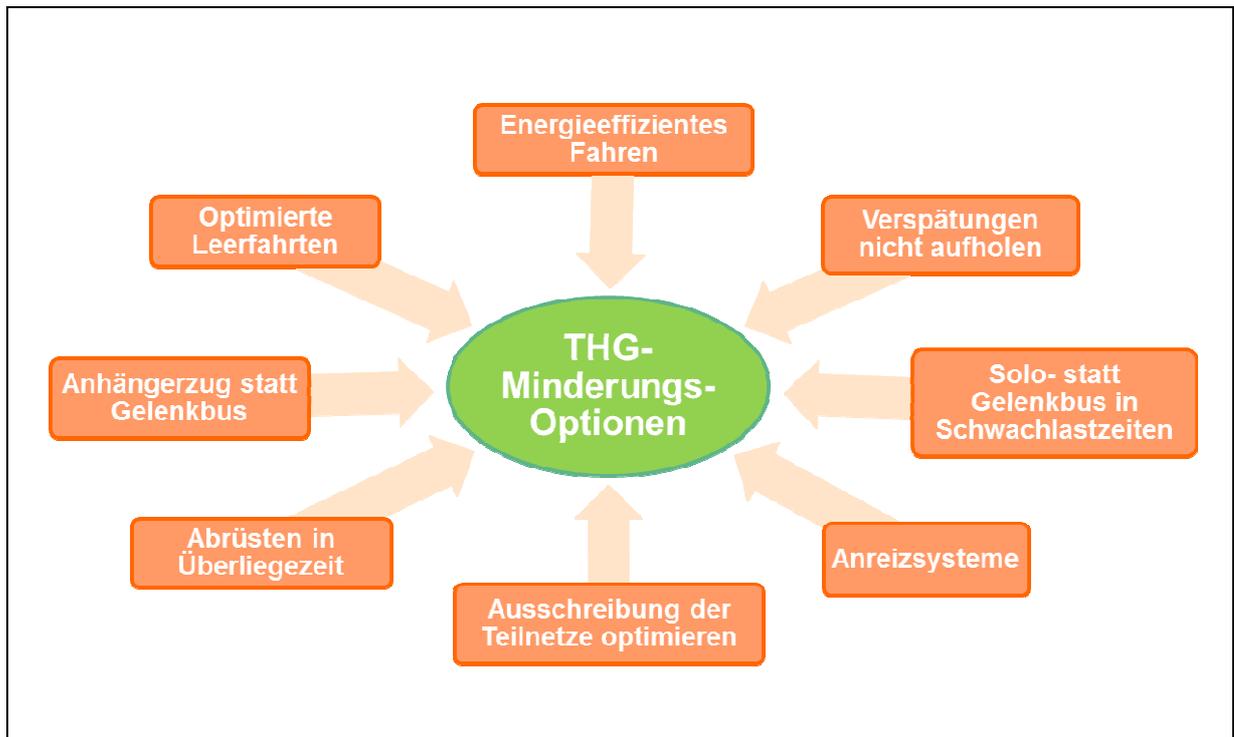
Für unterschiedliche Einsatzzwecke bezogen auf das Streckenprofil (Start-Stopp-Profil, Steigung) können unterschiedliche Konfigurationen hinsichtlich der Form der Hybridisierung (Seriell/ Parallel) und dem verwendeten Energiespeicher (Kondensatoren/ Batterien) besser geeignet sein. Vossloh Kiepe [2010] gibt beispielsweise an, dass das geeignete Einsatzgebiet für serielle Hybridbusse ein kurzes Start-Stopp-Fahrprofil mit ebenem Streckenverlauf aufweist. Bei längeren Strecken und bei Steigung sieht Vossloh Kiepe hingegen den Einsatz von parallelen Hybridbussen. Bei einem Einsatz als Stadtbus eignen sich als Energiespeicher aufgrund der hohen Leistungsdichte besonders die Ultracaps [MAN 2010].

Vom National Renewable Energy Laboratory (NREL) durchgeführte Tests mit Hybridbussen ergaben eine durchschnittliche Kraftstoffverbrauchsminderung von 37 % im Vergleich zum konventionellen Dieselantrieb [EESI 2008]. In [HYBRID 2008] wird auf Testergebnisse in den USA verwiesen, die zwischen 10 % und 35 % Kraftstoffersparnis ausweisen.

Den Herstellern zu Folge bewegen sich die Einsparungen bei über 20 % bis 35 % abhängig vom Fahrzyklus. Mehrere Verkehrsunternehmen, bei denen sich derzeit Hybridbusse im Praxiseinsatz befinden, beziffern hingegen die aktuell erreichte Einsparung mit maximal 20 %. Dem stehen derzeit hohe zusätzliche Anschaffungskosten von +30 % bis +100 % gegenüber [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011, Interviews].

#### 4.1.1.2 Betriebliche Maßnahmen

Neben den technischen können auch betriebliche Effizienzmaßnahmen zur Minderung der Kraftstoffverbräuche beitragen. Abbildung 32 zeigt mögliche Ansatzpunkte dafür. Verglichen mit den technischen Maßnahmen lassen sich mögliche Einsparpotentiale schwerer allgemein beziffern. So hängen die Einsparpotentiale stark vom Status Quo des einzelnen Verkehrsunternehmens ab. Neben der Lage der Betriebshöfe besitzt beispielsweise auch die Dichte des Verkehrs einen entscheidenden Einfluss auf den Mehrverbrauch durch Staus oder Leerfahrten. Auch sind Maßnahmen denkbar, die zwar zu Kraftstoffverbrauchsminderungen führen würden, sich aber im Konflikt mit anderen betrieblichen Zielen befinden. Anweisungen an die Fahrer, Verspätungen nicht aufzuholen, würden beispielsweise zu verringerten Kraftstoffverbräuchen führen. Dagegen sprechen aber die Kundenanforderungen an einen möglichst pünktlichen ÖPNV. Zudem kann es bei übermäßigen Verspätungen zu finanziellen Sanktionen kommen [Interviews].



**Abbildung 32 Betriebliche Optionen zur Minderung der Treibhausgasemissionen und Erhöhung der Energieeffizienz im ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor**

Im Berufskraftfahrer-Qualifikations-Gesetz (BKrQG) sind weiterbildende Schulungen verpflichtend eingeführt worden. Ziel ist unter anderem, den Kraftstoffverbrauch und die Umweltbelastung zu minimieren. Allerdings wurden in den Interviews von unterschiedlichen Erfahrungen berichtet. Einzelne Verkehrsunternehmen berichteten von Einsparpotentialen bis 5 %, andere äußerten Zweifel, dass mit Fahrerschulungen langfristig Einsparungen erzielt werden. Auch bei der Umsetzung von Anreizsystemen hinsichtlich einer besonders sparsamen Fahrweise ergaben sich in der Vergangenheit den Verkehrsunternehmen zufolge Schwierigkeiten. So müsste dafür für alle Fahrer sichergestellt werden, dass erstens eine Auswertung des Fahrverhaltens fair und unabhängig vom Einsatzprofil erfolgt. Auch könnte solch ein Vorgehen einen Eingriff auf die freie Berufsausführung der Fahrer darstellen [Workshop, Interviews]. Aus diesem Grund sehen die Verkehrsunternehmen und Bushersteller langfristig die Lösung in technischen Maßnahmen, die den Einfluss der spezifischen Fahrweise auf den Kraftstoffverbrauch minimieren.

In den Zwischenbereich von technischen und betrieblichen Maßnahmen fällt der Einsatz von Anhängierzügen anstatt Gelenkbussen. Dieser ermöglicht es, die Morgenspitze mit einer größeren Kapazität zu bedienen und bei geringerer Auslastung den Anhänger abzukoppeln. Allerdings verursacht der Solobus dann einen höheren Verbrauch als ein konventioneller Bus mit geringerer Motorenleistung. Auch diese Maßnahme muss also immer im konkreten Fall bewertet werden. Im Rahmen des Workshops wurde von den Experten der Verkehrsunternehmen und Bushersteller betont, dass auch Aspekte der Stadtplanung eine Auswirkung auf den Energieverbrauch haben. So kann beispielsweise die Beschleunigung des

ÖPNV zu reduzierten Treibhausgasemissionen führen. Aus den genannten Gründen hinsichtlich der notwendigen Einzelfallbetrachtung und der Zielsetzung, den Verbrauch durch technische Optionen vom Fahrverhalten stärker zu entkoppeln, werden die betrieblichen Maßnahmen im Folgenden nicht weiter betrachtet.

#### 4.1.2 Elektrisch betriebener ÖPNV

Um die Veränderungen im Energiebedarf des elektrisch betriebenen ÖPNV prognostizieren zu können, muss man berücksichtigen, dass Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bei unterschiedlichen Bereichen des Systems ansetzen können. Es ist möglich die Infrastruktur, die Fahrzeuge und den Betrieb hinsichtlich des Energiebedarfs zu optimieren.

Komponenten der **Infrastruktur** wie z. B. Unterwerke werden auf Grund der hohen Investitionskosten nur getauscht, wenn sie defekt und Ersatzteile nicht mehr verfügbar sind oder die Unterhaltungskosten am Ende des Produktlebenszyklus stark ansteigen. Maßnahmen, wie z. B. der Tausch von Leuchtmitteln, die keine hohen Investitionen erfordern, werden z. T. auch ohne direkte Notwendigkeit durchgeführt, wenn sie sich innerhalb von weniger als 3 Jahren amortisieren. Daraus folgt, dass die Effizienzsteigerungen in der Infrastruktur bezogen auf einzelne Verkehrsunternehmen in Zyklen von ca. 30 Jahren stattfinden. Bezogen auf alle Verkehrsunternehmen der Bundesrepublik wird dieser treppenartige Verlauf dadurch geglättet, dass nicht alle Verkehrsbetriebe gleichzeitig Komponenten der Infrastruktur tauschen. In Verbindung mit kostengünstigen Maßnahmen, kann man für den Verlauf der Effizienzsteigerung der Infrastrukturkomponenten bis zum Jahr 2020 bzw. 2030 einen annähernd linearen Verlauf annehmen. Gleiches gilt für Maßnahmen, die den Betrieb der Fahrzeuge effizienter gestalten. Wichtig ist dabei noch zu berücksichtigen, dass die Effizienz von U-Bahnen bzw. Straßen- oder Stadtbahnen mit unterirdischen Haltestellen in den kommenden Jahren sich stark verbessern wird. Das liegt an dem Alter der Bausubstanz der Stationen. Viele wurden zwischen 1970 und 1980 gebaut und erreichen demnächst den geplanten Zeitpunkt zur Renovierung. Im Rahmen der Renovierung wird auch effizientere Gebäudetechnik in diesen Stationen eingesetzt werden.

Auf Seiten der **Fahrzeuge** kann für die Prognose zur Minderung des Fahrstromverbrauchs, die auf Steigerung der Energieeffizienz zurückzuführen, ein linearer Verlauf nicht angenommen werden. Das liegt an folgenden Gründen: Bisher war die Fahrzeugbeschaffung innerhalb der Bundesrepublik durch die Förderpolitik der Bundesländer stark zyklisch strukturiert. Aus einer aktuell durchgeführten Erhebung zum Fahrzeugbestand der Stadt- und Straßenbahnen geht das auch deutlich hervor (siehe Kapitel 5.1). Es ist zu erkennen, dass nur in wenigen Fällen Fahrzeuge eingesetzt werden, die älter als 40 Jahre sind. Das Durchschnittsalter der Fahrzeuge liegt bei ca. 20 Jahren. Vergleicht man die Bestandsdaten der Jahre 2006 und 2010 miteinander, stellt man fest, dass viele Fahrzeuge aus den Baujahren zwischen 1973 und 1988 bereits ausgemustert wurden.

**Betriebliche Maßnahmen** sind in der Regel kurzfristig umsetzbar, sofern es sich allein um einfache Verhaltensänderungen handelt, komplexere Änderungen erfordern Schulungen, die sich bei größeren Verkehrsbetrieben durchaus über ein Jahr oder länger erstrecken können bis alle Beteiligten erreicht sind, und wirken sich mit entsprechender Verzögerung aus. Anlassbezogene Maßnahmen, wie die Umstellung auf eine LCC-bezogene Beschaffung, wirken sich erst bei Vorliegen des Anlasses aus.

Im folgenden Abschnitt sind die Techniken und Maßnahmen beschrieben, die zur Effizienzsteigerung im elektrisch betriebenen ÖPNV bis zum Jahr 2020 bzw. 2030 zum Einsatz kommen werden.

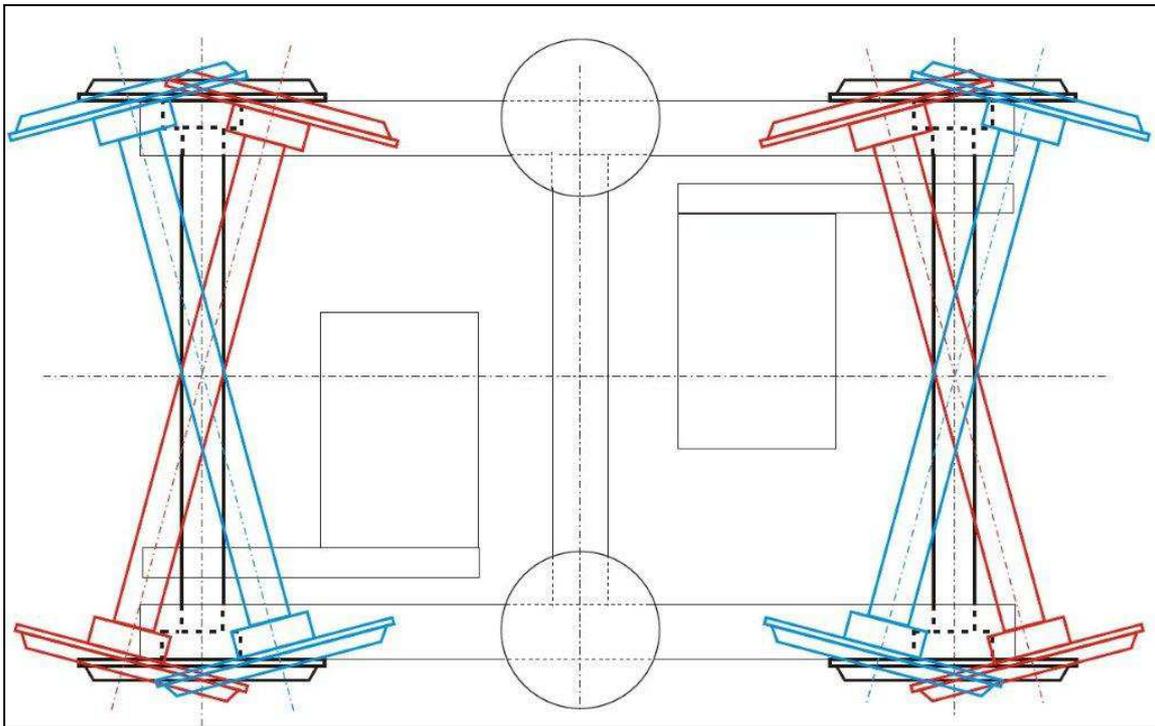
#### 4.1.2.1 Fahrzeugseitige Maßnahmen

##### **Fahrwiderstand**

Der Antriebsenergiebedarf eines Schienenfahrzeugs besteht aus der Antriebsarbeit, die zum Überwinden der Fahrwiderstände und der Arbeit, die zum Betreiben der notwendigen Nebenaggregate wie Kompressoren, Steuerungstechnik und Beleuchtung notwendig ist. Maßgeblichen Einfluss auf die Fahrwiderstände haben die Fahrwerke eines Schienenfahrzeugs über den Laufwiderstand, die Masse und die aerodynamische Effizienz des Fahrzeugs. Der Luftwiderstand dominiert die Widerstandskräfte mit zunehmender Geschwindigkeit. Für die betrachteten Fahrzeuge mit einer Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h und deutlich geringeren Durchschnittsgeschwindigkeit im Betrieb stellen der Laufwiderstand und die Fahrzeugmasse relevante Einflussgrößen dar. Neben der Energieeffizienz beeinflusst ein geringer Laufwiderstand den Verschleiß an Rad und Schiene positiv.

Vergleicht man die aktuellen Straßenbahnnetze von deutschen Großstädten miteinander, kann man folgende Gemeinsamkeiten feststellen: Eine durchschnittliche Linie ist ca. 10<sup>o</sup>km lang und verfügt über meist zwei Wendeschleifen. Die Straßenbahnlinien, die durch die Innenstädte führen, weisen zwischen 10 und 15 enge 90°-Bögen auf. Neben dem Energiebedarf durch Anfahrvorgänge an Lichtzeitanlagen resultiert aus dem Befahren dieser engen Bögen der größte Anteil am fahrwiderstandbedingten Energiebedarf.

Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf eines Verkehrsunternehmens sind so jährliche Einsparungen von 2°% möglich, wenn man bei Neufahrzeugen auf den Einsatz von radialeinstellenden Fahrwerken achtet. Die folgende Abbildung zeigt die Funktionsweise eines solchen Fahrwerks schematisch. Die Position der Radsätze zueinander ist durch die farbliche Hervorhebung kenntlich gemacht. Schwarz dargestellt ist die Position der Radsätze in Geradeausfahrt. Rot bzw. blau sind die Radsatzpositionen bei Bogenfahrt. Diese Funktionalität kann aktiv also durch Ansteuerung von Aktivatoren oder passiv z. B. durch mechanische Kopplung der Radsätze mittels Kreuzanker erreicht werden.



**Abbildung 33 Mögliche Radsatzstellungen bei radial einstellbaren Fahrwerken**

Dazu kommen Einsparungen durch verringerten Verschleiß an den Schienen und eine Senkung der Lärmbelastung durch die Vermeidung von Kurvengeräuschen. Der Anhang 2 Technische Erläuterungen enthält weitere Informationen zu diesem Thema.

### **Leichtbau**

Potentiale zur Gewichtsreduzierung von Schienenfahrzeugen liegen in Metall-Mischbauweisen, die auf Grund von modernen Fügeverfahren möglich werden und in der Verwendung von hoch- und höchstfesten Stählen für besonders belastete Bauteile [InnoZ 2010].

Aus den durchgeführten Interviews gehen folgende Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz hervor: Bei Straßenbahnen kann der Traktionsenergiebedarf um ca. 2,5 % pro Tonne und bei Metrofahrzeuge 0,2 % pro Tonne eingespartes Fahrzeugmasse reduziert werden.

### **Antriebsaggregate**

Die Energieeffizienz des Antriebstrangs von Gleichstromschienenfahrzeugen wird durch den Wirkungsgrad beim Umwandeln der elektrischen Energie in mechanische Arbeit und von dem Wirkungsgrad der Leistungselektronik bestimmt.

Sekundäreffekte resultieren aus dem Kühlbedarf einzelner Bauteile des Antriebstrangs. Je höher der Wirkungsgrad der eingesetzten Komponenten ist, desto weniger Wärme aus Verlustleistung muss abgeführt werden. Dementsprechend weniger Leistung entfällt dann auf Kühlmittelpumpen oder Ventilatoren.

Die größten Effizienzpotentiale ließen sich durch den Einsatz von aktueller Leistungselektronik, Permanentmagnetmotoren und den Verzicht auf Getriebe im Antriebsstrang durch Radnabenmotoren realisieren. Im Idealfall sind so Fahrstromersparungen ab Unterwerk von bis zu 2-3 % erreichbar. Dem Anhang 2 Technische Erläuterungen können weitere Informationen zu diesem Thema entnommen werden.

### Energiespeicher

Für die Speicherung von Energie an Bord des Fahrzeuges werden unterschiedliche Anforderungen gerichtet. Zum einen sollen Energiespeicher das abschnittsweise Fahren ohne Oberleitung ermöglichen, zum anderen soll durch Rekuperation Energie aus dem Bremsvorgang gespeichert werden. Die Auslegung der Speicherkapazitäten ist in beiden Fällen sehr unterschiedlich. Daraus folgen auch andere Anforderungen an Ladeströme bzw. die Selbstentladung von Speichern. Dazu kommt die Forderung nach einer möglichst hohen Energiedichte bei möglichst geringer Masse des Speichers. Im Falle von zu großen Speichermassen kann in Verbindung mit sekundären Gewichtserhöhungen durch Anpassen von Fahrzeugstrukturen der Fahrwiderstand soweit ansteigen, dass ein Effizienzgewinn wieder neutralisiert oder stark gemindert wird.

Energiespeicher, die hauptsächlich dafür genutzt werden, Energie bereit zu stellen während das Fahrzeug beim Verlassen der Haltestelle beschleunigt, haben auch positive Effekte auf das Leistungsversorgungsnetz der Fahrzeuge. Die ohmschen Verluste in der Versorgungsleitung beim Beschleunigen können auf Grund des geringeren externen Stromverbrauchs verringert werden.

Der Effizienzgewinn aus Energiespeicherung und Netzentlastung beträgt bis zu 28 % des Fahrstromverbrauchs ab Unterwerk unter der Voraussetzung, dass alle Fahrzeuge entsprechend ausgerüstet sind. Weitere Informationen zu den Speichertechniken können dem Anhang 2 entnommen werden.

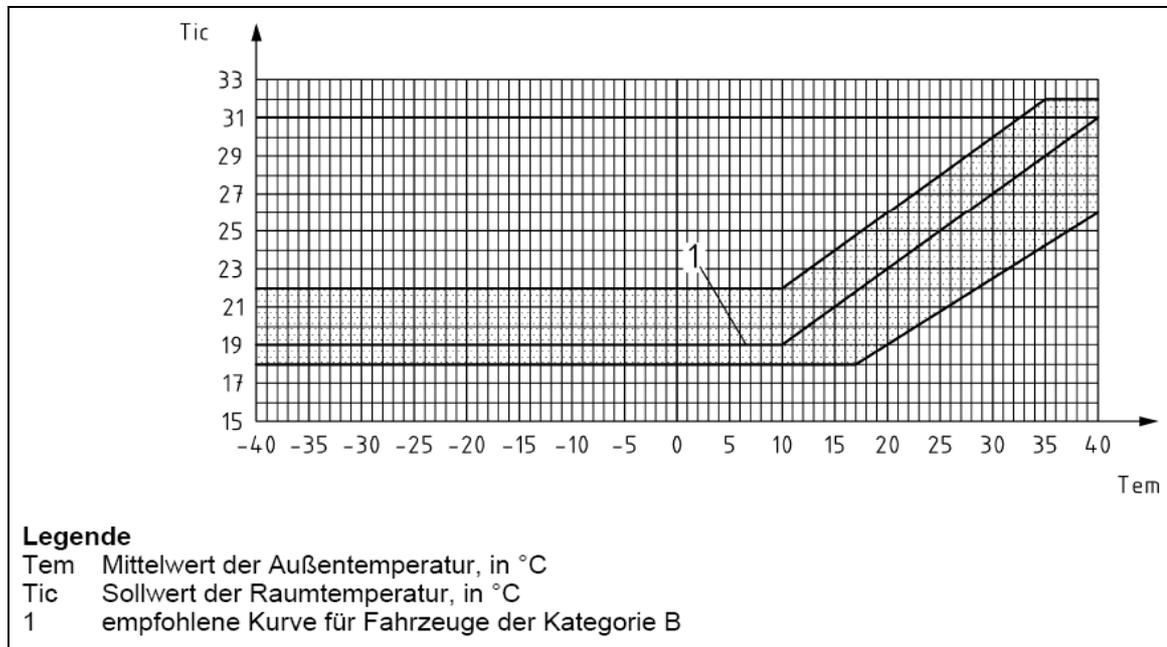
### Komfortfunktionen

Im Fahrzeugbetrieb zählen die Innenraumbelichtung, die Belüftung, das Kühlen und das Heizen zu den Komfortfunktionen. Auf Fahrzeuge die gemäß BOSTrab zugelassen sind, können am ehesten die Werte und Anforderungen der EN 14750-1:2006 und EN 14750-2:2006 übertragen werden. Nach den Spezifikationen dieser Norm gehören Metros und Straßenbahnen zu Fahrzeugen der Kategorie B (siehe Tabelle 7).

	Kategorie A	Kategorie B
Stehende Fahrgäste	< 4 Fahrgäste/m <sup>2</sup>	≥ 4 Fahrgäste/m <sup>2</sup>
Durchschnittliche Verweildauer der Fahrgäste	> 20 min	≤ 20 min
Durchschnittliche Fahrzeit zwischen zwei Halten	> 3 min	≤ 3 min

**Tabelle 7 Fahrzeugklassifizierung nach EN 14750-1:2006 [EN 14750-1 2006]**

Damit ergeben sich für den Fahrgastraum die in Abbildung 34 dargestellten Solltemperaturkurven über der Außentemperatur.



**Abbildung 34 Zulässiger Bereich für die Festlegung der Regelkurve für Fahrzeuge der Kategorie B [EN 14750-1 2006]**

Bezogen auf die Energieeffizienz ist es sinnvoll, die Fahrzeuginnentemperatur innerhalb des vorgegebenen Korridors so nah wie möglich an der Außentemperatur zu orientieren. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Klimatisierung nicht nur zu Komfortzwecken, sondern auch aus Gründen des Korrosionsschutzes eingesetzt wird. Folglich sollte bei Fahrzeugherstellern eine Klimaanlage geordert werden, die nicht nur die Lufttemperatur im und außerhalb des Fahrzeugzeugs als Steuergrößen verwendet, sondern auch die Luftfeuchtigkeit und den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft im Innenraum überwacht. Damit kann eine bedarfsgerechte Steuerung der Komfortfunktionen realisiert werden.

Der notwendige Mehrverbrauch zum Betrieb von Klimaanlage lässt sich mit dem Einsatz von Wärmerückgewinnung und der Nutzung von Wärmepumpen minimieren. Vergleicht man den Energiebedarf von aktuellen Fahrzeugen mit separater Wärme und Kälteerzeugung ohne Isolierverglasung und Wärmerückgewinnung sind Minderungen des Stromverbrauchs dieser Komponenten von 30 % realisierbar. Bezogen auf den Fahrstromverbrauch am Unterwerk entspricht das ca. 5 %.

#### Optimierung der Klimaanlage (Kältemittel)

Als Kältemittel in Klimaanlage kommen Kohlenwasserstoffe in halogenisierter oder nicht halogenisierter Form, Ammoniak, Kohlenstoffdioxid und Luft in Frage. Kältemittel für den Einsatz im Schienenverkehr sollten nicht brennbar, ungiftig und ein geringes Treibhauspotential/ Global Warming Potential (GWP) haben. Das GWP ist ein berechneter Wert und entspricht

## Schlussbericht

der Klimawirksamkeit des Mengenäquivalents von Kohlenstoffdioxid bezogen auf 100 Jahre. Ein möglichst energieeffizientes Kältemittel sollte noch folgende Eigenschaften aufweisen:

- große spezifische Verdampfungsenthalpie
- hohe volumetrische Kälteleistung
- großer Wärmeübergangskoeffizient
- hohe Wärmeleitfähigkeit.

Sowohl Behr als auch Faiveley Transport, Liebherr und die Kovekta AG bieten im Moment Klimaanlage für Schienenfahrzeuge mit R744, also Kohlenstoffdioxid, als Kältemittel an oder haben Prototypentests erfolgreich absolviert. Gegenüber dem herkömmlichen Kältemittel R134a bietet R744 den Vorteil, dass es in Wärmepumpen auch zum Heizen des Fahrzeuginnenraums genutzt werden kann.

Geht man von 48 % als genanntes Einsparpotential von Klimaanlage mit CO<sub>2</sub> als Kältemittel im Vergleich zu R134a gefüllten Anlagen aus, entspricht das einem Energieeinsparpotential von 13 % bezogen auf den Stromverbrauch am Unterwerk. Vorausgesetzt, alle Fahrzeuge wären im Betrieb mit einer solchen Klimaanlage ausgerüstet.

Alternativ zu Klimaanlage mit CO<sub>2</sub> als Kältemittel setzt die Deutsche Bahn in der 2. Baureihe des ICE3 Luftklimaanlagen ein. Vergleiche zwischen den Luftklimaanlagen des ICE3 mit den herkömmlichen Klimaanlage des ICE-TD zeigen, dass der bessere Wirkungsgrad der Luftklimaanlagen im Teillastbereich zu einem geringeren Energiebedarf führt. Die DB Systemtechnik weist aber auch darauf hin, dass aus diesem Vergleich keine Pauschalaussagen zu Klimatisierungssystemen oder Kältemittel abgeleitet werden können [Tim Berlitz, 2011].

### 4.1.2.2 Infrastruktureitige Maßnahmen

#### **Rückspeisefähige Unterwerke**

Momentan werden in Gleichstromunterwerken Diodengleichrichter eingesetzt [Steimel 2006]. Diese sind nicht rückspeisefähig und funktionieren ungesteuert. Durch den Einsatz von gängigen Siliziumdioden können günstige Lösungen angeboten werden.

Rückspeisefähige Unterwerke benötigen einen gesteuerten Gleichrichter mit aufwendigerer Ausrüstung.

In der Tabelle 8 sind das Energieeinsparpotential eines rückspeisefähigen Unterwerks eine Preisspanne der Anschaffungskosten sowie die Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten dargestellt.

	POTENTIALE
Energieeinsparpotential	bis zu 25%
<b>Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit (LCC-Betrachtung):</b>	Die Anschaffungskosten hängen stark davon ab, ob ein bestehendes Unterwerk aufgerüstet oder ein neues angeschafft wird.
Anschaffungskosten (IC)	250.000 – 750.000€ [Railenergy 2010]
Betriebskosten (OC)	Auf Grund geringerer Energiekosten günstiger
Unterhaltskosten (MC)	Vergleichbar mit den Kosten eines Diodengleichrichter-Unterwerks
Entsorgungskosten (DC)	Vergleichbar mit den Kosten eines Diodengleichrichter-Unterwerks

**Tabelle 8 Energieeinsparpotential und Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines rückspeisefähigen Unterwerks (Ricci 2011)**

### Leistungsverteilung

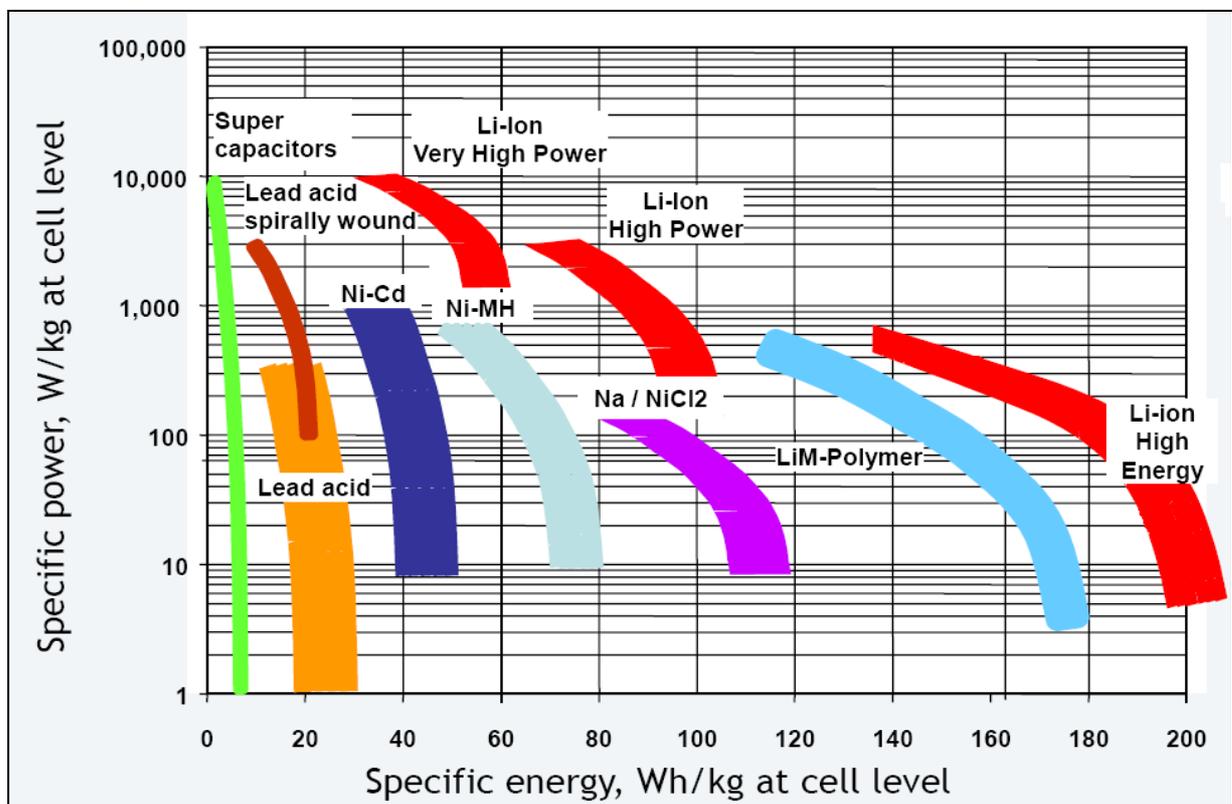
Beim Betrieb von Fahrzeugen nach BOStrab kommen sowohl Oberleitungen als auch Stromschienen zur Leistungsverteilung vom jeweiligen Unterwerk zum Fahrzeug in Frage. In Sonderfällen wird die Leistung mittels Schleifkontakt zu einer dritten Schiene im Boden realisiert. In diesem Fall darf nur der Abschnitt unterhalb des Fahrzeug mit Spannung beaufschlagt werden. Außerdem gibt es noch die Möglichkeit, dem Fahrzeug mittels Induktion Leistung bereit zu stellen. Die letzten beiden Möglichkeiten kommen dann zum Einsatz, wenn Oberleitungen aus optischen Gründen vermieden werden sollen oder seitliche Stromschienen ebenfalls nicht erwünscht sind. Im Falle der Leistungsbereitstellung mittels Induktion kann bei der Leistungsübertragung durch den Luftspalt von einem Wirkungsgrad von ca. 90-95 % ausgegangen werden. Die ohmschen Verluste der Zuleitungen müssen außerdem berücksichtigt werden. Auch für die induktive Stromversorgung müssen zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden, da die entstehenden Felder im Nahbereich mit elektrischen Geräten wie Herzschrittmachern interferieren können.

Grundsätzlich sollte ein System bevorzugt werden, dass die geringsten Verluste bei der Leistungsverteilung aufweist. Da die ohmschen Verluste eines Stromleiters proportional zum fließenden Strom sind, sollte die Netzspannung so hoch wie möglich gewählt werden. Einschränkend wirkt dabei der höhere Aufwand bezüglich der Isolation, wenn dauerhaft Spannungen von mehr als 1000 V anliegen sollen. Damit steigen die Kosten für die Leistungselektronik stark an. Die zweite Möglichkeit die Leitungsverluste zu reduzieren, besteht in der Wahl größerer Querschnitte bei zu- und abführenden Leitungen. Außerdem kann durch die Wahl des Leitermaterials Einfluss auf die Impedanz genommen werden. Bei Stromschienen empfiehlt sich daher die Verbundschiene mit einer Kontaktfläche aus Stahl und

dem eigentlichen Leiter aus Aluminium. Der Leitwert der Verbundschiene liegt im Vergleich zur herkömmlichen Stromschiene aus Stahl ca. 1/3 niedriger.

## Energiespeicher

Je nach Netzkapazität, Auslastung und zur Verfügung stehenden Bauraum kommen mehrere Speichertypen in Frage. In Netzabschnitten, in den zum gleichen Zeitpunkt viele Fahrzeuge bremsen, z. B. an Knotenpunkten, an denen das Umsteigen zwischen verschiedenen Linien ermöglicht werden soll, wird ein Speicher benötigt, der in kurzer Zeit große Ströme aufnehmen und abgeben kann. In Verbindung mit einer hohen Zyklenfestigkeit empfiehlt sich nach Abbildung 35 ein Speichersystem, das auf Doppelschichtkondensatoren beruht. Im Falle eines Speicherstandortes im Randgebiet eines Netzes mit wenig Fahrzeugbewegungen über der Zeit in Verbindung mit begrenztem Bauraum käme eher ein Akkumulator auf Li-Ionen-Basis zum Einsatz.



**Abbildung 35 Ragone-Diagramm für aktuelle elektrochemische Energiespeicher [Guibert 2009]**

Der Einsatz von Energiespeichern an Stelle von rückspesefähigen Unterwerken wird meist auf Grund wirtschaftlicher bzw. politischer Aspekte getroffen. Auf Seiten der Energieversorger ist das Interesse, Strom aus Rückspeisung zu kaufen, eher gering. Das zeigt sich an dem im Verhältnis zum Verkaufspreis geringen Rückkaufpreis. Dieser Konflikt wurde im Bereich der erneuerbaren Energien durch die Festschreibung des Einspeisepreises durch die Bundesregierung behoben. Für ein Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) wird bisher kein Rückspeisepreis garantiert.

Am Beispiel der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) mit den Daten aus dem Jahr 2007 ergibt sich folgende Betrachtung:

Der Energieverbrauch für 19,4 Mio. Nutzkilometer im Straßenbahnnetz beträgt ca. 67,9 GWh. Bei einem Einkaufspreis von ca. 0,085 € pro kWh entspricht das 5,77 Mio. Euro. Geht man von einer durchschnittlichen Energieeinsparung von ca. 20 % im Falle von stationären Energiespeichern aus, betrügen die Kosten für einen Energieverbrauch von 54,3 GWh 4,62 Mio. Euro, was einer Ersparnis von 793.475 Euro entspricht. Vergleicht man die Kosten und Einsparungen, die aus rückspeisefähigen Unterwerken mit einem Energiesparpotential von 25 % resultieren würden, kommt man zu folgendem Schluss: Um die gleiche Ersparnis wie mit Energiespeichern zu erzielen, müsste die durchschnittliche Rückspeisevergütung bei ca. 55 % des Einkaufspreises liegen.

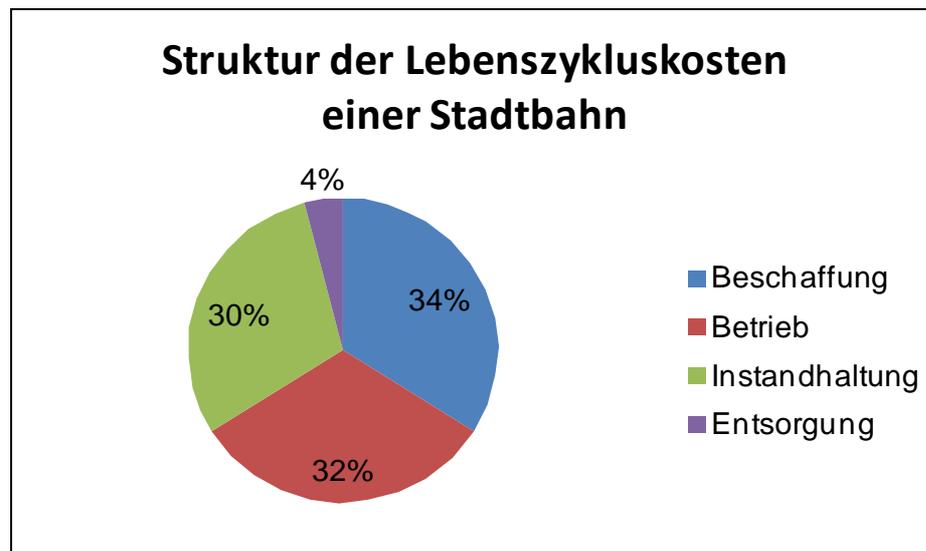
#### 4.1.2.3 Betriebliche Maßnahmen

Die betrieblichen Maßnahmen erstrecken sich in dieser Betrachtung über die Einflussnahme auf die Fahrweise des Fahrers, die Abstellung und die Beschaffung der Fahrzeuge.

#### **LCC basierte Fahrzeugbeschaffung**

Fahrzeugbeschaffungen der letzten Zeit sind häufig dadurch geprägt, dass die Anschaffungskosten pro Fahrzeug möglichst gering ausfallen. Zum Teil versuchen Verkehrsunternehmen durch kombinierte Bestellungen, größere Stückzahlen zu erzielen und damit ihre Verhandlungsposition gegenüber dem Fahrzeughersteller zu verbessern. Der Trend, die Anschaffungskosten zu minimieren, wird dabei immer mehr zum Innovationshemmnis. Das beeinträchtigt zum Teil den Einsatz neuer und damit meist etwas teurerer Technik und führt im Extremfall zu deutlich höheren Betriebskosten durch hohen Energieverbrauch und höhere Unterhaltskosten durch ungünstiges Verschleißverhalten. Auch die starke Diversifizierung der Fahrzeuge für die verschiedenen Fahrzeugbetreiber wird zum Kostentreiber, da die Anzahl an Gleichteilen von Fahrzeugen innerhalb einer Baureihe sinkt.

Die Kosten, die im Laufe der Lebensdauer eines Schienenfahrzeugs im ÖPNV entstehen, werden aber nicht durch die Anschaffungskosten dominiert, wie Abbildung 36 zeigt. In diesem Fall setzen sich die betrieblichen Kosten aus den Kosten für Energie, Reinigung und Personal zusammen, während auf die Instandhaltungskosten u. a. die Betriebsstoffe, Ersatzteile und Kosten durch Unverfügbarkeit entfallen. Die prozentualen Anteile verändern sich über die Betriebsdauer, die man betrachtet. Mit steigender Einsatzdauer gewinnen die Anteile von Betrieb und Instandhaltung immer mehr an Bedeutung. Das hängt mit der Abschreibedauer der Anschaffungskosten zusammen. In vielen Fällen sollten die Fahrzeuge aus steuerlichen Gründen nach sieben Jahren abgeschrieben sein. Die nach acht Jahren anfallenden Kosten für die erste große Überholung fallen in den Bereich der Instandhaltungskosten.



**Abbildung 36 Lebenszykluskosten einer Stadtbahn über einen Zeitraum von 10 Jahren [Geyer 2005]**

Die Betriebskosten bestehen zu großen Teilen aus den Kosten für Personal und Energie. Demnach ist es wichtig, diese Kosten bei der Beschaffung von Fahrzeugen entsprechend zu berücksichtigen bzw. zu bewerten. Im Schienenpersonenverkehr gibt es auf Seiten der Verkehrsunternehmen den Trend, nicht Fahrzeuge, sondern auch die Instandhaltung in Kombination, auszuschreiben, das führt im Moment dazu, dass die Fahrzeughersteller mehr Informationen über ihre Fahrzeuge im Betrieb erhalten und so das Qualitätsmanagement verändern.

### **Energiesparende Fahrweise**

Sofern der Betrieb innerhalb eines Straßenbahnnetzes nicht dadurch geprägt ist, dass die Gleise straßenbündig verlaufen und die Straßenbahn im Individualverkehr „mitschwimmen“ muss, kann die Fahrweise positiven Einfluss auf den Energiebedarf haben. Neben dem Fahrer sollte auch durch Vorrangschaltungen, abgestimmte Fahrpläne mit Fahrzeitreserve und möglichst homogene Streckenhöchstgeschwindigkeiten der Fahrstrombedarf minimiert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Fahrzeitreserve die Reisezeit nicht zu stark vergrößert, da dann die Attraktivität des Verkehrsmittels Straßenbahn sinkt.

### **Fahrschulung**

Die Fahrschulung ist das einfachste und kostengünstigste Mittel, den Fahrbetrieb energieeffizient zu gestalten. Diese Maßnahme sollte aber nicht einmalig bleiben, sondern in Zeitfenstern von ca. zwei Jahren wiederholt werden. Grundsätzlich bleibt aber die Motivation des Fahrers, das Gelernte auch anzuwenden und auch dauerhaft umzusetzen, die größte Herausforderung. Bisher hat es sich als kompliziert herausgestellt, monetäre Boni als Anreiz einzusetzen. Die Probleme reichen dabei von Datenschutzproblemen bei der personengenauen Aufzeichnung des Fahrstrombedarfs über nicht durch den Fahrer beeinflussbare Parameter wie Verkehrsaufkommen bis zu Schwierigkeiten bei der innerbetrieblichen Gerechtigkeit bei der Gewährung von Boni. Zum Teil führte aber eine

Anzeige des Fahrstromverbrauchs an den Fahrzeugführer ohne Aufzeichnung zu Wettbewerben zwischen den Fahrern. Insgesamt kann durch die Schulung und Motivation der Fahrer zwischen 2 % bis 5 % des Energiebedarfs für die Traktion eingespart werden. Bezogen auf den Fahrstromverbrauch am Unterwerk beträgt das Einsparpotential dann 1 % bis 3 %.

### **Fahrzeugeite Assistenzsysteme zur Unterstützung energiesparender Fahrweise**

Diese Fahrerassistenzsysteme errechnen aus der aktuellen Fahrzeugposition, dem Fahrplan und Streckeninformationen wie Längsneigung und Geschwindigkeitsbegrenzungen das nach energetischen Gesichtspunkten optimale Fahrprofil und teilen dem Fahrer mit, ob er beschleunigen, die Geschwindigkeit beibehalten, rollen oder verzögern sollte. Je nach Hersteller des Assistenzsystems werden auch zusätzliche Parameter berücksichtigt, um im Falle von leichten Verspätungen, die im Streckenverlauf meistens ohne weiteres aufgeholt werden können, nicht von einer energiesparenden Fahrweise abweichen zu müssen. Wichtig dabei ist, dass Fahrverhalten des Fahrzeugs insbesondere das Roll- und Bremsverhalten gut abgebildet wird. Ist das nicht der Fall, geht ein großes Optimierungspotential verloren. Diese Systeme gibt es als Nachrüstlösung auf separaten Handheldgeräten als auch integrierbar in die Fahrzeugelektronik. Die Kosten für eine Nachrüstung können daher stark schwanken. Bisher liegen sie zwischen 5.000 Euro bis 50.000 Euro pro Führerstand. Die Energieeinsparpotentiale bezogen auf den Stromverbrauch an den Unterwerken liegen bei ca. 3-6 %. Neben dem geringen Energiebedarf liegt ein Vorteil dieser Systeme in der Stabilisierung des Fahrplans bzw. in der Erhöhung der Pünktlichkeit. Das gilt allerdings hauptsächlich für Straßen- bzw. Stadtbahnen, die über ein vom Straßenverkehr isoliertes Netz nutzen.

### **Energiesparende Fahrweise Netzoptimiert (analog ETCS L3)**

Neben den Assistenzsystemen, die den Stromverbrauch eines einzelnen Fahrzeugs optimieren, gibt es auch die Möglichkeit den Stromverbrauch für die Traktion netzweit zu optimieren. So kann beispielsweise das Fahrverhalten aller Fahrzeuge in einem Netzabschnitt aufeinander abgestimmt werden, um unnötiges Abbremsen und erneutes Anfahren zu vermeiden. Genauso kann dann auch der Abfahrzeitpunkt bzw. die Bremskurve optimal an die Rückspeisung anderer Fahrzeuge bzw. den Abfahrzeitpunkt angepasst werden. Technologisch ist diese Optimierung mit dem ETCS Level 3 vergleichbar. Zu berücksichtigen ist, dass Straßenbahnen zum Teil auf Sicht gefahren werden. In diesem Fall besteht diese Einflussmöglichkeit nicht. Da bisher keine Erfahrungen im realen Betrieb mit einem solchen System gesammelt werden konnten, ist die Abschätzung der Einsparpotentiale hinsichtlich des Energiebedarfs eher schwierig. Grundsätzlich sind die Potentiale größer als die fahrzeugzentrierter Assistenzsysteme. Wo aber die obere Grenze des Einsparpotentials liegt, kann bisher nicht festgelegt werden. Zu erwarten sind Reduzierungen des Stromverbrauchs ab Unterwerk von mindestens 10-15 %.

## **Fahrzeuge in der Abstellung**

Aus den Untersuchungen des Gesamtstromverbrauchs mittels des im Kapitel 2.2.1 vorgestellten Berechnungsmodells geht hervor, dass ca. 7 % auf den Verbrauch der Fahrzeuge während der Abstellung entfallen. Das umfasst den Stromverbrauch für die Beheizung, Beleuchtung und zum Teil unnötige Wandlungsverluste von Umrichtern im Leerlauf von Fahrzeugen in der Abstellung. In vielen Fällen handelt es sich dabei um organisatorische Maßnahmen, mit deren Hilfe diese unnötigen Verbräuche reduziert werden können. Zum Teil sind aber auch einfache Maßnahmen am Fahrzeug notwendig, um beispielsweise die Elektronik der Beleuchtung von der Elektronik der Heizung zu trennen. Außerdem hat sich im Rahmen dieser Untersuchung gezeigt, dass die Nutzung von Kalthallen statt Freigleisen den Energiebedarf von Fahrzeugen im Winter stark reduzieren kann. So reicht die Wärmemenge innerhalb der Fahrzeuge nach Betriebsende aus, die Temperatur innerhalb dieser Halle über dem Gefrierpunkt zu halten, so dass eine zusätzliche Heizung zur Freihaltung der Fahrzeuge von Eis und Schnee entfallen kann. Allerdings muss hier im Einzelfall entschieden werden, ob diese Maßnahme sinnvoll ist. Über Maßnahmen der Betriebshofsteuerung kann die Erwärmung des Fahrgastraumes ca. 30 Minuten vor Abfahrt beginnen und muss nicht manuell erfolgen oder die ganze Nacht durchlaufen.

Eine weitere Maßnahme zur Senkung des Stromverbrauchs in der Betriebspause ist das Abstellen der Fahrzeuge mit Trennung vom Fahrdraht bzw. der Stromschiene. Minimaler Energiebedarf der Fahrzeuge kann aus den Akkumulatoren gedeckt werden. So können die Leerlaufverluste an den Umrichtern vermieden werden. Ist der Energiebedarf z. B. für die Beheizung von Sandstreueinrichtungen oder die Vorwärmphase der Fahrzeuge für die Akkumulatoren zu groß, können die Leerlaufverluste so gering wie möglich gehalten werden, wenn die Fahrzeuge in Abstellung elektrisch verbunden werden. So kann ein Umrichter mehrere Fahrzeuge versorgen.

Insgesamt kann im Bereich der Fahrzeugabstellung meist mit geringen, finanziellen Aufwand der Stromverbrauch erheblich gesenkt werden. Um die gleichen Einsparpotentiale an anderer Stelle realisieren zu können, muss meist erheblich mehr investiert werden.

## **4.2 Maßnahmen zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien bis 2030**

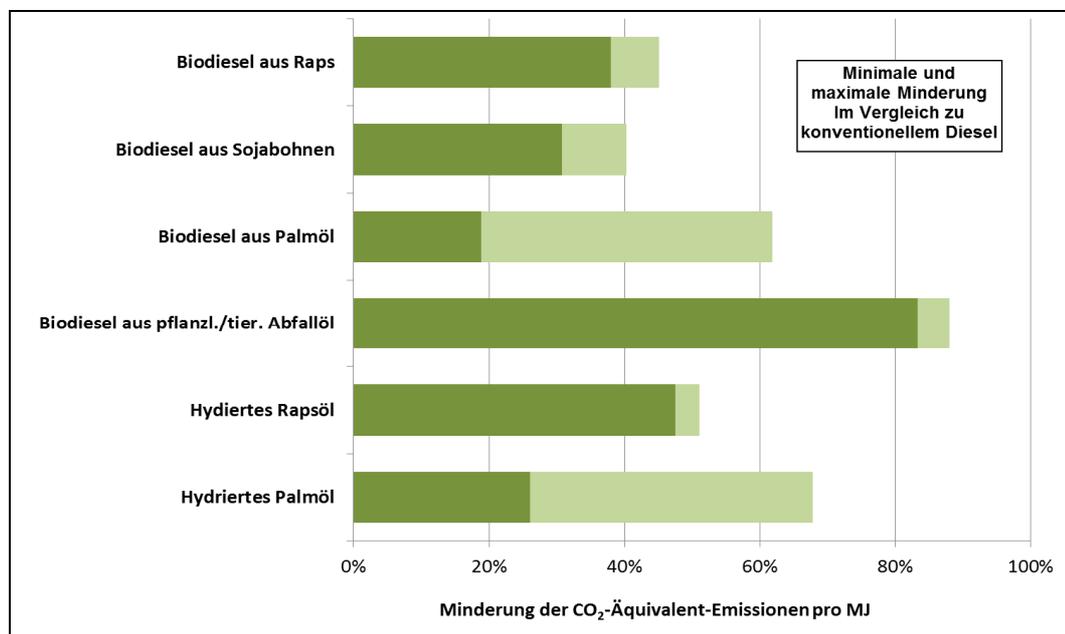
### **4.2.1 ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren**

Beim ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotoren handelt es sich heute in der Regel um Verkehre mit Dieselnbussen. Der Einsatz von erneuerbaren Energieträgern kann für Dieselnbuse einerseits über die reine Betankung von Biokraftstoffen wie Biodiesel oder Pflanzenöl und andererseits über die dem konventionellen Kraftstoff beigemischten Biokraftstoffmengen umgesetzt werden. Biokraftstoffe werden in Deutschland seit dem Abbau von steuerlichen Vorteilen selten in Reinform getankt. Vielmehr werden diese den konventionellen Kraftstoffen beigemischt. Aktuell liegt der Anteil von rein betankten Biokraftstoffen im Verkehr unter 1 % [ifeu 2010]. Die Analyse zum Status quo im ÖPNV hat zudem gezeigt, dass aktuell der Anteil der Reinbetankung bei VDV-Mitgliedsunternehmen einschließlich der Subunternehmer bei maximal rund 0,5 % liegt. Selbst 2006, als für einen Großteil des Jahres noch eine Steuerbefreiung für Biokraftstoffe bestand, wurde lediglich 1,8 % des Kraftstoffverbrauchs der VDV-Unternehmen und seiner Subdienstleister durch Biokraftstoffe oder alternative Kraftstoffe gedeckt (siehe Kapitel 3.4) [VDV 2007; Pfeifer 2010].

Realistisch gesehen wird auch in Zukunft die Reinbetankung für ÖPNV-Unternehmen eher die Ausnahme darstellen, da bereits heute kein finanzieller Anreiz hierzu mehr besteht. In Zukunft werden die Biokraftstoffpreise einschließlich Mehrwert- und Energiesteuer im Jahr 2020 rund 50 % und im Jahr 2030 rund 35 % über den Kraftstoffpreisen von konventionellem Diesel liegen, falls die Biokraftstoffe aus einer nachhaltigen Produktion stammen, d. h. dass kein zusätzlicher Nettoflächenbedarf durch den Anbau von Biokraftstoffen auftritt [Öko-Institut et al. 2011]. Der Anteil der erneuerbaren Energien bei Dieselnbussen im ÖPNV wird somit allein über die Beimischungsquoten von Biokraftstoffen in konventionellem Diesel bestimmt. Die erzielte Treibhausgasminde rung hängt neben den Beimischungsquoten zudem von der erzielten Treibhausgasminde rung der beigemischten Biokraftstoffe ab.

Die Beimischungsquoten werden in Deutschland über das Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen (BioKraftFÄndG) festgelegt [BGBl. I 1804 vom 15.7.2009]. Demnach muss der Biokraftstoffanteil an konventionellem Diesel für den Zeitraum 2007 bis 2014 mindestens 4,4 % betragen. Im Jahr 2010 wurde dieser Wert mit 6,2 % aber bereits deutlich überschritten [Öko-Institut/ifeu 2011]. Zukünftige Quoten sind derzeit noch nicht festgelegt. Allerdings kann von zukünftig höheren Quoten ausgegangen werden, um auch für Deutschland verbindliche Europäische Ziele einzuhalten: Bis 2020 will die Europäische Union (EU) nämlich 20 % des gesamten Endenergieverbrauchs über erneuerbare Energien decken. Für Deutschland ist ein Ziel von 18 % vorgegeben. Dieses Ziel setzt neben einer Umstellung der Stromproduktion auf erneuerbare Energien auch den Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehr voraus.

Die erzielbare Treibhausgasminderung der beigemischten Biokraftstoffe hängt stark davon ab, welche Rohstoffe (z. B. Raps, Sojabohne, Palmöl, Weizen) verwendet, welcher Herstellungsprozess angewandt und wo die Rohstoffe angebaut werden. Abbildung 37 zeigt beispielweise für verschiedene Arten von Biodiesel und hydriertem Pflanzenöl die erzielbaren Emissionsminderungen gegenüber konventionellem Dieselpkraftstoff bezogen auf ein Megajoule Heizwert. Der dunkelgrüne Balken gibt dabei für den verwendeten Rohstoff die geringste Minderung, der hellgrüne Balken die höchste Minderung an. Unberücksichtigt sind dabei mögliche zusätzliche Treibhausgasemissionen, die sich durch die Veränderung der Landnutzung durch den erstmaligen Anbau der Rohstoffe ergeben (zum Beispiel Waldrodung). Die Abbildung 37 zeigt, dass die Minderungen selbst bei Verwendung des gleichen Rohstoffes deutlich unterschiedlich sein können.



**Abbildung 37 Prozentuale Minderung der Treibhausgasemissionen pro MJ Kraftstoff gegenüber konventionellem Diesel (Dunkelgrün: geringste Minderung; hellgrün: höchste Minderung) – ohne Landnutzungsänderungen [EU-Richtlinien 2009/30/EG; Biokraft-NachV; eigene Darstellung]**

Bei den in Abbildung 37 dargestellten Kraftstoffen handelt es sich ausschließlich um Biokraftstoffe der ersten Generation. In 2020 werden aber zu einem großen Anteil und in 2030 fast ausschließlich Biokraftstoffe der zweiten Generation zur Beimischung verwendet. Hierbei handelt es sich zum Beispiel um synthetisch hergestellten Biokraftstoff aus Biomasse (biomass to liquid, kurz: BTL), bei dem Holzreste, Stroh oder Molkereiabfälle in Biokraftstoff umgewandelt werden. Vorteil dieser Biokraftstoffe der zweiten Generation ist, dass sie aus Reststoffen hergestellt werden und damit nicht um Anbauflächen für Nahrungs- oder Futtermittel konkurrieren. Die Treibhausgasminderungen dieser Biokraftstoffe werden deutlich über denen der ersten Generation liegen; wie hoch die Minderungen exakt sein werden, ist derzeit aber nur grob zu sagen.

Erschwerend kommt hinzu, dass zur Ermittlung der exakten Treibhausgasminderung nicht nur der Anteil der Beimischung, sondern auch der Mix der beigemischten Biokraftstoffe bekannt sein muss. Da außer den Mineralölkonzernen in der Regel nicht bekannt ist, welche Arten von Biokraftstoffen dem konventionellen Diesel beigemischt sind, kann derzeit die exakte Minderung der Treibhausgasemissionen für die beigemischten Kraftstoffe nicht ohne weiteres ermittelt werden. Allerdings schreibt die EU-Richtlinie 2009/30/EG vor, dass die beigemischten Biokraftstoffe die gesamten Treibhausgase einschließlich des Anbaus und der Herstellungsprozesse (Well-to-Wheel) reduzieren müssen. Diese Minderung muss derzeit auf den Energieinhalt der Kraftstoffe mindestens 35 % – bezogen auf die gesamte Produktionskette der Kraftstoffe – betragen. Für das Jahr 2017 muss die Minderung dann 50 % und ab 2018 60 % betragen. Diese Minderungen müssen erfüllt sein, unabhängig davon, welche Rohstoffe und Herstellungsverfahren verwendet werden. Die EU-Richtlinie ist über die Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung in nationales Gesetz umgesetzt [Biokraft-NachV]. Damit müssen Biokraftstoffe ab dem 1.1.2011 die in der EU-Richtlinie festgesetzten Treibhausgasminderungen erbringen. Für Biokraftstoffe liegt somit ab 2018 die Treibhausgasminderung bei mindestens 60 % im Vergleich zum konventionellen Diesel. Diese Minderung ist somit im Vergleich zu konventionellem Diesel erheblich und liegt deutlich über den Minderungen, die durch Energieeffizienzmaßnahmen bis 2030 zu erwarten sind. Allerdings könnten diese Minderungen nur voll erschlossen werden, wenn die Biokraftstoffe rein betankt würden.

Neben Diesel kommt im ÖPNV mit konventionellem Motor derzeit auch Erdgas zum Einsatz. Statt fossilem Erdgas könnte auch zukünftig Biomethan (auch als Biogas bezeichnet) in Reinform oder als Beimischung zum konventionellen Erdgas zum Einsatz kommen. Mit dem Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen vom 15.9.2009 (siehe oben) kann Biomethan, das dem Erdgas beigemischt wird bzw. als Reinkraftstoff zur Anwendung kommt, auf die Erfüllung der Biokraftstoffquoten angerechnet werden. Für die Berücksichtigung des Einsatzes von Biomethan für die gesetzlich vorgeschriebenen Biokraftstoffquoten muss allerdings die Erzeugung, Umwandlung und der Transport nachhaltig erfolgen. Es gelten dann die gleichen Erfordernisse an die erreichbare Treibhausgasminderung, wie sie oben für die Biokraftstoffe beschrieben wurde [Biokraft-NachV].

Aktuell hat sich die Gaswirtschaft für 2020 das Ziel gesetzt, ein Mischungsverhältnis von Erdgas zu Biomethan von 80:20 für den Kraftstoffbereich anzubieten [Dena 2010]. Wie Abbildung 38 zeigt, erzielen bereits heute die verschiedenen Optionen der Biomethan-Varianten Minderungen gegenüber Benzin oder Diesel (auf den gleichen Energieinhalt bezogen), die zwischen 59 % und 82 % liegen. Wird Biogas, das aus Gülle, Bioabfall und nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wird, zu 20 % fossilem Erdgas beigemischt, ergeben sich Minderungen gegenüber Benzin und Diesel bezogen auf den gleichen Energieinhalt in Höhe von rund 30 %. Für den Zeitraum nach 2020 dürften diese Minderungen realistisch sein. Ähnlich wie bei reinen Biokraftstoffen muss aufgrund der Kosten davon ausgegangen werden, dass reines Biomethan nur in Nischenmärkten eingesetzt wird.

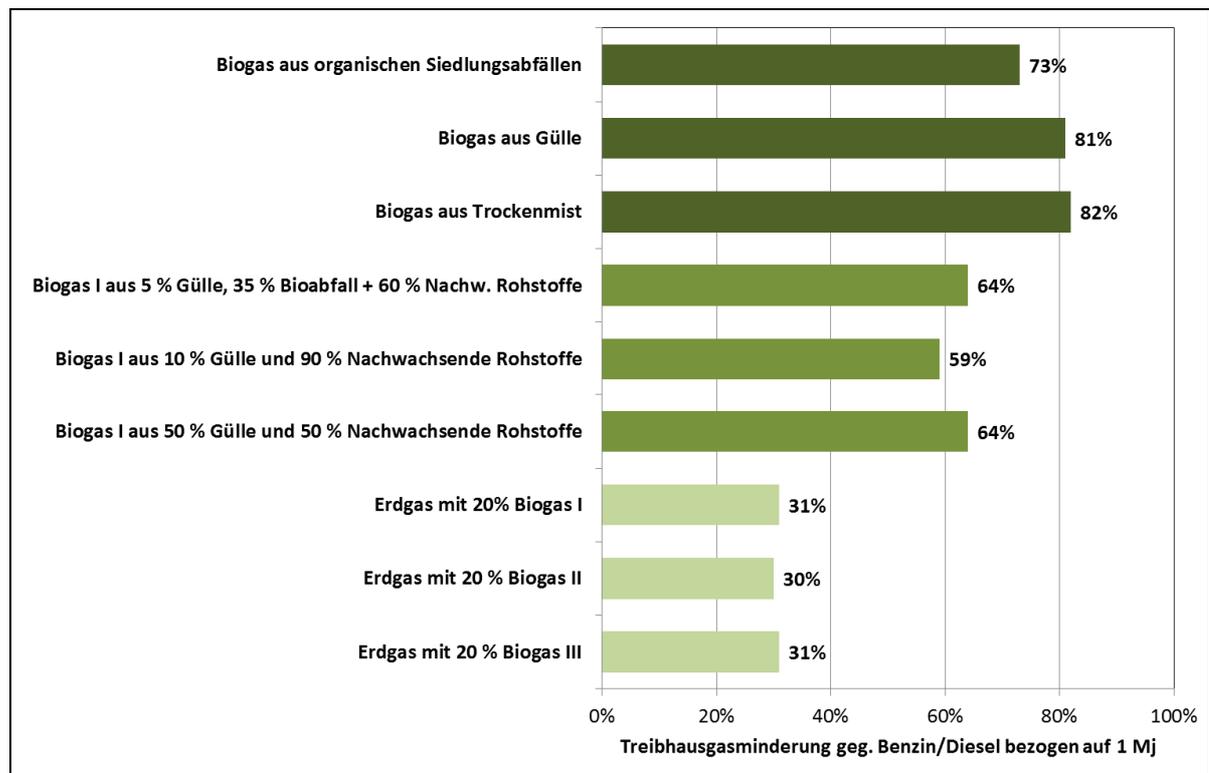


Abbildung 38 Prozentuale Minderung der Treibhausgasemissionen pro MJ Erdgas bzw. Biogas gegenüber konventionellem Benzin bzw. Diesel [Biokraft-NachV; Dena 2010; eigene Darstellung]

#### 4.2.2 Elektrisch betriebener ÖPNV

Beim elektrisch betriebenen ÖPNV kann der Anteil erneuerbarer Energien dadurch erhöht werden, dass mehr Fahrstrom aus erneuerbaren Quellen wie Wind, Sonne oder Biomasse genutzt wird. Im Wesentlichen haben hierzu die ÖPNV-Unternehmen drei Handlungsoptionen:

- **Option 1:** Die Verkehrsunternehmen können kurzfristig durch den Bezug von zertifizierten Ökostromprodukten ihre Treibhausgasemissionen verringern. Damit lassen sich im Vergleich zu den Effizienzmaßnahmen auch kurzfristig verhältnismäßig hohe Minderungen, bezogen auf die Treibhausgasemissionen und abhängig von der Qualität des Stromproduktes, erreichen. Dies setzt allerdings voraus, dass das genutzte Ökostromprodukt zum Bau zusätzlicher Neuanlagen beiträgt, die zudem nicht über das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gefördert sind (siehe hierzu auch Kapitel 3.3.2) [Öko-Institut et al 2009; IWES et al. 2011]. Derzeit gibt es keinen Standard zur Berechnung der Treibhausgaswirkung dieser Ökostromprodukte. Nach einem Bilanzierungsvorschlag deutscher Umweltforschungsinstitute kann, bezogen auf die Treibhausgasemissionen des bundesdeutschen Strommixes, im Jahr 2010 in Höhe von rund 580 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente (einschließlich der Emissionen durch die Herstellung der Energieträger und deren Transport zum Kraftwerk) durch den Kauf eines zertifizierten Produktes, das

beispielsweise den Anforderungen des ok-power-Labels entspricht<sup>5</sup>, rund 50 % der Treibhausgasemissionen eingespart werden (siehe Abbildung 39). Allerdings schlägt der Ökostrombezug derzeit mit Mehrkosten von 1 bis 5 €-Cent pro Kilowattstunde Strom zu Buche, die auch dauerhaft anfallen und sich im Gegensatz zu Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen nicht amortisieren.

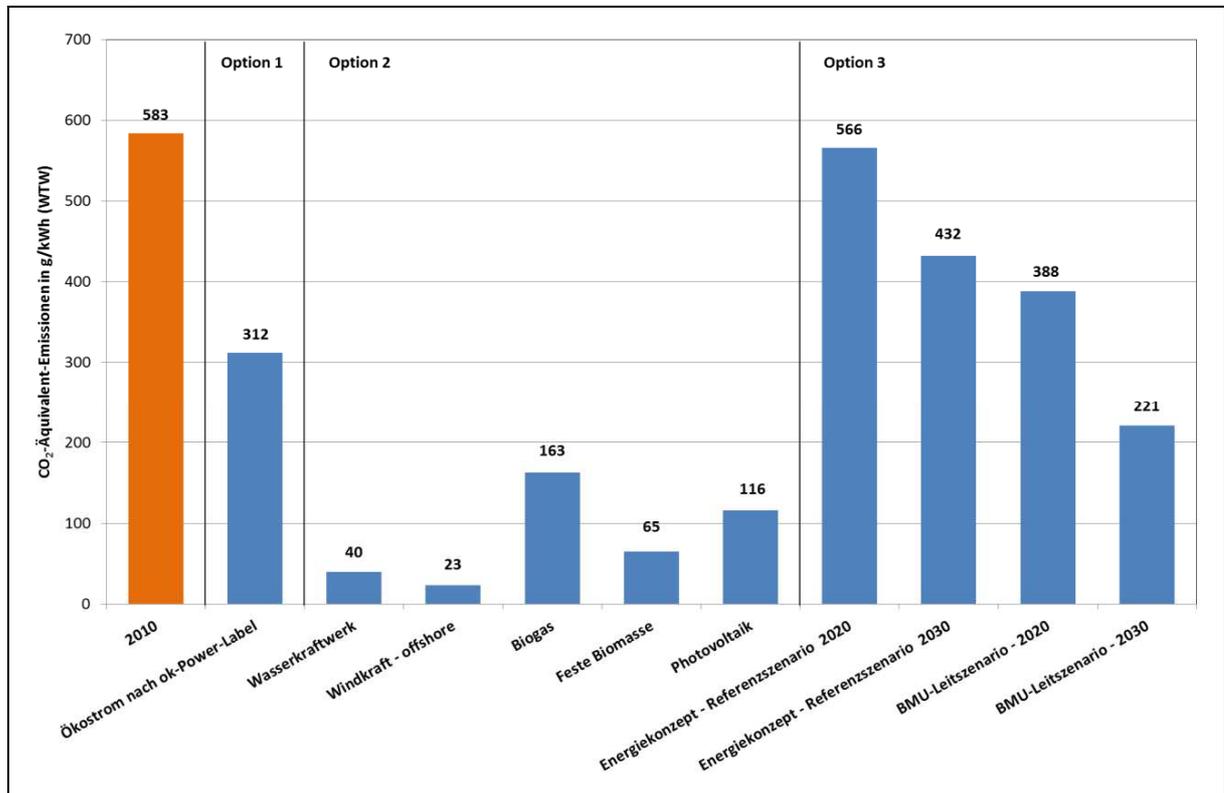
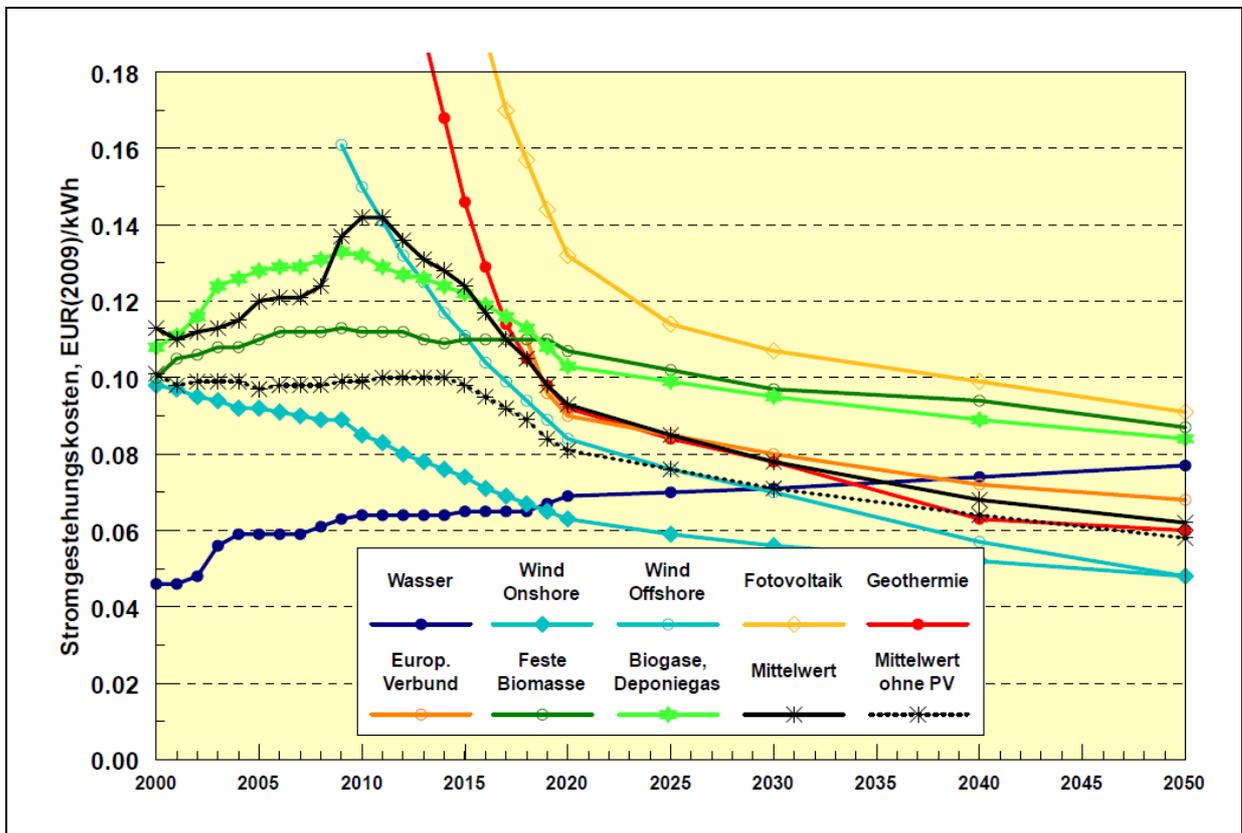


Abbildung 39 CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro kWh Strom (Niederspannung) im Jahr 2010 sowie in den vorgestellten Optionen [Öko-Institut et al. 2011; Öko-Institut et al. 2010; GEMIS 4.7; Prognos et al. 2010; DLR et al. 2010]

- **Option 2:** Als zweite Option steht insbesondere den mit den Stadtwerken in Verbund stehenden Verkehrsunternehmen die Möglichkeit offen, gemeinsam mit dem Stromproduzenten auf eine langfristige Umstellung der Stromzusammensetzung auf erneuerbare Energieträger hinzuwirken und den Anteil der erneuerbaren Energien im Versorgermix zu erhöhen. Je nach verwendeter Technologie (siehe Abbildung 40) lassen sich dadurch erhebliche Treibhausgasreduzierungen gegenüber der heutigen Situation erreichen. Wird der Bezug von Offshore-Windkraft eingesetzt, können Minderungen von über 95 % gegenüber der heutigen Situation auftreten. Eine Anrechenbarkeit auf den Strommix der ÖPNV-Unternehmen ergibt sich aber auch in diesem Fall nur dann, wenn diese Anlagen nicht über das EEG gefördert sind. Handelt es sich um EEG geförderte

<sup>5</sup> Siehe [www.ok-power.de](http://www.ok-power.de).

Stromerzeugungsanlagen, kommen die erzielten Minderungen allen Stromkunden, die über die EEG-Umlage an deren Finanzierung beteiligt waren, zu gute. Die erzielten Minderungen darf sich dann ein Unternehmen nicht anrechnen, da es sonst zu Doppelzahlungen kommen würde.



**Abbildung 40** Zukünftige Entwicklung der Stromgestehungskosten der verschiedenen Technologien zur Erzeugung erneuerbarer Energien bis 2050 nach der BMU-Leitstudie im Basisszenario 2010 A [DLR et al. 2010]

Diese Option führt aber zu Mehrkosten. Zwangsläufig muss eine höhere Vergütung bezahlt werden, als sie sich aus der Einspeisevergütung nach dem EEG ergibt. Für Strom aus Windkraftanlagen im Meer beträgt die Vergütung in den ersten zwölf Jahren 13 €-Cent/kWh (für Anlagen, die vor dem 31.12.2015 in Betrieb gehen 15 €-Cent/kWh). Die Grundvergütung nach 12 Jahren beträgt noch 3,5 Cent/kWh. Abbildung 40 zeigt aber, dass die Stromgestehungskosten verschiedener Technologien zur Erzeugung von Strom auf Basis erneuerbarer Energien in Zukunft stark fallen werden. Insbesondere die Erzeugung von Strom aus Offshore-Windkraftanlagen wird im Jahr 2030 mit 8 €-Cent/kWh die Größenordnung von konventionell erzeugtem Strom auf Basis fossiler Energieträger erreichen [DLR et al. 2010; IWES et al. 2011]. Allerdings liegen bis 2030 – eine mäßige Preisentwicklung der fossilen Energieträger unterstellt – durchweg die Stromgestehungskosten erneuerbarer Erzeugungsanlagen über denen der fossilen Kraftwerke.

Nichtsdestotrotz kann davon ausgegangen werden, dass die Einspeisevergütungen in Zukunft sinken werden und die direkte Investition eines Unternehmens in eine erneuerbare Erzeugungsanlage in Kooperation mit dem Energieversorger sich mittelfristig rechnen kann. Im Gegensatz zu den fossilen Energieträgern weisen erneuerbare Energien niedrigere Betriebskosten auf, da keine jährlichen Brennstoffkosten anfallen. Nennenswerte Kosteneinsparungen würden von den ÖPNV-Unternehmen aber erst nach 2030 realisiert werden können. Die Umsetzung dieser Option wäre für ÖPNV-Unternehmen zwar kurzfristig möglich, dürfte sich aber erst mittelfristig nach 2020 kosteneffizient darstellen lassen.

- **Option 3:** Die letzte Möglichkeit der ÖPNV-Unternehmen ist, nicht aktiv Strom aus erneuerbaren Energien einzusetzen, sondern indirekt vom Ausbau der erneuerbaren Energien, gefördert durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), zu profitieren. Mit dem Energiekonzept hat die Bundesregierung sich einen klaren Zielpfad für den Ausbau der erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung in Deutschland vorgegeben [BMWi/BMU 2010]: Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung soll 35 % bis 2020 und 50 % bis 2030 betragen. Gleichzeitig ist mit dem Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes im Sommer 2011 beschlossen worden, schneller als im Energiekonzept vorgesehen, aus der Atomkraft auszusteigen.

Der Ausbau der erneuerbaren Energie wird zwangsläufig auch zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen des Stroms führen, den die ÖPNV-Unternehmen einsetzen. Anders als die hohen Anteile von erneuerbaren Energien vermuten lassen, sind damit nicht zwangsläufig hohe Emissionsminderungen verbunden. Entscheidend für die Höhe der Treibhausgasemissionen ist, wie die konventionellen Kraftwerke betrieben werden. Wird ein ökonomisch optimaler Betrieb der Kraftwerke durchgeführt, kommen insbesondere Braunkohlekraftwerke mit niedrigen Kosten, aber hohen Treibhausgasemissionen zum Einsatz [Öko-Institut 2011]. Dies ist zum Beispiel im Referenzszenario der Studie „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ der Fall, die im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie von der Prognos AG, dem Energiewirtschaftlichem Institut an der Universität zu Köln (EWI) und der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS) erstellt wurde [Prognos et al. 2010]. Trotz Anteile der erneuerbaren Energie von 34 % in 2020 und 45 % in 2030 werden die spezifischen Treibhausgasemissionen pro kWh verbrauchten Stroms mit 566 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente in 2020 und 432 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente in 2030 nur mäßig gegenüber der heutigen Situation sinken (siehe Abbildung 39). Die Reduktionen gegenüber 2010 liegen in diesen Fällen lediglich bei 3 % in 2020 und 26 % in 2030. Die Strompreise werden für dieses Referenzszenario lediglich moderat um rund 10 % gegenüber der heutigen Situation steigen (konstante Preise) [Prognos et al. 2010].

Wird hingegen auch der konventionelle Kraftwerkspark unter Klimagesichtspunkten optimiert betrieben und die Anteile der erneuerbaren Energien über die Mindestziele der Bundesregierung angehoben, können bis 2030 aber deutlich höhere Emissionsminderungen erzielt werden. Basierend auf der BMU-Leitstudie 2010 zum

Schlussbericht

Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland sind beispielsweise Werte von 388 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh in 2020 (-34 %) und 221 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh in 2030 (-62 %) erreichbar [DLR et al. 2010; Öko-Institut et al. 2011]. In diesem Fall würden die Anteile erneuerbarer Energien an der Stromproduktion im Jahr 2020 bei 47 % und im Jahr 2030 bei 67 % liegen [DLR 2010 et al.]. Im Vergleich zum Referenzszenario des Energiekonzeptes ist dieser forcierte Ausbau der erneuerbaren Energien und der optimierte Betrieb der konventionellen Kraftwerke mit Mehrkosten verbunden, die mittelfristig (2020) zu einem rund 25 % höheren Preisniveau im Vergleich zu heute führen dürfte (zu konstanten Preisen). Langfristig ist mit einer Abnahme des Strompreises zu rechnen, da sich dann die niedrigeren Betriebskosten und die niedrigeren Gestehungskosten der neuen Anlagen positiv bemerkbar machen [DLR 2010 et al.].

Die Gegenüberstellung der drei Handlungsoptionen, um den Anteil erneuerbarer Energien beim Fahrstrom zu erhöhen verdeutlicht, dass aktives Handeln kurz- und mittelfristig zu deutlichen Mehrkosten für die ÖPNV-Unternehmen führen wird. Langfristige Kosteneinsparungen, die voraussichtlich nach 2030 erst erzielt werden können, dürften die Unternehmen kaum bewegen, sich aktiv am Ausbau der erneuerbaren Energien zu beteiligen. Es ist daher anzunehmen, dass die Unternehmen lediglich die Verbesserungen in der deutschen Stromproduktion mitnehmen werden. Dies wird jedoch auch zu Mehrkosten in Höhe von bis zu 10 % gegenüber 2010 führen (auf Basis konstanter Preise). Gleichzeitig werden die Treibhausgasminderungen aber nur gering ausfallen. Ob diese geringen Minderungen ausreichen werden, auch langfristig den Umweltvorteil des elektrisch betriebenen ÖPNV zu sichern, wird im Referenzszenario in Kapitel 5 untersucht. Welche Möglichkeiten der aktive Ausbau der erneuerbaren Energien im Strombereich bietet, wird in Kapitel 6 im Rahmen des Szenarios „Energieeffizienz und erneuerbare Energien“ detaillierter untersucht.

### 4.3 Zusammenfassung

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Maßnahmen, die Energieeffizienz im ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor sowie im elektrisch betriebenen ÖPNV bis 2030 zu erhöhen und durch den Einsatz von erneuerbarer Energien die Treibhausgasemissionen des ÖPNV zu verringern. Bei den Energieeffizienzmaßnahmen wurden in diesem Kapitel ausschließlich Maßnahmen betrachtet, die fahrzeugseitig, betrieblich oder auf der Infrastruktur-Seite wirken. Nicht betrachtet werden, entsprechend der Zielstellung des Forschungsvorhabens, Maßnahmen, die zum Ziel haben, die Auslastungen des ÖPNV und damit indirekt die Energieeffizienz – gemessen pro Personenkilometer – zu erhöhen.

Tabelle 9 gibt für den ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor eine Übersicht über die betrachteten Maßnahmenbereiche, die in der Literatur angegebenen Einsparpotentiale der verschiedenen fahrzeugseitigen Effizienzmaßnahmen sowie die Einsparpotentiale, die im weiteren Projektverlauf für den Busbereich verwendet wurden. Die im weiteren Projektverlauf berücksichtigten Potentiale reflektieren insbesondere die Einschätzungen der Bushersteller und ÖPNV-Unternehmen, die im Rahmen eines Experten-Workshops zu diesem Forschungsvorhaben gemacht wurden.

Effizienzmaßnahme	Minderungspotential in der Literatur	In den Szenarien berücksichtigtes maximales Potential	Potentielle Risiken/Hemmnisse
	% des Gesamtverbrauchs	% des Gesamtverbrauchs	
<b>Diesel-Hybridantrieb</b>	20 % bis >37 %	30 %	Derzeit hohe Kosten
<b>Optimierung von Motor und Getriebe</b>	10 % bis 15 %	15 %	Motoren auf Lkw-Einsatz hin optimiert
<b>Energieeffiziente Nebenaggregate</b>	0 % bis 6 %	6 %	
<b>Leichtbau</b>	3,5 bis 5 % pro t Fahrzeuggewicht; max. 10 %	-	Komfortverlust, verringerte Lebensdauer
<b>Energieoptimierte Klimatisierung</b>	>3,5 %	5 %	
<b>Leichtlaufreifen</b>	0,8 % bis 8 %	-	Verringerte Laufleistung
<b>Leichtlauföle</b>	0 % bis 3 %	-	Verringerte Motorlebensdauer
<b>Quellen:</b> [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]; [Interviews]; [NAP 2010]; [Öko-Institut 2009]; [Friedrich 2002], [Andersson 2004]; [VTT 2006 & 2007]; [UBA 2010b]; [EESI 2008].			

**Tabelle 9 Übersicht über fahrzeugseitige Effizienzmaßnahmen beim ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor**

Schlussbericht

Es zeigt sich, dass in einem Zeitraum bis 2030 die Diesel-Hybridbusse die größten Kraftstoffeinsparungen versprechen. Allerdings hängt die Einsparung stark von dem Fahrprofil ab und kann schon andere Maßnahmen wie optimierte Nebenaggregate enthalten. Daneben bietet die Optimierung von Motoren und Getriebe mit einer Kraftstoffreduktion von bis zu 15 % erhebliche Einsparpotentiale (insgesamt zweitwichtigste Minderungsmaßnahme). Nicht aufgeführt in der Tabelle ist, dass es bei den Maßnahmen zur Verbesserung der Klimatisierung auch zu verringerten Kältemittelverlusten kommen kann, welche eine hohe Klimawirksamkeit aufweisen.

Neben den fahrzeugseitigen Effizienzmaßnahmen können beim ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor auch Maßnahmen, die betrieblicher und planerischer Natur sind, zu Minderungen der Energieverbräuche bis 2030 und darüber hinaus führen. Zu nennen sind an dieser Stelle Maßnahmen zur Förderung der energieeffizienten Fahrweise (Fahrertraining, Anreizsysteme, innerbetriebliche Anweisungen an die Fahrer), dem bedarfsorientierten Einsatz der Fahrzeuge (Anhängierzüge, Solobusse in Schwachlastzeiten) und Maßnahmen bei der Ausschreibung (LCC bewertet, Verringerung von Leerfahrten bei Unterauftragnehmern). Die Einsparpotentiale der genannten Maßnahmen müssen dabei allerdings jeweils im Detail bewertet werden.

Beim elektrisch betriebenen ÖPNV umfassen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz nicht nur die Fahrzeuge und betrieblichen Aspekte, sondern auch die zugeordnete Infrastruktur. Dabei handelt es sich um die Stromversorgung in Gestalt von Bahnstrom-Unterwerken, die Stromleitung von den Unterwerken zu den Fahrzeugen über die Fahrleitung und die Schiene aber auch um unterirdische Haltestellen oder um Abstellanlagen mit nennenswerten Standby-Verbräuchen von geparkten Fahrzeugen.

Eine zügige Umsetzung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung wird gehemmt durch die lange Lebensdauer von Fahrzeugen und Anlagen, in aller Regel jenseits von 30 Jahren. Ein Sondereffekt tritt bei den unterirdischen Haltestellen auf, die mehrheitlich in den siebziger Jahren gebaut wurden und jetzt zur Ertüchtigung anstehen.

Fahrzeugseitige Maßnahmen betreffen neben der weiteren Ertüchtigung des Antriebsstranges von den Leistungsschaltern der Motorelektronik bis zur Verringerung der Fahrwiderstände auch den Einsatz von Energiespeichern auf den Fahrzeugen zur Nutzung der Bremsenergie und Optimierungen bei den Komfortfunktionen, insbesondere der Klimaanlage.

Im Bereich der Infrastruktur ist die Einbindung der Systeme in intelligente Netze durch rückspeisefähige Unterwerke zu nennen, ebenso wie die weitere Verbesserung der Fahrstromleitung zur Verringerung der Verluste. Alternativ oder ergänzend zu Speichern auf den Fahrzeugen können auch ortsfeste Energiespeicher sinnvoll sein.

Der große Vorteil betrieblicher Maßnahmen ist ihre schnelle Wirksamkeit, verbunden in der Regel mit überschaubaren Kosten. Eine Fahrzeugbeschaffung, die sich an den Lebensdauerkosten (LCC) statt allein an den Investitionskosten orientiert, erhöht die Chancen für den Einsatz teurerer, aber energieeffizienterer Komponenten. Technisch unterstützte oder durch Schulung vermittelte Maßnahmen zur weiteren Verbreitung einer energiesparenden Fahrweise

gelten als besonders wirksam. Schließlich zeigt sich, dass auch bei den Straßenbahn-Fahrzeugen Maßnahmen zur Senkung des Standby-Verbrauches bei der Fahrzeugabstellung ein erhebliches Optimierungspotential in sich bergen.

Bezüglich der Maßnahmen zur Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien im ÖPNV ist grundsätzlich festzustellen, dass der ÖPNV indirekt an den allgemein stattfindenden Reduktionen der Treibhausgasemissionen in Deutschland partizipieren kann. Dies gilt sowohl für den ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor wie auch für den elektrisch betriebenen ÖPNV.

Bei den Diesel-Bussen, die derzeit das Rückgrat des ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor darstellen, werden die Verkehrsunternehmen bis 2030 an der Erhöhung der Biokraftstoffquoten im konventionellen Diesel partizipieren. Gleichzeitig werden ab 2018 die Treibhausgasminderungen der beigemischten Biokraftstoffe mindestens 60 % gegenüber Diesel – bezogen auf den gleichen Energieinhalt – erreichen. Auch die Treibhausgasemissionen der Stromproduktion in Deutschland werden sich durch den Ausbau der erneuerbaren Energien bis 2030 deutlich reduzieren. Selbst im ungünstigsten Fall ist eine Treibhausgasminderung pro verbrauchte Kilowattstunde Strom von 26 % möglich. Diese Minderungen sind durch Energieeffizienzmaßnahmen im elektrisch betriebenen ÖPNV lediglich im günstigsten Fall zu erreichen.

Ob ÖPNV-Unternehmen sich aktiv am Ausbau erneuerbarer Energien beteiligen, ist mehr als fraglich. Der Einsatz reiner Biokraftstoffe wie der Bezug von zertifizierten Ökostromprodukten oder die Beteiligung an einer Erzeugungsanlage auf Basis erneuerbarer Energien wird kurz- und mittelfristig zu höheren Energiekosten führen. Lediglich langfristig, nach 2030 könnte sich der Umstieg auf erneuerbare Energien in niedrigeren Energiekosten niederschlagen.

Welche Auswirkungen gerade ein aktiver Umstieg auf erneuerbare Energien und auch die umfassende Erschließung der Energieeffizienzpotentiale auf Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Energiekosten des ÖPNV hat, wird insbesondere in Kapitel 6 untersucht. In Kapitel 5 wird dem ein Referenzszenario gegenübergestellt, in dem nur moderat Energieeffizienzpotentiale erschlossen werden und kein aktiver Umstieg auf erneuerbare Energien erfolgt.

## 5 Entwicklung des ÖPNV im Referenzszenario bis 2030

Wie entwickeln sich der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des ÖPNV bis 2030, wenn keine besonderen Anstrengungen unternommen werden, die Energieeffizienz und den Anteil von erneuerbaren Energien im ÖPNV zu steigern? Welche Zusatzkosten entstehen den ÖPNV-Unternehmen dann durch gestiegene Energiekosten? Die Beantwortung dieser Fragen steht im Mittelpunkt dieses Kapitels. Von den im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz werden lediglich nur die Maßnahmen umgesetzt, die sich aufgrund von Flottenmodernisierungen zwangsläufig ergeben bzw. sich aufgrund kurzer Amortisationszeiträume schnell rechnen. Zusätzliche staatliche Anreizprogramme zur Förderung alternativer Antriebs- und Kraftstoffkonzepte sind nicht vorgesehen. Zusätzliche erneuerbare Energien werden nicht eingesetzt. Die ÖPNV-Unternehmen werden lediglich die Mitnahmeeffekte mitnehmen, die sich durch die Erhöhung erneuerbarer Energien durch die staatlichen Ausbauziele ergeben. Im Referenzszenario investieren somit die ÖPNV-Unternehmen nur sehr begrenzt in Energieeffizienz und erneuerbare Energien.

Im Folgenden wird vorgestellt, welche Annahmen im Referenzszenario in Bezug auf Energieeffizienz (siehe Kapitel 5.2) und Einsatz erneuerbaren Energien im ÖPNV (siehe Kapitel 5.3) zugrunde liegen. Zuvor wird aber beschrieben, welche verkehrlichen und preislichen Annahmen dem Referenzszenario zugrunde liegen (siehe Kapitel 5.1). Die Annahmen zur Verkehrsentwicklung bestimmen maßgeblich, wie schnell Modernisierungen der ÖPNV-Flotten stattfinden, und damit, wie schnell sich neue Technologien am Markt durchsetzen. Die Entwicklung der Strom- und Kraftstoffpreise bestimmt letztendlich, mit welchen Mehrkosten ggf. die ÖPNV-Unternehmen im Referenzfall rechnen müssen.

Wie sich das Referenzszenario auf den Energieverbrauch, die Treibhausgasemissionen und die Energiekosten des ÖPNV bis 2020 und 2030 auswirkt, wird in Kapitel 5.4 beschrieben. Hier wird insbesondere gezeigt, wie sich der spezifische Energieverbrauch und die spezifischen Treibhausgasemissionen pro Platz- und Personenkilometer bis 2020 und 2030 entwickeln. Zusätzlich wird aufgezeigt, welche Mehrkosten auf die ÖPNV-Unternehmen durch die gestiegenen Strom- und Kraftstoffkosten zukommen werden. Abschließend wird in Kapitel 5.5 eine Zusammenfassung zum Referenzszenario gegeben.

## 5.1 Rahmenbedingungen des Referenzszenarios

Das vorliegende Forschungsvorhaben hat zum Ziel, ausschließlich die Möglichkeiten der Steigerung der Energieeffizienz auf Fahrzeugebene einschließlich der dazugehörigen Infrastruktur (z. B. stationäre Verbraucher beim schienengebundenen ÖPNV) für den ÖPNV zu untersuchen. Die Auswirkungen von Auslastungssteigerungen im ÖPNV auf die Energieeffizienz sollen im Rahmen dieses Vorhabens hingegen nicht untersucht werden. Nichtsdestotrotz bestimmt die Verkehrsentwicklung maßgeblich, wie schnell sich Effizienztechnologien am Markt durchsetzen. In wachsenden Märkten müssen mehr neue Fahrzeuge im ÖPNV beschafft werden als in stagnierenden Märkten. Dies hat zur Folge, dass der Anteil neuer und somit potentiell energieeffizienter Fahrzeuge sich schneller im Bestand durchsetzen wird. Die Energieeffizienz des gesamten ÖPNV würde in diesem Fall schneller steigen als im Fall eines stagnierenden Marktes.

Für die Referenzentwicklung in diesem Forschungsvorhaben wird für die Entwicklung der Verkehrsleistung das Referenzszenario von Prognos/Progtrans zugrunde gelegt, das aktuell im Auftrag des BMVBS entwickelt wurde (Stand Oktober 2010) [Prognos/Progtrans 2011]. Im Referenzszenario von Prognos/Progtrans werden ausschließlich Aussagen zur Entwicklung des gesamten Öffentlichen Personenstraßenverkehrs (ÖSPV) für die Jahre 2020, 2025 und 2050 getroffen. Für das Jahr 2030 wurde in einem ersten Schritt auf Basis der Werte 2025 und 2050 ein Wert interpoliert (siehe Tabelle 10). Demnach ist ausgehend von dem in der amtlichen Statistik für das Jahr 2008 ausgewiesenen Wert für den ÖSPV in Höhe von 79,7 Mrd. Pkm bis 2020 und 2030 mit einem leichten Rückgang der Verkehrsleistung auf 78,5 bzw. 78,8 Mrd. Pkm zu rechnen [ViZ 2011; Progtrans/Prognos 2011].

Eine weitere Aufteilung der Verkehrsleistung auf Linien- und Gelegenheitsverkehre im ÖSPV sowie eine weitere Unterteilung der Linienverkehre nach Straßen-, Stadt- und U-Bahnen und Busverkehren stehen im Referenzszenario von Progtrans/Prognos nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde die Aufteilung der Verkehrsleistung des ÖSPV der amtlichen Statistik für das Jahr 2008 für die Jahre 2020 und 2030 fortgeschrieben. Hierzu wurden die beobachteten Trends des Zeitraums 2000 bis 2008 zugrunde gelegt [ViZ 2011]. Demnach steigt der Verkehr mit Straßen-, Stadt- und U-Bahnen in Zukunft weiter an, während Busverkehre im Linienverkehr und Gelegenheitsverkehre leicht rückläufig sind. Diese Entwicklungen spiegeln auch demographische Trends wieder, die in Zukunft mit stark sinkenden Schülerzahlen und damit stagnierenden Entwicklungen bzw. Rückgängen beim ÖSPV mit Bussen ausgehen (für Schleswig-Holstein detailliert untersucht in [Intraplan 2008a und 2008b]).

	2008	2020	Δ 2020/08	2030	Δ 2030/08
	<i>Mrd. Pkm</i>	<i>Mrd. Pkm</i>	%	<i>Mrd. Pkm</i>	%
<b>Öffentl. Straßenpersonenverkehr</b>	<b>79,7</b>	<b>78,5</b>	<b>-1,5%</b>	<b>78,8</b>	<b>-1,2%</b>
Linienverkehr	55,6	56,0	0,6%	56,3	1,2%
Straßen-, Stadt-, U-Bahnen	16,1	17,3	7,4%	18,2	12,7%
Busverkehre	39,5	38,7	-2,1%	38,1	-3,5%
Gelegenheitsverkehr	24,1	22,5	-6,4%	22,5	-6,7%
<b>Quellen:</b> [ViZ 2011]; [Prognos/Protrans 2011]; eigene Berechnungen.					

**Tabelle 10 Entwicklung der Verkehrsleistung des Öffentlichen Straßenpersonenverkehrs (ÖSPV) nach dem Referenzszenario von Prognos/Protrans bis 2030 (Stand Oktober 2011)**

In diesem Forschungsvorhaben werden ausschließlich der ÖPNV und damit der in der Statistik ausgewiesene Bereich der Linienverkehre betrachtet, für den insgesamt von leichten Zuwächsen bis 2030 ausgegangen werden kann. Die leicht rückläufige Verkehrsentwicklung im Buslinienverkehr führt dazu, dass der Bestand an Bussen deutlich rückläufig ist (siehe Tabelle 11). Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass im letzten Jahrzehnt verstärkt Gelenkbusse (über 18 t zGG) zugelassen wurden (siehe auch Kapitel 3.1). Für die Entwicklung bis 2030 wird zwar unterstellt, dass sich dieser Anteil nicht weiter erhöht, aber dass sich der Anteil auf dem Niveau des Zeitraums 2000 bis 2010 einpendelt. Unter der Annahme, dass die Haltedauern der Busse bis 2030 weitestgehend unverändert bleiben, hat dies zur Folge, dass der Anteil der Linienbusse über 18 t zGG im Bestand kontinuierlich zunimmt (siehe auch Abbildung 41).

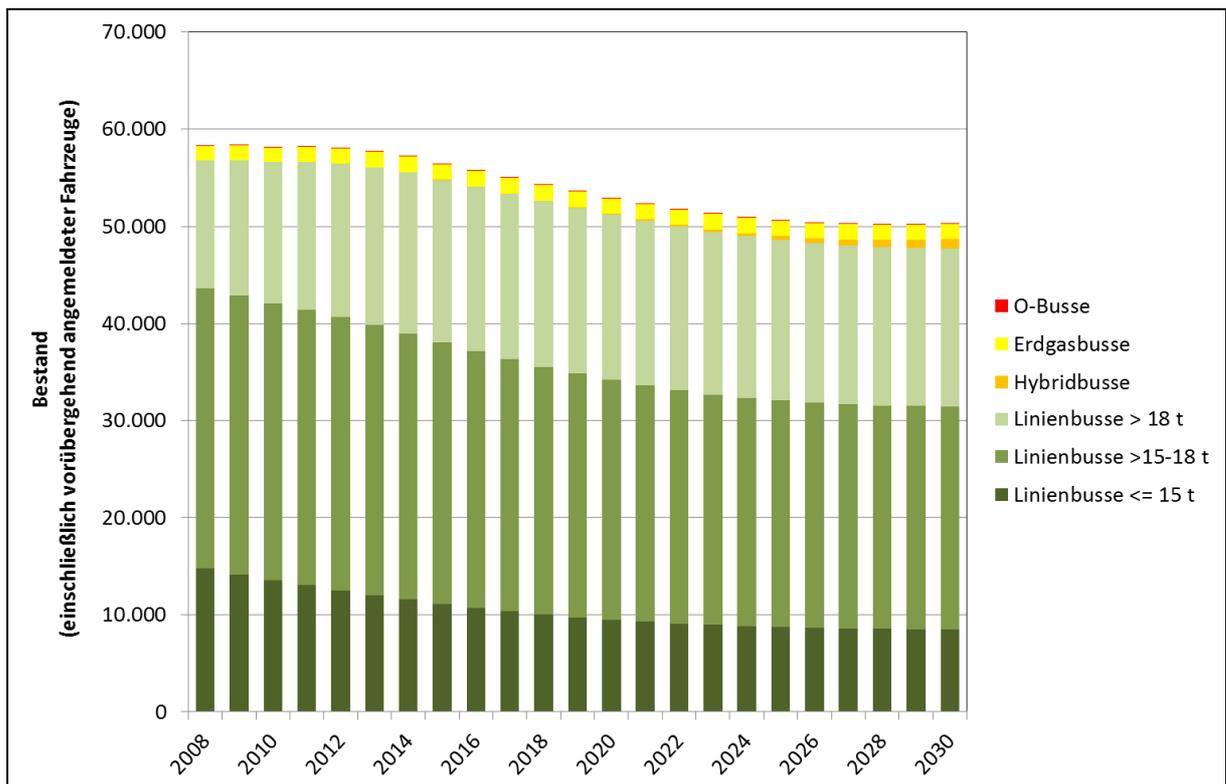
Kenngröße	Einheit	2008	2020	Δ 2020/08	2030	Δ 2030/08
Bestand <sup>1)</sup>	<i>Anzahl</i>	58.300	53.000	-9%	50.400	-14%
Neuzulassungen pro Jahr	<i>Anzahl</i>	4.080	3.200	-22%	3.500	-14%
Fahrleistung	<i>Mio. km</i>	2.824	2.636	-7%	2.551	-10%
Durch. Fahrleistung	<i>km/a</i>	48.400	49.700	3%	50.700	5%
Angebotene Platz-km	<i>Mio. Platz-km</i>	196.300	195.800	0%	190.900	-3%
Auslastung	<i>Pkm/km</i>	14,0	14,7	5%	15,0	7%
<sup>1)</sup> Einschließlich vorübergehend abgemeldeten Fahrzeuge.						
<b>Quellen:</b> [ViZ 2011]; eigene Berechnungen.						

**Tabelle 11 Entwicklung verkehrlicher Kenngrößen des ÖPNV mit Bussen bis 2020 und 2030 im Referenzszenario**

Würde insgesamt die Zahl der Neuzulassungen und damit der Busbestand nicht gleichzeitig sinken, würden die angebotenen Platz-Kilometer so stark anwachsen, dass entweder die Verkehrsleistung stark ansteigen oder die Auslastung stark sinken müsste. Da einerseits von einem Rückgang der Verkehrsleistung ausgegangen wird, andererseits auch von einer leichten Zunahme der Auslastung der Busse ausgegangen werden kann (siehe Tabelle 11), ist

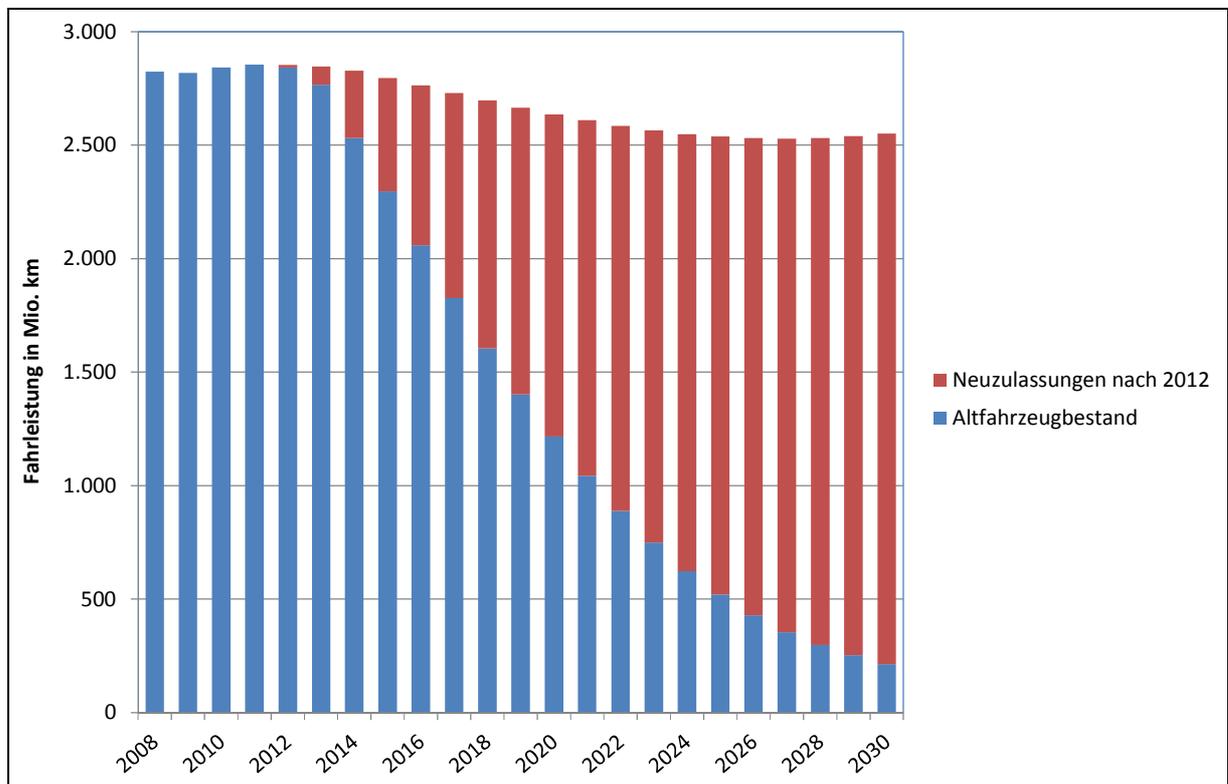
von einer Reduktion des Bestandes bis 2020 und 2030 gegenüber 2008 auszugehen. Verstärkt wird dies noch dadurch, dass aufgrund der Verschiebung zu tendenziell größeren Bussen von einem Anstieg der jährlichen durchschnittlichen Fahrleistung der Busse ausgegangen wird (siehe ebenfalls Tabelle 11). Um den Rückgang im Bestand zu erreichen, wird bis 2020 von einer Reduktion der Neuzulassungen auf jährlich 3.200 Busse ausgegangen. In den Folgejahren bis 2030 steigt die Zahl der Neuzulassungen wieder auf rund 3.500 Busse.

Wie Abbildung 41 ebenfalls zeigt, wird sich die Zahl alternativer Antriebskonzepte im Bestand in der Referenzentwicklung kaum verändern. Bei Erdgas- und O-Bussen wird lediglich davon ausgegangen, dass der Bestand im Zeitraum 2008 bis 2030 annähernd konstant bleibt (rund 70 O-Busse und rund 1.600 Erdgasbusse). Hybridbusse weisen im Vergleich zu konventionellen Bussen derzeit Mehrkosten von 50 % auf und sind daher ohne Förderprogramme nicht wirtschaftlich. In der Referenzentwicklung wird unterstellt, dass keine staatlichen Förderprogramme initiiert werden, so dass der Bestand an Hybridbussen im Jahr 2020 gerade einmal rund 100 Busse und im Jahr 2030 rund 900 Busse beträgt (siehe Abbildung 41). Die Bestandzahlen sind das Resultat der geringen Anteile der Hybridbusse an den Neuzulassungszahlen (im Jahr 2020: rund 1 %; im Jahr 2030: rund 4 %).



**Abbildung 41 Entwicklung des Busbestandes (einschließlich vorübergehend abgemeldeter Fahrzeuge) in Deutschland im Zeitraum von 2008 bis 2030 differenziert nach Größenklassen und Antriebskonzepten [eigene Berechnungen]**

Abbildung 42 zeigt die Entwicklung der Gesamtfahrleistung der Busse im Zeitraum 2008 bis 2030. Demnach ist von einem Rückgang der Fahrleistung von 7 % bis 2020 und von rund 10 % bis 2030 auszugehen. In der Abbildung ist zusätzlich dargestellt, wie sich der Anteil der Fahrleistung der Fahrzeuge entwickelt, die nach 2012 zugelassen wurden. Da die Fahrleistung neuer Busse bis zu 30 % über dem Durchschnitt liegen [IVT 2004], erreichen moderne Busse verhältnismäßig schnell hohe Anteile an der Gesamtfahrleistung der Busse. Im Jahr 2020 wird bereits rund 54 %, im Jahr 2030 rund 92 % der Fahrleistung durch Busse erbracht, die nach 2012 zugelassen wurden. Dies zeigt einerseits, dass die Energieeffizienz der Busflotte im Jahr 2030 heute noch klar beeinflusst werden kann. Andererseits verdeutlicht die Entwicklung aber auch, dass ein verspäteter Einstieg in effiziente Bustechnologien negativ die Energieeffizienz der Busflotte im Jahr 2030 beeinflusst. Werden beispielsweise erst nach 2020 stark verbrauchsarme Busse eingeführt, wird im Jahr 2020 lediglich rund die Hälfte der Fahrleistung durch diese Busse erbracht.



**Abbildung 42 Entwicklung der Fahrleistung der Linienbusse des ÖPNV in Deutschland im Zeitraum von 2008 bis 2030 differenziert nach Altfahrzeugen und Neufahrzeugen im Referenzszenario [eigene Berechnungen]**

Die Entwicklung der verkehrlichen Kenngrößen für Straßen-/Stadtbahnen und U-Bahnen, wie sie für die Referenzentwicklung zugrunde gelegt werden, sind in Tabelle 12 dargestellt. Die Verkehrsleistung teilt sich im Jahr 2008 rund 2:1 zwischen Straßen- und Stadtbahnen einerseits und U-Bahnen andererseits auf. Im Entwicklungszeitraum zwischen den Jahren 2008 und 2020 wachsen die Verkehrsleistungen, die durch die U-Bahnen erbracht werden annähernd doppelt so stark wie die Verkehrsleistungen der Stadt- und Straßenbahnen. Für die

## Schlussbericht

Entwicklung bis 2030 wird von einem leicht überdurchschnittlichen Wachstum des U-Bahnverkehrs ausgegangen, weshalb sich der Anteil der U-Bahnen an der Gesamtverkehrsleistung leicht erhöht (rund 34 % statt 32 %). Die angebotenen Platz-Kilometer aller schienengebundenen ÖPNV-Verkehrsmittel steigen geringfügiger als die jeweiligen Verkehrsleistungen. Dies ist Ergebnis der Annahme, dass die Auslastungen sich in den nächsten 10 bzw. 20 Jahren nochmals um 2 % bzw. 5 % erhöhen werden.

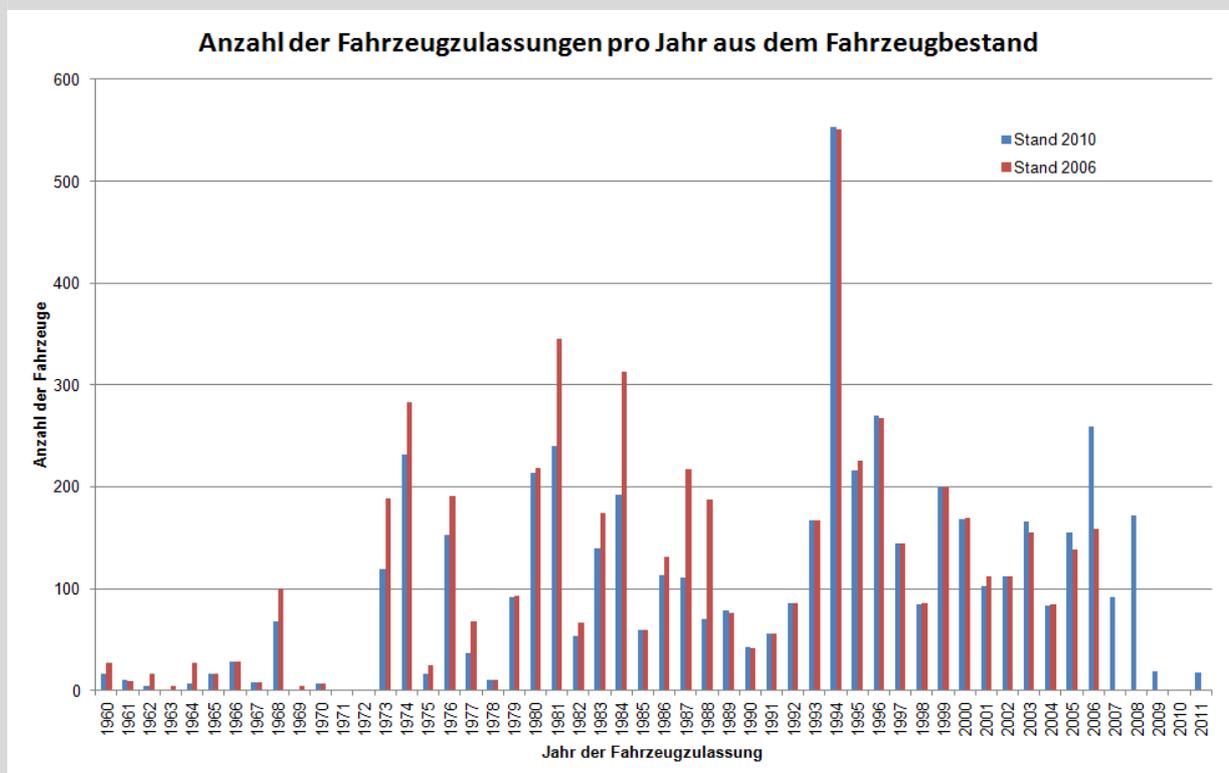
Die Wagen-Kilometer von Straßen- und Stadtbahnen werden sich bis 2030 geringfügig verändern, da mit einem weiteren Anstieg der Plätze pro Straßen-/Stadtbahnwagen ausgegangen wird (Anstieg von 168 auf 172 Plätze in 2020 und 175 Plätze in 2030) [VDV 2009]. Dies erscheint realistisch, da allein im Zeitraum von 2000 bis 2008 das Platzangebot pro Wagen von 144 auf 168 Plätze angestiegen ist. Für die U-Bahnen wird von einer Stagnation der Plätze pro U-Bahnwagen im Zeitraum von 2008 bis 2020 ausgegangen, bis 2030 wird ein geringes Wachstum angenommen. Dementsprechend steigen in diesem Zeitraum die jährlich erbrachten Wagen-Kilometer lediglich in ähnlicher Größenordnung wie die angebotenen Platzkilometer.

Kenngröße	Einheit	2008	2020	Δ 2020/08	2030	Δ 2030/08
<b>Verkehrsleistung</b>	<b>Mio. Pkm</b>	<b>16.125</b>	<b>17.312</b>	<b>7%</b>	<b>18.173</b>	<b>13%</b>
Straßen-/Stadtbahnen	Mio. Pkm	10.890	11.494	6%	12.065	11%
U-Bahnen	Mio. Pkm	5.235	5.819	11%	6.108	17%
<b>Angebotene Platz-km<sup>1)</sup></b>	<b>Mio. Platz-km</b>	<b>85.148</b>	<b>89.354</b>	<b>5%</b>	<b>91.561</b>	<b>8%</b>
Straßen-/Stadtbahnen	Mio. Platz-km	54.489	56.108	3%	57.494	6%
U-Bahnen	Mio. Platz-km	30.659	33.246	8%	34.067	11%
<b>Auslastung</b>	<b>%</b>	<b>18,9%</b>	<b>19,4%</b>	<b>2%</b>	<b>19,8%</b>	<b>5%</b>
Straßen-/Stadtbahnen	%	20,0%	20,5%	2%	21,0%	5%
U-Bahnen	%	17,1%	17,5%	2%	17,9%	5%
<b>Wagen-Kilometer</b>	<b>Mio. Wagen-km</b>	<b>581</b>	<b>607</b>	<b>4%</b>	<b>612</b>	<b>5%</b>
Straßen-/Stadtbahnen	Mio. Wagen-km	324	327	1%	329	1%
U-Bahnen	Mio. Wagen-km	257	280	9%	284	10%
<b>Plätze pro Wagen</b>	<b>Plätze/Wagen</b>	<b>147</b>	<b>147</b>	<b>1%</b>	<b>150</b>	<b>2%</b>
Straßen-/Stadtbahnen	Plätze/Wagen	168	172	2%	175	4%
U-Bahnen	Plätze/Wagen	119	119	0%	120	1%
<sup>1)</sup> Entsprechend der Platz-Definition der VDV-Statistik. <b>Quellen:</b> [VDV 2009]; eigene Berechnungen.						

**Tabelle 12 Entwicklung verkehrlicher Kenngrößen des ÖPNV mit Straßen-, Stadt- und U-Bahnen bis 2030 im Referenzszenario**

### Exkurs: Aktueller Fahrzeugbestand der Straßen-, Stadt- und U-Bahnen und zukünftige Entwicklung

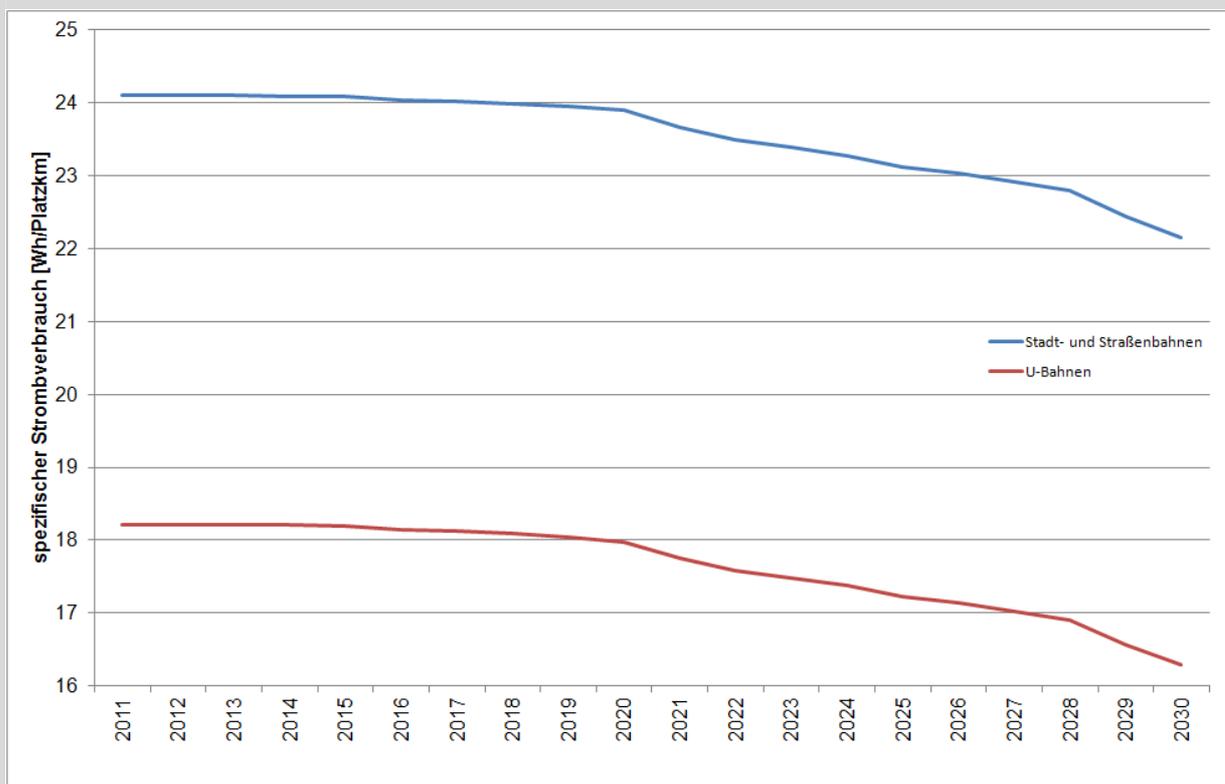
Aus einer im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Erhebung zum Fahrzeugbestand der Stadt- und Straßenbahnen geht deutlich hervor, dass bisher die Fahrzeugbeschaffung innerhalb der Bundesrepublik durch die Förderpolitik der Bundesländer stark zyklisch strukturiert war. Es ist zu erkennen, dass nur in wenigen Fällen Fahrzeuge eingesetzt werden, die älter als 40 Jahre sind. Das Durchschnittsalter der Fahrzeuge liegt bei ca. 20 Jahren. Vergleicht man die Bestandsdaten der Jahre 2006 und 2010 miteinander, stellt man fest, dass viele Fahrzeuge aus den Baujahren zwischen 1973 und 1988 bereits ausgemustert wurden.



**Abbildung 43 Anzahl von elektrisch betriebenen Schienenfahrzeugen im aktuellen Bestand in Deutschland nach Zulassungsjahr sortiert (Stand 2010) [eigene Berechnungen]**

Zur Berechnung des spezifischen Fahrstromverbrauchs pro Platzkilometer wurden folgende Annahmen getroffen: Die angebotene Verkehrsleistung in Platzkilometer pro Jahr in der Bundesrepublik wächst zwischen dem Jahr 2008 bis zum Jahr 2020 um 8 % bei U-Bahnen und 3 % bei Stadt- bzw. Straßenbahnen. Im Zeitraum vom Jahr 2008 bis zum Jahr 2030 wachsen die angebotenen Verkehrsleistungen in Platzkilometer um 11 % bei U-Bahnen und 6 % bei Stadt- bzw. Straßenbahnen. Mit den Annahmen zur Gefäßgröße aus dem vorherigen Abschnitt folgt, dass der Fahrzeugbestand innerhalb der Bundesrepublik auch wachsen muss. Daher reicht es nicht aus, wenn in der Prognose nur so viele Fahrzeuge angeschafft werden

wie ausgemustert werden. Außerdem wird davon ausgegangen, dass Stadt- und Straßenbahnfahrzeuge innerhalb des Lebenszyklus zweimal modernisiert werden. Bei Fahrzeugen, die nicht älter als 20 Jahre sind, wird durch Nachrüstung von Klimaanlage der Energiebedarf ansteigen. Bei Fahrzeugen, die jünger als 10 Jahre sind, wird auf Grund der größeren Restlebensdauer eine HKL-Anlage nachgerüstet, die bedarfsgerecht und damit effizienter arbeitet. Zum Teil werden diese Fahrzeuge auch nachträglich Energiespeicher erhalten. Bei Neufahrzeugen, die nach 2020 zugelassen werden, wird durch optimierte Fahrwerke, Leistungselektronik, Energiespeicher und HKL-Komponenten der Energiebedarf sinken. Damit ergibt sich der in Abbildung 44 dargestellte Verlauf des spezifischen Fahrstromverbrauchs pro Platzkilometer.



**Abbildung 44 Entwicklung des spezifischen Fahrstromverbrauchs durch den Einsatz effizienzsteigernder Maßnahmen und Techniken [eigene Berechnungen]**

Die Graphik zeigt, dass für die Prognose zur Minderung des Fahrstromverbrauchs, die auf fahrzeugseitige Steigerung der Energieeffizienz zurückzuführen ist, aufgrund der diskontinuierlichen Beschaffung ein Umsetzungsverlauf und damit auch eine Veränderung des spezifischen Stromverbrauches mit Stufen zu erwarten ist.

Zur Analyse der Auswirkungen von Energiekostensteigerungen im Referenzszenario werden zusätzlich Angaben zur Entwicklung der Strom und Kraftstoffpreise benötigt. Für dieses Forschungsvorhaben werden die Preisentwicklungen zugrunde gelegt, die in der Studie „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ für das „Referenzszenario“

ermittelt wurden [Prognos et al. 2010]. Die Studie stellte die Grundlage für das im Jahr 2010 veröffentlichte Energiekonzept der Bundesregierung dar. Im „Referenzszenario“ dieser Studie wurden im Gegensatz zu den ebenfalls untersuchten Zielszenarien, die in das Energiekonzept der Bundesregierung direkt eingeflossen sind, keine Laufzeitverlängerungen der Kernkraftwerke berücksichtigt. Allerdings bleiben auch die im Sommer 2011 beschlossene Änderung des Atomgesetzes und der damit verbundene schnellere Ausstieg aus der Kernenergie unberücksichtigt. Das Referenzszenario der Studie „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ beschreibt dennoch die Situation, wie sie sich aktuell darstellt, von allen derzeit publizierten Energieszenarien am Treffendsten.

Grundsätzlich werden die dort beschriebenen Preisentwicklungen auf die derzeit von den ÖPNV-Unternehmen bezahlten Energiepreise gelegt. Die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Interviews haben beispielsweise ergeben, dass aktuell die Strompreise der ÖPNV-Unternehmen für Fahrstrom zwischen 9 €-Cent und 14 €-Cent pro kWh schwanken. Als durchschnittlicher Wert für das Jahr 2008 wurde für das Forschungsvorhaben 11 €-Cent/kWh angenommen. Die Strompreissteigerungen nach dem Referenzszenario der Energiekonzept-Studie betragen gegenüber 2008 zu Preisen von 2008 rund 0,8 €-Cent pro kWh bis 2020 und 1,1 €-Cent pro kWh bis zum Jahr 2030 (siehe Tabelle 13). Damit steigen die Stromkosten bis 2020 um 7 %, bis 2030 um 10 % (Preisbasis 2008). Die Preissteigerungen basieren auf der Entwicklung der Endverbraucherpreise für Industriekunden [Prognos et al. 2010].

Zur Ermittlung der Dieselmotorkraftstoffkosten des Jahres 2008 wurde davon ausgegangen, dass keine Mehrwertsteuer anfällt und die Nettopreise – so die Ergebnisse der Interviews – rund 10 €-Cent pro Liter unter den Tankstellenpreisen der Privatkunden liegen. Für den Preis pro Kilogramm Erdgas im Jahr 2008 wurde bezogen auf den Literpreis von Diesel nochmals um 15 €-Cent niedrigere Kosten angenommen. Auch dies ist ein Ergebnis der Interviews. Die Preisentwicklung für Diesel und Erdgas als Kraftstoff ist wiederum der Energiekonzept-Studie angelehnt. Für Erdgas wird zusätzlich berücksichtigt, dass ab 1.1.2019 auch für Erdgas der volle Energiesteuersatz zu zahlen ist. Damit erhöht sich der Preis pro Kilogramm Erdgas ab 2019 zusätzlich um 22,9 €-Cent. Zur Preisbasis 2008 steigen somit gegenüber 2008 die Kosten für Dieselmotorkraftstoff bis 2020 um 17 % und bis 2030 um 32 % sowie die Erdgaspreise bis 2020 um 44 % und bis 2030 um 91 % (siehe Tabelle 13).

Kenngröße	Einheit	2008	2020	Δ 2020/08	2030	Δ 2030/08
Strom	€ <sub>2008</sub> /kWh	0,110	0,118	7%	0,121	10%
Diesel	€ <sub>2008</sub> /Liter	0,95	1,11	17%	1,25	32%
Erdgas	€ <sub>2008</sub> /kg	0,80	1,15	44%	1,53	91%

**Quellen:** [Prognos et al. 2010]; eigene Berechnungen.

**Tabelle 13 Entwicklung der Preise für Fahrstrom und Kraftstoffe im Zeitraum 2008 bis 2030 auf Preisbasis 2008 im Referenzszenario**

## 5.2 Energieeffizienz im Referenzszenario

In den folgenden beiden Unterkapiteln wird beschrieben, welche Annahmen zur Steigerung der Energieeffizienz im Referenzszenario für Busse mit konventionellem Verbrennungsmotor sowie für Straßen-, Stadt- und U-Bahnen angenommen werden. Für den Busbereich beziehen sich die Angaben auf neu zugelassene Busse. Über eine Modellierung der Durchdringung des Bestandes mit diesen Neufahrzeugen wird dann die Steigerung des gesamten Fahrzeugbestandes ermittelt. Bei den Straßen-, Stadt- und U-Bahnen wird die Modellierung auf Basis pauschalerer Bestandsmodelle durchgeführt. Die ausgewiesenen Minderungen beziehen sich bereits auf den Gesamtbestand.

### 5.2.1 ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren

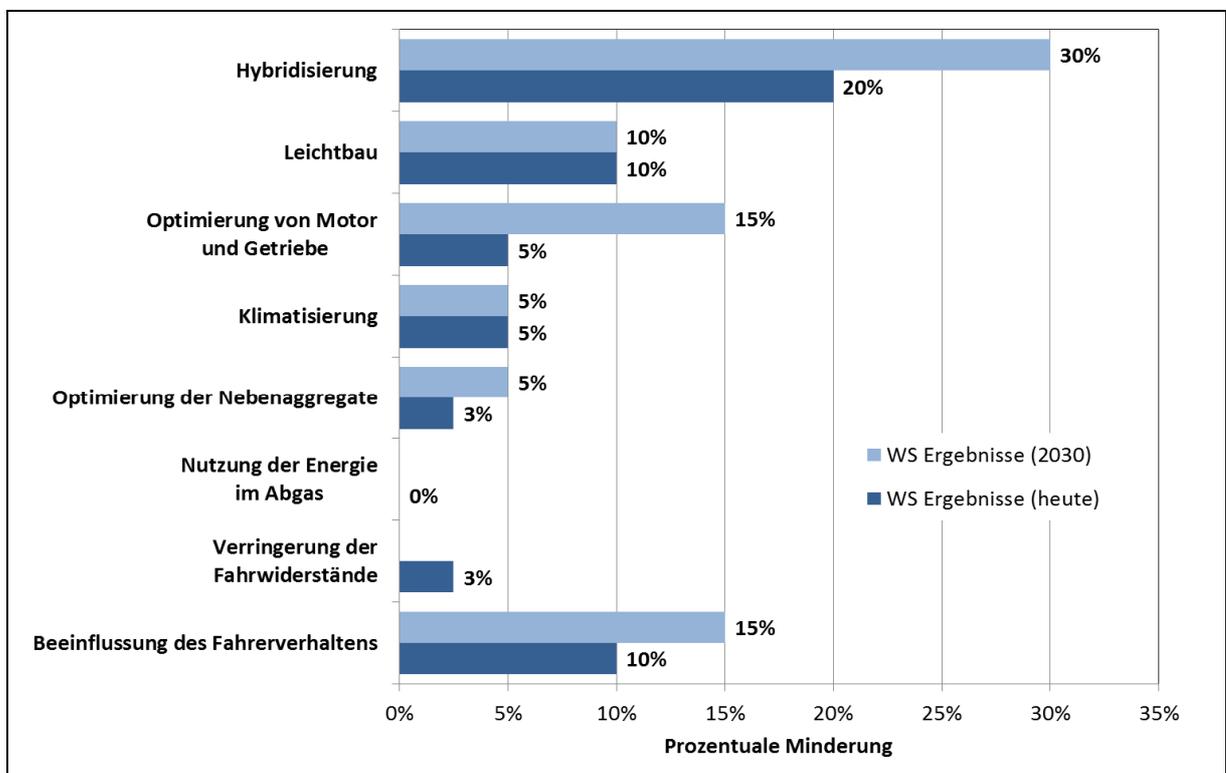
In Kapitel 4.1.1 wurden bereits zahlreiche Maßnahmen vorgestellt, die im Busbereich bis zum Jahr 2030 umgesetzt werden und die Energieeffizienz erhöhen können. Grundsätzlich muss dabei zwischen Fahrzeugen mit konventionellem Dieselmotor, Diesel-Hybridfahrzeugen und Fahrzeugen mit Erdgasmotor unterschieden werden. Zwar spielen weder Erdgasbusse noch Hybridfahrzeuge im Referenzszenario eine große Rolle, dennoch werden auch für diese Fahrzeuge im Folgenden erreichbare Effizienzsteigerungen aufgezeigt.

Grundsätzlich – das hat der Expertenworkshop mit Busherstellern im Rahmen des Forschungsvorhabens gezeigt [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011] - sind die wesentlichen Ansatzpunkte zur Reduzierung des Energieverbrauchs von konventionellen Linienbussen mit Dieselmotor eine weitere Optimierung von Motor und Getriebe, eine Reduzierung des Busgewichtes (Leichtbau) und die Beeinflussung des Fahrerverhaltens in energiesparender Fahrweise (siehe Abbildung 45). Letzteres setzt aber voraus, dass einerseits die Fahrer durch technische Hilfen (z. B. automatische Beschleunigung) oder andererseits optimierte Fahrwege (z. B. auf ÖPNV abgestimmte Ampelschaltungen) unterstützt werden. Die energetische Optimierung der Nebenverbraucher, energieeffizientere Klimatisierung sowie die Verringerung der Fahrwiderstände – so die Einschätzung der Experten – werden zu deutlich geringeren Kraftstoffeinsparungen führen. Insbesondere bei den Nebenaggregaten wurden die erzielbaren Einsparungen als Maximaleinsparungen unter optimalen Bedingungen angesehen. Die Nutzung der Abwärme des Abgases kann in den nächsten 20 Jahren nicht zur Senkung des Energieverbrauches von Bussen herangezogen werden.

Die Diskussionen im Rahmen des Experten-Workshops haben zudem gezeigt, dass die aufgeführten Kraftstoffeinsparungen Maximalpotentiale darstellen, die nur erschlossen werden können, wenn die zukünftigen Forschungsaktivitäten auf diese Themen konzentriert werden. Heutzutage hat die Ausrichtung der Forschung z. B. auf die Senkung der Luftschadstoffemissionen dazu geführt, dass mögliche Potentiale im Bereich der Verbrauchsminderung nicht erschlossen wurden. Weiterhin ist darauf hinzuweisen, dass die Minderungen nicht additiv wirken. Die aufgeführten Maßnahmen beeinflussen sich gegenseitig, so dass in der Kombination der Maßnahmen die Minderungen geringer ausfallen werden als die Summe der Einzelwirkungen. Zudem ist zu beachten, dass einzelne

Maßnahmen trotz Verbrauchsreduktion voraussichtlich nicht oder nur eingeschränkt umgesetzt werden, weil diese zu verringerten Lebensdauern der Komponenten oder zu Komforteinbußen führen können (z. B. Einsatz von Leichtbaumaterialien, siehe hierzu auch Kapitel 4.1.1).

Zudem zeigt die Abbildung 45 aber auch, dass die Hybridisierung im Vergleich zur Optimierung des konventionellen Dieselmotors schon kurzfristig erhebliche Einsparungen ermöglicht. Diese Potentiale werden allerdings im Referenzszenario, aufgrund fehlender staatlicher Förderprogramme, nicht ausgenutzt. Weiterhin wurde im Rahmen des Workshops von den Experten angemerkt, dass aktuell der Trend weiter fortsetzen wird, dass steigender Ausstattungsstandards der Busse (z. B. Bildschirme für die Fahrgastinformation, angebotenes W-Lan) und Klimatisierung der Busse den erschließbaren Minderungspotentialen entgegen laufen.



**Abbildung 45 Heutige und bis 2030 realisierbare Energieeffizienzpotentiale verschiedener Maßnahmen bei den Linienbussen nach Schätzung der Experten im Vergleich zum heutigen Dieselbus (bezogen auf den Verbrauch in l/100 km) [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]**

Die Diskussionen im Rahmen der Workshops haben aber auch gezeigt, dass sich ohne große Aufwendungen der Bushersteller für Forschung und Entwicklung bis 2020 und 2030 im Vergleich zu heute weitere Effizienzpotentiale erschließen lassen. Für den Linienbus mit Dieselmotor sind die Beiträge der einzelnen Maßnahmenbausteine in Tabelle 14 aufgeführt.

Schlussbericht

Neben den im Referenzszenario realisierbaren Energieeinsparungen für neu zugelassene Dieselbusse der Jahre 2020 und 2030 bezogen auf den Gesamtverbrauch der Busse in l/100 km sind in der Tabelle für alle Maßnahmenbereiche auch die prozentualen Anteile ausgewiesen, die von den theoretischen Maximalpotentialen, wie sie in Abbildung 45 dargestellt sind, erschlossen werden. Dabei wird für das Jahr 2020 das heute vorhandene maximale Einsparpotential zugrunde gelegt. Tabelle 14 zeigt, dass im Referenzszenario sowohl für 2020 als auch für 2030 die maximal möglichen Energieeinsparpotentiale nur zu geringen Anteilen ausgeschöpft werden. Lediglich das mögliche Potential zur energetischen Optimierung von Motor und Getriebe wird zu 50 % ausgenutzt. Aufgrund der geringen Ausschöpfung der Maximalpotentiale kann davon ausgegangen werden, dass sich die neuen, energieeffizienteren Busse im Referenzszenario im Vergleich zu heute kaum verteuern werden.

Maßnahmenbereich	Referenzszenario	
	Realisierter Anteil des Maximalpotentials	Minderung bzw. Mehrverbrauch <sup>2)</sup>
<b>Maßnahmenwirkung 2020</b>		
Energetische Optimierung von Motor und Getriebe	50,0 %	-2,5 %
Techn. Maßnahmen zur Beeinflussung des Fahrerverhaltens	12,5 %	-1,25 %
Verbesserung der Energieeffizienz der Klimaanlage	25,0 %	-1,25 %
Energetische Optimierung der Nebenaggregate	0,0 %	-0,0 %
Mehrverbrauch durch gegenläufige Entwicklungen		+2,5 %
<b>Gesamtwirkung<sup>1)</sup></b>		<b>-2,6 %</b>
<b>Maßnahmenwirkung 2030</b>		
Energetische Optimierung von Motor und Getriebe	50,0 %	-7,5 %
Techn. Maßnahmen zur Beeinflussung des Fahrerverhaltens	12,5 %	-1,9 %
Verbesserung der Energieeffizienz der Klimaanlage	25,0 %	-1,25 %
Energetische Optimierung der Nebenaggregate	25,0 %	-1,25 %
Mehrverbrauch durch gegenläufige Entwicklungen		+5,0%
<b>Gesamtwirkung<sup>1)</sup></b>		<b>-7,1 %</b>
<sup>1)</sup> Die Gesamtwirkung der Einzelmaßnahmen ist nicht die Summe der Wirkungen der Einzelmaßnahmen. Die Gesamtwirkung ergibt sich durch Multiplikation der Einsparungen bzw. Mehrverbräuche. <sup>2)</sup> Die Verbrauchsminderung und der Mehrverbrauch beziehen sich auf den Gesamtverbrauch der Fahrzeuge in l/100 km. <b>Quellen:</b> [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]; eigene Berechnungen.		

**Tabelle 14 Kraftstoffeinsparungen bzw. Mehrverbrauch einzelner Maßnahmen für neu zugelassene Linienbusse in den Jahren 2020 und 2030 im Vergleich zu heutigen Dieselnissen (bezogen auf den Verbrauch in l/100 km) im Referenzszenario**

Weiterhin enthält die Tabelle 14 Abschätzungen zu den Mehrverbräuchen aufgrund zunehmender Klimatisierung der Busse und Ausstattung der Busse mit mehr Fahrgastkomfort. Im Vergleich zu 2008 wird aufgrund dieser Ausstattungsmerkmale im Jahr 2020 mit einer Zunahme des Verbrauchs um rund 2,5 %, im Jahr 2030 um rund 5 % gegenüber heute gerechnet (bezogen auf den Verbrauch in l/100 km). Die Gesamtwirkung der Einsparpotentiale sowie des Mehrverbrauchs sind ebenfalls in der Tabelle 14 aufgeführt. Insgesamt ergeben sich für neu zugelassene Dieselsebussen für den ÖPNV im Jahr 2020 im Referenzszenario Kraftstoffeinsparungen von rund 2,6 %, im Jahr 2030 von rund 7,1 %. Bei der Ermittlung der Gesamtwirkung wurde berücksichtigt, dass die Wirkungen der Einzelmaßnahmen nicht additiv sind, da bereits eingesparte Kraftstoffmengen durch eine zweite Maßnahme nicht nochmals eingespart werden können. Die Gesamtwirkung ergibt sich vielmehr durch die Multiplikation der erzielten Einsparungen und Mehrverbräuche der Einzelmaßnahmen.

Tabelle 15 zeigt die Gesamt-Kraftstoffeinsparungen nicht nur für Linienbusse mit Dieselmotor, sondern auch für Linienbusse mit Erdgasmotor und für Diesel-Hybridbusse, wie sie im Referenzszenario verwendet werden. Für Linienbusse mit Erdgasmotor wird im Vergleich zum Dieselbus von leicht niedrigeren Einsparpotentials ausgegangen. Diesel-Hybridbusse weisen bereits heute Kraftstoffeinsparungen von 20 % aus. Für neu zugelassene Hybridbusse im Jahr 2020 wird von einer Einsparung von 25 %, im Jahr 2030 von 30 % im Vergleich zu heutigen Diesel-Bussen ausgegangen (siehe Tabelle 15). Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, können diese höheren Effizienzen bei Hybridbussen nur dadurch erschlossen werden, in dem wie bei konventionellen Dieselsebussen Optimierungen von Motoren, Getriebe oder Nebenaggregate realisiert werden.<sup>6</sup>

Fahrzeugkonzept	Neuzulassungen 2020	Neuzulassungen 2030
	%	%
Busse mit Dieselmotor	- 2,6 %	- 7,1 %
Linienbusse mit Erdgasmotor	- 2,0 %	- 5,0 %
Diesel-Hybridbusse	- 25,0 %	- 30,0 %
<b>Quellen:</b> [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]; eigene Berechnungen.		

**Tabelle 15 Kraftstoffeinsparungen für in den Jahren 2020 und 2030 neu zugelassene Linienbusse mit Diesel- und Erdgasmotor sowie Diesel-Hybridbusse im Vergleich zu heutigen Diesel- bzw. Erdgasbussen (bezogen auf den Verbrauch in l/100 km) im Referenzszenario**

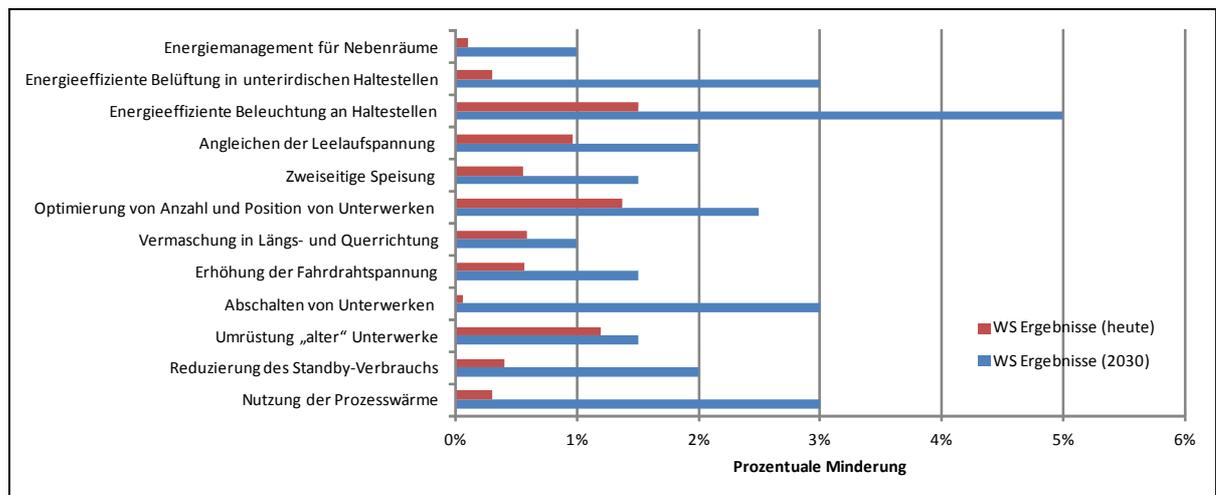
<sup>6</sup> Für O-Busse, die eigentlich in den Bereich des elektrisch betriebenen ÖPNV fallen, werden im Referenzszenario (gilt aber auch für das Szenario Energieeffizienz und erneuerbare Energien) keine speziellen Annahmen zur Steigerung der Energieeffizienz getroffen.

Für die Berechnung der Auswirkungen auf die Gesamtenergieeffizienz der Busflotte werden diese für das Referenzszenario ermittelten Einsparungen in das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Bestandsmodell eingespeist. Aufgrund der Durchdringung des Bestandes mit neu zugelassenen Fahrzeugen (siehe Abbildung 42), die die in Tabelle 15 aufgeführten Effizienzsteigerungen erfüllen, ergeben sich dann die durchschnittlichen Energieverbräuche der Gesamt-ÖPNV-Busflotte in Deutschland in den Jahren 2020 und 2030. Die Ergebnisse dieser Modellierung für den Energieverbrauch des ÖPNV werden in Kapitel 5.4.1 vorgestellt.

### **5.2.2 Elektrisch betriebener ÖPNV**

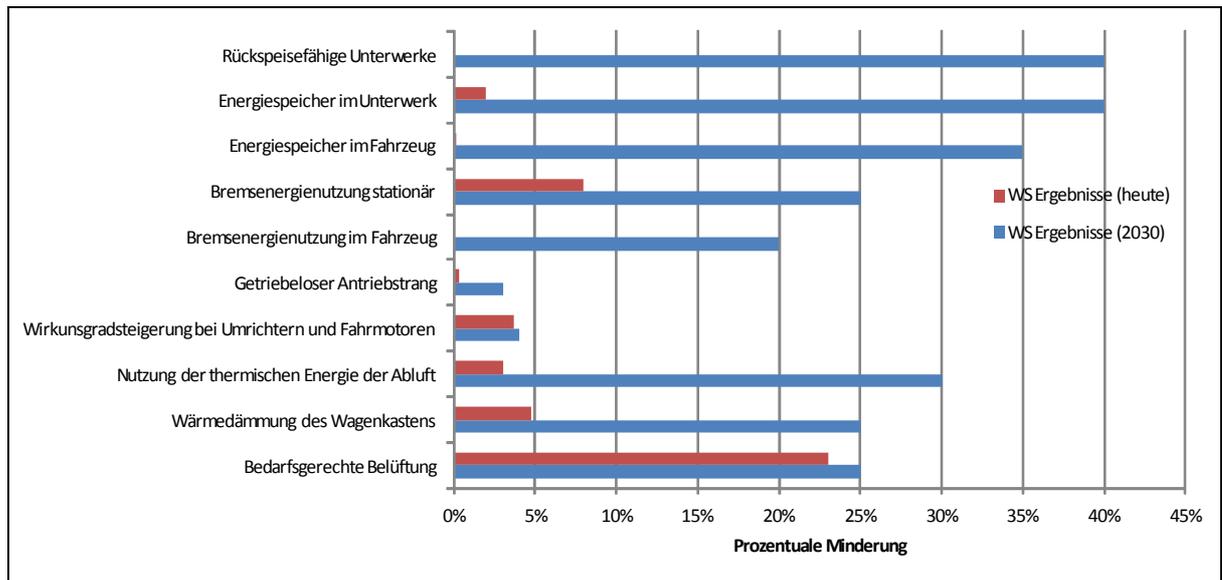
Wie in Kapitel 4.1.2 dargestellt, wurden viele Einzelmaßnahmen auf ihr Einsparpotential bis zum Jahr 2030 untersucht. Im Referenzszenario wird nun dargestellt, wie sich die Entwicklung ohne zusätzliche Fördermittel in diesem Bereich des ÖPNV gestalten wird. Dazu werden im Folgenden die Ergebnisse aus den Interviews und dem Expertenworkshop im Rahmen dieses Projekts ausgewertet. Sie dienen als Grundlage für die Entwicklung des Referenzszenarios. Dazu werden die Fahrzeug- und Infrastrukturmaßnahmen getrennt betrachtet. Die jeweils dargestellten Potentiale im Jahr 2030 stellen Maximalwerte da. Diese sind nur erreichbar wenn die Maßnahme sehr stark in den Fokus der Forschung kommt und flächendeckend eingesetzt wird. Die aktuellen prozentualen Minderungen basieren auf Minderungen, die bereits erzielt wurden und dem Umsetzungsgrad. Die prozentualen Angaben beziehen sich auf den Fahrstromverbrauch ab Unterwerk bei Infrastrukturmaßnahmen und bei den fahrzeugseitigen Maßnahmen auf den Fahrstromverbrauch der Fahrzeuge.

Abbildung 46 zeigt die heutigen und die bis 2030 realisierbaren Energieeffizienzpotentiale. Die größten Potentiale der hier aufgeführten Infrastruktur-Maßnahmen werden der energieeffizienten Beleuchtung von Haltestellen, der Nutzung von Prozesswärme, dem Abschalten von Unterwerken, und der energieeffizienten Belüftung von unterirdischen Haltestellen zugeordnet. Die Potentiale der anderen Maßnahmen werden von den Experten zwischen ein bis zwei Prozent eingeschätzt. Dabei sind die Potentiale der energieeffizienten Beleuchtung von Haltestellen, das Angleichen der Leerlaufspannung und Optimierung der Unterwerke hinsichtlich ihrer Position und Anzahl sogar schon nennenswert ausgeschöpft.



**Abbildung 46 Heutige und bis 2030 realisierbare Energieeffizienzpotentiale verschiedener Maßnahmen an Anlagen im elektrisch betriebenen ÖPNV nach Schätzung der Experten im Vergleich zum heutigen Stand [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]**

Die Potentiale der in Abbildung 47 aufgeführten fahrzeugseitigen Maßnahmen beziehen sich auf den Fahrstromverbrauch der Fahrzeuge und auf den Fahrstromverbrauch ab Unterwerk. Die größten Potentiale, zwischen 35 % und 40 %, entfallen auf rückspeisefähige Unterwerke und Energiespeicher. Diesen Maßnahmen ist aber auch gemein, dass sie bisher kaum umgesetzt werden. Potentiale zur Fahrstromverbrauchsminderung zwischen 20 % und 35 % werden die Maßnahmen stationäre Bremsenergienutzung, Bremsenergienutzung im Fahrzeug, der Abwärmenutzung beim Luftaustausch im Fahrzeug, der bedarfsgerechten Lüftung, der Wärmedämmung des Wagenkastens von den Experten zugeordnet. Davon ist die bedarfsgerechte Steuerung der Lüftung die einzige Maßnahme aus dieser Gruppe, die starke Verbreitung findet. Den Wirkungsgradsteigerungen bei Umrichtern und Fahrmotoren wird nach heutiger Einschätzung kaum noch Einsparpotential zugewiesen. Und seitdem IGBT-Umrichter und Asynchronmaschinen bei den Traktionsmotoren als Stand der Technik gelten, ist es nur eine Frage der Zeit, bis dieses Potential flächendeckend genutzt wird. Das Potential das dem Einsatz von getriebelosen Antriebssträngen inne wohnt, wird bisher kaum genutzt.



**Abbildung 47 Heutige und bis 2030 realisierbare Energieeffizienzpotentiale verschiedener Maßnahmen an Fahrzeugen im elektrisch betriebenen ÖPNV nach Schätzung der Experten im Vergleich zum heutigen Stand [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]**

Aus den Interviews und dem Workshop geht hervor, dass die meisten Verkehrsunternehmen kaum finanzielle Mittel zur Verfügung haben, um neben planmäßigen Investitionen in die Energieeffizienz ihrer Fahrzeugflotte oder der Infrastruktur zu investieren. Ohne Fördermaßnahmen kommen Innovationen nur bei Fahrzeugneubeschaffung zum Einsatz. Bisher zeigen sich Zyklen in der Fahrzeugbeschaffung und Infrastrukturerneuerung, die nicht nur durch die jeweiligen Lebensdauern, sondern auch durch Förderprogramme von Bund und Ländern geprägt sind. Insbesondere der Schienenpersonennahverkehr ist davon betroffen, da hier die Fahrzeuge durchschnittlich 30 bis 35 Jahre im Einsatz sind und dann im Rahmen von Übergangsphasen mit einer Dauer von ca. 5 Jahren getauscht werden.

Erschwerend kommt hinzu, dass die Einkaufspolitik vieler Verkehrsunternehmen dadurch geprägt ist, dass bevorzugt günstige Fahrzeuge angeschafft werden müssen. Dieser möglichst geringe Anschaffungspreis zwingt die Fahrzeughersteller in Verbindung mit dem Wunsch nach höheren Komfortansprüchen der Fahrgäste möglichst einfache und bewährte Technik einzusetzen. Das hindert den Einsatz und die Verbreitung innovativer und energiesparsamer Techniken. Abhilfe sollte hier die Berücksichtigung der Lebenszykluskosten der Schienenfahrzeuge bei der Beschaffung schaffen. Genauer dazu kann dem Kapitel 4.1.2.3 entnommen werden.

Die Entwicklungsgeschwindigkeit im Bereich der Halbleiter der Leistungselektronik in den Fahrzeugen hat dazu geführt, dass die Ersatzteilversorgung nicht mehr über die volle Fahrzeuglebensdauer gewährleistet ist. In der Vergangenheit mussten dadurch funktionsfähige ältere durch modernere und effizientere Baugruppen und Techniken ersetzt werden, um im Reparaturfall über Ersatz zu verfügen. Solche Entwicklungen befördern das Streben nach Energieeffizienz, ohne dass neue Regellungen und Normen in Kraft traten.

Schlussbericht

Zudem ist die neue Leistungselektronik kleiner und leichter als die Vorgänger. Der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs konnte so von ca. 63 % auf 85 % gesteigert werden.

Die zum System gehörende Infrastruktur, insbesondere unterirdische Haltestellen und die Fahrzeugabstellung werden Effizienzmaßnahmen der allgemeinen Gebäudetechnik mit vollziehen. Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz der Telematik zur bedarfsgerechten Regelung von Heizung und Lüftung. Die Erschließung dieser Effizienzpotentiale bedarf nur dann spezieller Fördermaßnahmen, wenn Effizienzsteigerungen in diesen Bereichen gewünscht sind, die oberhalb dessen liegen, was durch Maßnahmen nach dem Stand der Technik möglich ist.

Mit dem Erneuerungsprofil der Fahrzeuge aus dem Exkurs in Kapitel 5.1 und dem Erhöhen der Fahrdraht-Spannung nach dem Tausch „alter“ Unterwerke, der teilweisen Reduzierung des sinnlosen Verbrauchs während der Abstellung und dem Einsatz von Neufahrzeugen, die über bedarfsgerechte Lüftungen und in seltenen Fällen über Energiespeicher verfügen werden die in Tabelle 16 quantitativ aufgelistete Verbrauchsminderung erreicht.

Fahrzeugkonzept	Bestand 2020	Bestand 2030
	%	%
<b>Minderung gegenüber 2008</b>		
Straßen- und Stadtbahnen	- 2,7 %	-5,4 %
U-Bahnen	-0,8 %	-2,8 %
<b>Minderung gegenüber 2010</b>		
Straßen- und Stadtbahnen	- 2,8 %	-5,5 %
U-Bahnen	-2,0 %	-4,0 %
<b>Quellen:</b> [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]; eigene Berechnungen.		

**Tabelle 16 Stromeinsparungen der gesamten Flotte an Straßen, Stadt- und U-Bahnen in Deutschland in den Jahren 2020 und 2030 im Referenzszenario im Vergleich zu 2008 bzw. 2010**

## **5.3 Erneuerbare Energien im Referenzszenario**

In den folgenden beiden Unterkapiteln wird beschrieben, welche Annahmen zum Einsatz von erneuerbaren Energien beim ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren und beim elektrisch betriebenen ÖPNV im Referenzszenario getroffen wurden.

### **5.3.1 ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren**

Im Referenzszenario kommen im ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren ausschließlich Diesel und Erdgas zum Einsatz, wobei Erdgas lediglich eine untergeordnete Rolle spielt. Entsprechend dem Grundprinzip des Referenzszenarios betreiben die ÖPNV-Unternehmen keine aktive Politik, um den Anteil erneuerbarer Energie auszubauen. Konkret bedeutet dies, dass weder Biokraftstoff noch Biogas in Reinform bei den ÖPNV-Unternehmen zum Einsatz kommen wird. Beide Varianten würden zu deutlichen Mehrkosten gegenüber konventionellem Diesel verursachen (+50 % in 2020 und +35 % in 2030) [Öko-Institut et al. 2011].

Für das Referenzszenario wird daher lediglich unterstellt, dass Biokraftstoff dem konventionellen Diesel beigemischt wird. Es wird angenommen, dass der energiebezogene Biokraftstoffanteil von 7 % im Jahr 2011 auf 13 % im Jahr 2020 steigt [ifeu 2010]. Nach 2020 bleibt die Beimischungsquote konstant.

Neben dem Anteil der beigemischten Biokraftstoffe an den Kraftstoffen ist auch der tatsächliche Emissionsvorteil der beigemischten Biokraftstoffe gegenüber den konventionellen fossilen Kraftstoffen entscheidend für die Treibhausgasminderung des gemischten Diesels. Für das Referenzszenario wird davon ausgegangen, dass die Anforderungen der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung mindestens eingehalten werden (siehe auch Kapitel 4.2.1) [Biokraft-NachV]. Entsprechend dem Verkehrsemissionsmodell TREMOD steigt für die beigemischten Biokraftstoffe die Treibhausgasminderung von 50 % im Jahr 2008 auf 60 % im Jahr 2018. Danach wird von einer konstanten Minderung ausgegangen [ifeu 2010].

Für Erdgas wird entsprechend der Selbstverpflichtung der Gaswirtschaft ausgegangen, dass im Jahr 2020 dem fossilen Erdgas rund 20 % Biomethan beigemischt wird. Die Treibhausgasminderung des Biomethans bezogen auf ein MJ gegenüber Dieselkraftstoff beträgt 30 % [Dena 2010].

### **5.3.2 Elektrisch betriebener ÖPNV**

Für den Fahrstrom des elektrisch betriebenen Stroma wird für das Referenzszenario analog zu den Kraftstoffen davon ausgegangen, dass die ÖPNV-Unternehmen nicht aktiv Strom aus erneuerbaren Energiequellen einkaufen. Die ÖPNV-Unternehmen werden vielmehr von den Verbesserungen profitieren, die sich durch die Ausbauziele erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung in Deutschland gibt.

Schlussbericht

Für das Referenzszenario wird unterstellt, dass die geplanten Ausbauziele der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung (2020: Anteil von 35 %, 2030: Anteil von 50 %) möglichst erreicht wird. Da die ÖPNV-Unternehmen ihre Stromdienstleister nicht darauf drängen, möglichst klimafreundlich Strom zu produzieren, muss davon ausgegangen werden, dass trotz der hohen Anteile erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung die konventionellen Kraftwerke nach ökonomischen Kriterien betrieben werden. Dies bedeutet, dass beispielsweise kostengünstige Kohlekraftwerke zum Einsatz kommen. Ein Stromszenario, das diesen Vorgaben gut entspricht, ist das Referenzszenario in der Studie „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ [Prognos et al. 2010]. Die Anteile erneuerbarer Energie liegen in diesem Ziel mit 34 % in 2020 über dem geforderten Ziel in Deutschland, mit 45 % in 2030 leicht unter dem geforderten Ziel.

Auch wenn das Ausbauziel für erneuerbare Energien in 2030 nicht ganz erreicht wird, wird das Referenzszenario der Energiekonzeptstudie auch dem Referenzszenario dieses Forschungsvorhabens zugrunde gelegt. Ein wichtiger Grund hierfür ist, dass für diesen Ausbaupfad eine genau passende Preisentwicklung für den Strompreis vorliegt (siehe Kapitel 5.1). Zudem zeigen Vergleiche mit eigenen Berechnungen im Rahmen des Projektes OPTUM (Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen) auf Basis eines Kraftwerksmodells, dass auch mit dem Erreichen des Ausbauziels sich nicht zwangsläufig niedrigere Emissionsfaktoren pro verbrauchte Kilowattstunde Strom als in der Grundlagenstudie zum Energiekonzept der Bundesregierung ermittelt ergeben müssen [Öko-Institut 2011]. Tabelle 17 zeigt den Vergleich der Emissionsfaktoren des Referenzszenarios des Energiekonzeptes und der OPTUM-Studie. Die ausgewiesenen CO<sub>2</sub>- und Treibhausgasemissionsfaktoren (berechnet als CO<sub>2</sub>-Äquivalente) berücksichtigen bereits die durch die Verteilung von Strom entstandenen Verluste sowie Emissionen durch die Förderung, die Herstellung und den Transport der in den Kraftwerken verbrannten Energieträger. Die Emissionsfaktoren des Referenzszenarios des Energiekonzeptes wurden in der Form, wie sie in der Tabelle 17 ausgewiesen sind, den Berechnungen dieses Referenzszenarios zugrunde gelegt.

Größe	Einheit	2020		2030	
		Referenzszenario Energiekonzept	Projekt OPTUM	Referenzszenario Energiekonzept	Projekt OPTUM
Anteil erneuerbare Energien	%	34 %	44 %	45 %	51 %
CO <sub>2</sub> -Emissionen	g CO <sub>2</sub> /kWh	541	535	410	502
CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen	g CO <sub>2e</sub> /kWh	566	564	432	527

**Quellen:** [Prognos et al. 2010]; [Öko-Institut 2011]; [GEMIS 4.7]; eigene Berechnungen.

**Tabelle 17 CO<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionsfaktoren für Strom in den Jahren 2020 und 2030 einschließlich Verteilungsverluste**

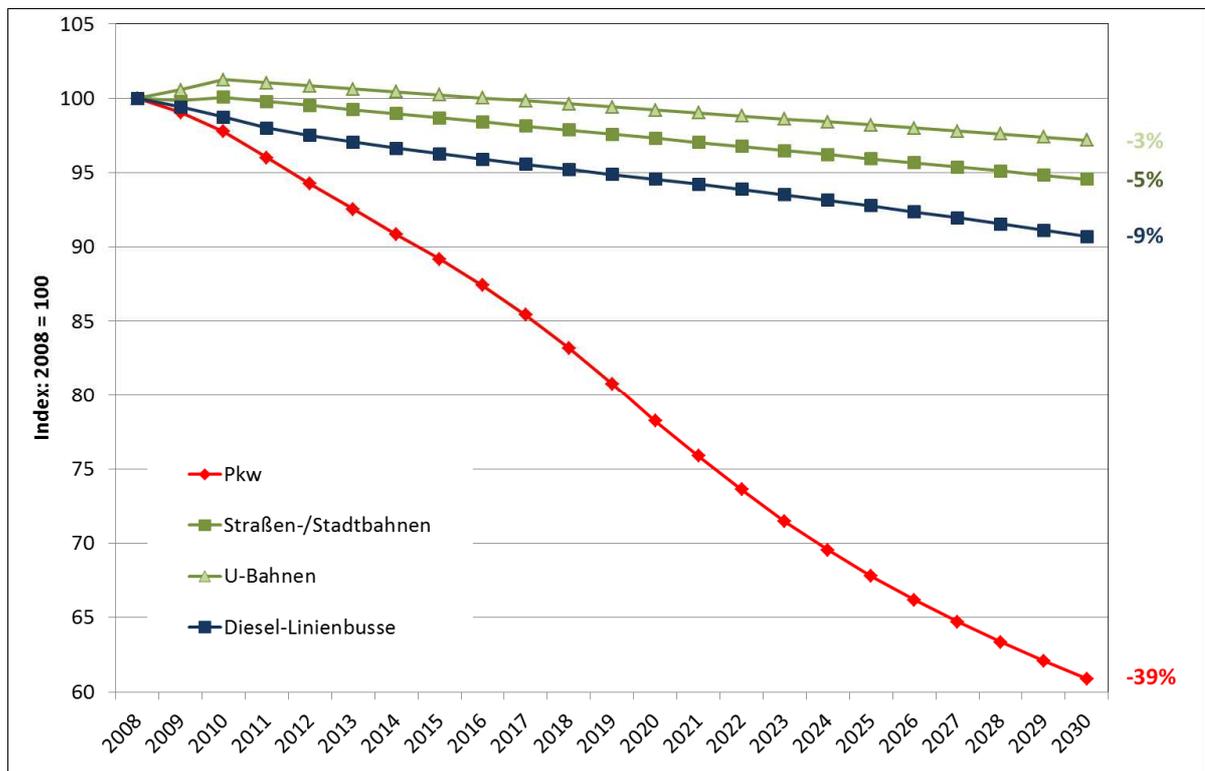
## **5.4 Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Energiekosten im Referenzszenario bis 2030**

### **5.4.1 Energieverbrauch**

Der spezifische Endenergieverbrauch pro Platz-Kilometer ist die beste Größe, die Entwicklung der Energieeffizienz der verschiedenen Verkehrsmittel des ÖPNV untereinander und mit dem Pkw-Verkehr zu vergleichen. Wie in Kapitel 3.1 bereits ausgeführt, ist diese Größe zum einen unabhängig von der Auslastung der Verkehrsmittel, zum anderen werden Verschiebungen hin zu größeren Fahrzeugen mit entsprechend höheren Verbräuchen, aber auch höherem Platzangebot adäquat berücksichtigt.

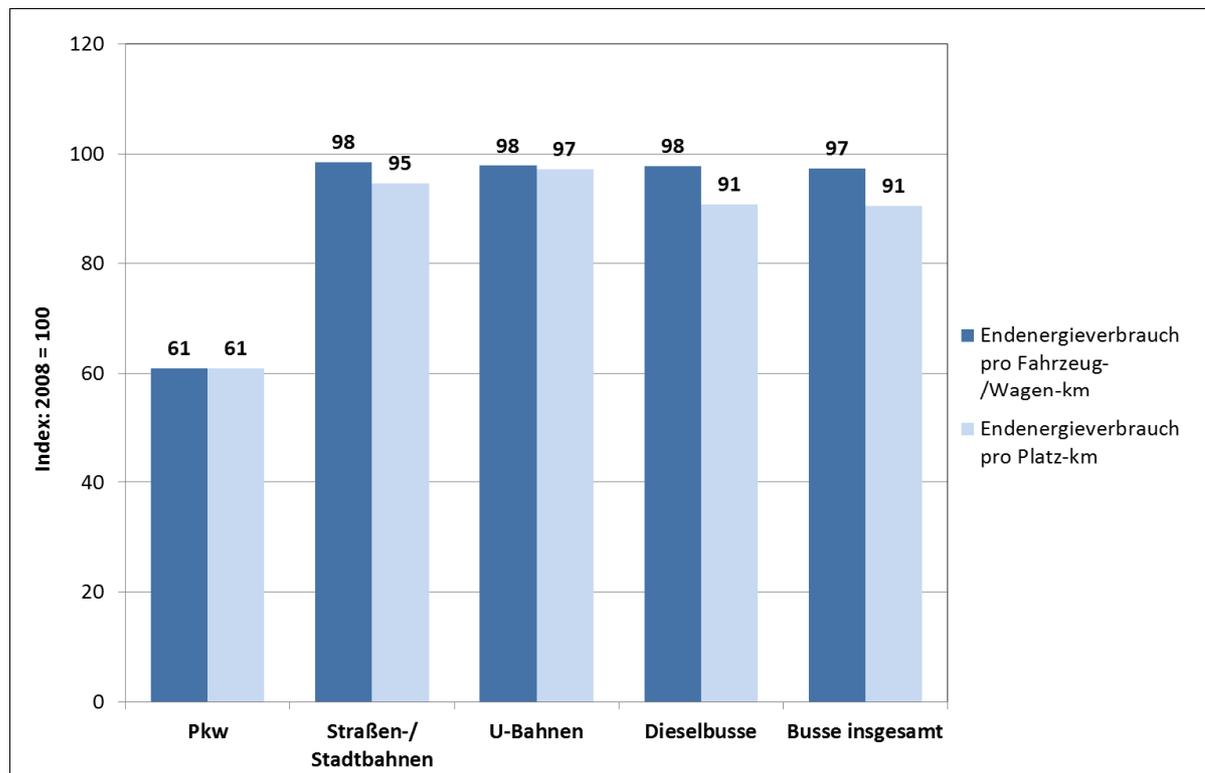
Abbildung 48 zeigt daher die Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km für Straßen-/Stadtbahnen, U-Bahnen sowie Linienbusse mit Dieselmotor für den Zeitraum 2008 bis 2030 im Referenzszenario. Die Daten beziehen sich dabei auf den Durchschnitt aller Fahrzeuge des jeweiligen ÖPNV-Verkehrsmittels (Bestand) und nicht auf die neu zugelassenen Fahrzeuge und sind auf das Jahr 2008 normiert (2008 = 100). Aus Gründen der Übersichtlichkeit und deren geringen Bedeutung für den ÖPNV im Referenzszenario wurde auf die Darstellung der Entwicklung der spezifischen Energieverbräuche der Hybrid-, Erdgas- und O-Busse verzichtet. Die ebenfalls in der Abbildung dargestellte Entwicklung der Pkw wurde direkt vom Verkehrsemissionsmodell TREMOD übernommen [Richter 2011a].

Die Entwicklung im Pkw-Verkehr berücksichtigt die Einhaltung der EU-Flottengrenzwerte für Pkw für das Jahr 2015 und geht bis 2030 von einer durchschnittlichen jährlichen Minderung des Kraftstoffverbrauchs der Neuwagenflotte von 1,5 % aus [ifeu 2010]. Damit liegen die Effizienzgewinne der Pkw-Neuwagen deutlich über denen des ÖPNV, wie sie im Referenzszenario definiert wurden. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die Reduktion des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km im Durchschnitt aller Fahrzeuge im Bestand beim Pkw mit 22 % in 2020 bzw. 39 % in 2030 deutlich größer ausfällt als bei den Verkehrsmitteln des ÖPNV. Deren Minderungen liegen zwischen 1 % (2020) bzw. 3 % (2030) bei den U-Bahnen und 5 % (2020) bzw. 9 % (2030) bei den Diesel-Linienbussen. Grundsätzlich zeigt diese Gegenüberstellung, dass zwar der ÖPNV im Referenzszenario Effizienzgewinne verbuchen kann, dass diese aber bezogen auf den Gesamtbestand eher gering ausfallen.



**Abbildung 48 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km für ausgewählte Verkehrsmittel des ÖPNV und für den Pkw-Verkehr 2008 bis 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen]**

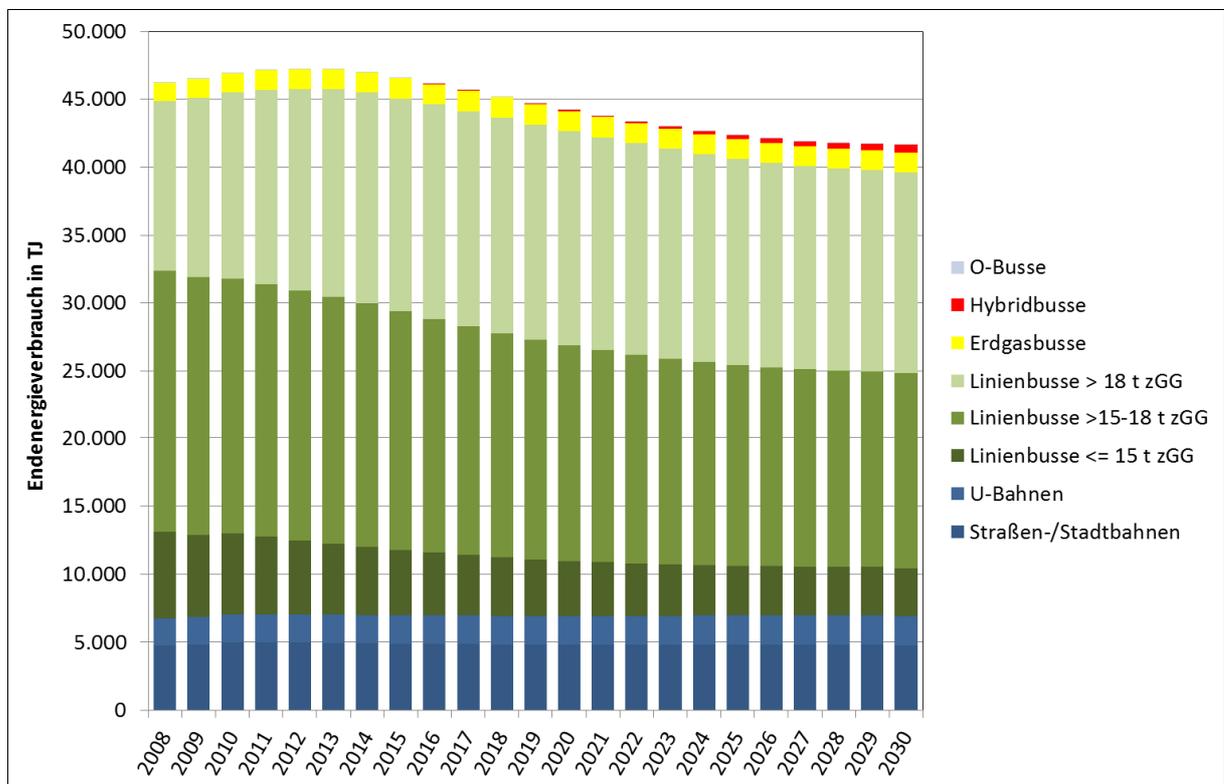
Der Effizienzgewinn beim Busverkehr pro Platz-km liegt überraschender Weise über der Minderung, die für Neufahrzeuge pro Fahrzeug-km im Jahr 2030 unterstellt wurde (siehe Tabelle 15). Wie Abbildung 49 zeigt, fallen die Effizienzgewinne pro Fahrzeug-km für den Bestand der Diesellinienbusse auch geringer aus als die angenommenen Effizienzgewinne für Neufahrzeuge. Beim spezifischen Endenergieverbrauch pro Platz-km kommt aber zum Tragen, dass sich der Bestand der Diesellinienbusse im Referenzszenario in Richtung großer Busse mit mehr Plätzen verschiebt. Damit steigt die durchschnittliche Zahl der Plätze pro Bus, während gleichzeitig der Kraftstoffverbrauch zum Anstieg der Plätze unterproportional ansteigt. Die Folge ist, dass bei den Bussen der Effizienzgewinn pro Platz-km deutlich über dem pro Fahrzeug-km liegt. Wie Abbildung 49 ebenfalls zeigt, tritt dies auch bei Straßen-/Stadtbahnen und U-Bahnen auf. Allerdings ist dieser Effekt nicht so stark ausgeprägt wie bei den Bussen. Beim Pkw-Verkehr wurde von keiner Erhöhung des Platzangebots pro Pkw ausgegangen, weshalb sich beide Energieverbrauchswerte in gleichem Maße reduzieren.



**Abbildung 49 Spezifischer Endenergieverbrauch pro Fahrzeug- bzw. Wagen-km sowie pro Platz-km für verschiedene Verkehrsmittel im ÖPNV und des Pkw-Verkehrs 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen]**

Insgesamt führen die leichten Verbesserungen der Energieeffizienz auch im Gesamtenergieverbrauch des ÖPNV zu einem Rückgang bis 2030 (siehe Abbildung 50). Der Endenergieverbrauch sinkt im Referenzszenario dabei von 46.300 TJ im Jahr 2008 auf ca. 44.200 TJ im Jahr 2020 und rund 41.700 TJ im Jahr 2030. Bis zum Jahr 2030 entspricht dies einem Rückgang von rund 10 %, während gleichzeitig die Verkehrsleistung leicht um 1,3 % gestiegen ist. Den größten Anteil am Endenergieverbrauch haben wie auch im Jahr 2008 die Busverkehre. Auf sie entfallen im Jahr 2020 84,4 % und im Jahr 2030 rund 83,4 % des Endenergieverbrauchs des ÖPNV. Lediglich 15,6 % (2020) bzw. 16,6 % (2030) des Endenergieverbrauchs entfallen auf Straßen-/Stadtbahnen bzw. U-Bahnen.

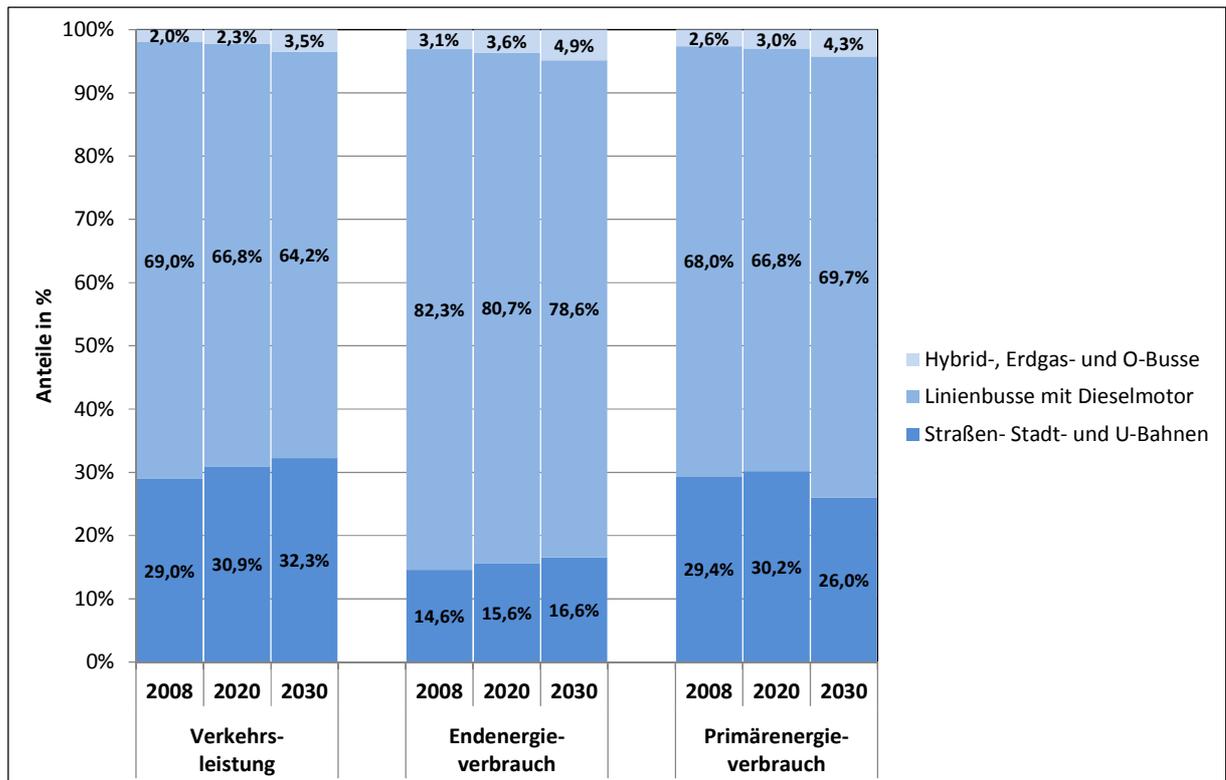
Linienbusse mit Dieselmotor (ohne Hybridantrieb) liefern im Referenzszenario im Jahr 2020 mit 80,7 % und im Jahr 2030 mit 78,6 % den größten Beitrag zum Endenergieverbrauch. Diesel-Hybrid-, Erdgas- und O-Busse spielen hingegen mit 3,6 % (2020) bzw. 4,9 % (2030) des Energieverbrauchs nur eine nachgeordnete Bedeutung. Innerhalb der Dieselbusse entfällt der Endenergieverbrauch überwiegend auf Busse der Größenklassen über 18 t zGG (44 % in 2020 bzw. 45 % in 2030) bzw. über 15 t zGG bis zu 18 t zGG (45 % in 2020 bzw. 44 % in 2030). Die Bedeutung der Busse über 18 t zGG hat im Zeitraum 2008 bis 2030 stark zugenommen – ihr Energieverbrauch ist um 19 % gestiegen. Gleichzeitig ist aber auch ihre Bedeutung an der Verkehrsleistung stark angewachsen. Die Busse dieser Größenklasse erbringen in 2030 im Vergleich zum Jahr 2008 eine um rund 26 % höhere Verkehrsleistung.



**Abbildung 50 Entwicklung des Endenergieverbrauchs des ÖPNV 2008 bis 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen]**

Wie bereits in Kapitel 3.1 ausgeführt, ist der Endenergieverbrauch zur Beschreibung der Bedeutung von elektrisch betriebenen Verkehrsmitteln nur bedingt aussagekräftig. Besser geeignet ist hierfür der Primärenergieverbrauch. Abbildung 51 zeigt daher die Anteile von Straßen, Stadt- und U-Bahnen, Dieselbussen sowie Busse mit alternativen Antriebskonzepten an der Verkehrsleistung, dem Endenergie- und den Primärenergieverbrauch des ÖPNV. Die Darstellung zeigt deutlich, dass der elektrisch betriebene ÖPNV einen deutlich höheren Anteil am Primärenergieverbrauch (rund 30 % im Jahr 2020 bzw. 26 % im Jahr 2030) im Vergleich zum Endenergieverbrauch besitzt (15,6 % im Jahr 2020 bzw. 16,6 % im Jahr 2030). Im Vergleich zum Jahr 2008 (siehe Abbildung 9) ist der Anteil von Straßen- Stadt- und U-Bahnen am Primärenergieverbrauch geringer, obwohl gleichzeitig die Verkehrsleistung gestiegen ist. Ursache hierfür ist, dass der Fahrstrom im Jahr 2030 zu mehr als 45 % aus erneuerbaren Energien gewonnen wird, die in die Primärenergiebilanz definitionsgemäß mit ihrem Endenergieverbrauch eingehen.

Aus Abbildung 51 ist ebenfalls nochmals ersichtlich, dass derzeit weder am Energieverbrauch noch an der Verkehrsleistung alternative Busantriebe große Anteile haben. Dass allerdings der Anteil an der Verkehrsleistung kleiner ist, als die Anteile am Energieverbrauch, spiegelt lediglich wieder, dass insbesondere die Erdgasbusse energetisch ungünstiger abschneiden als die Dieselbusse.



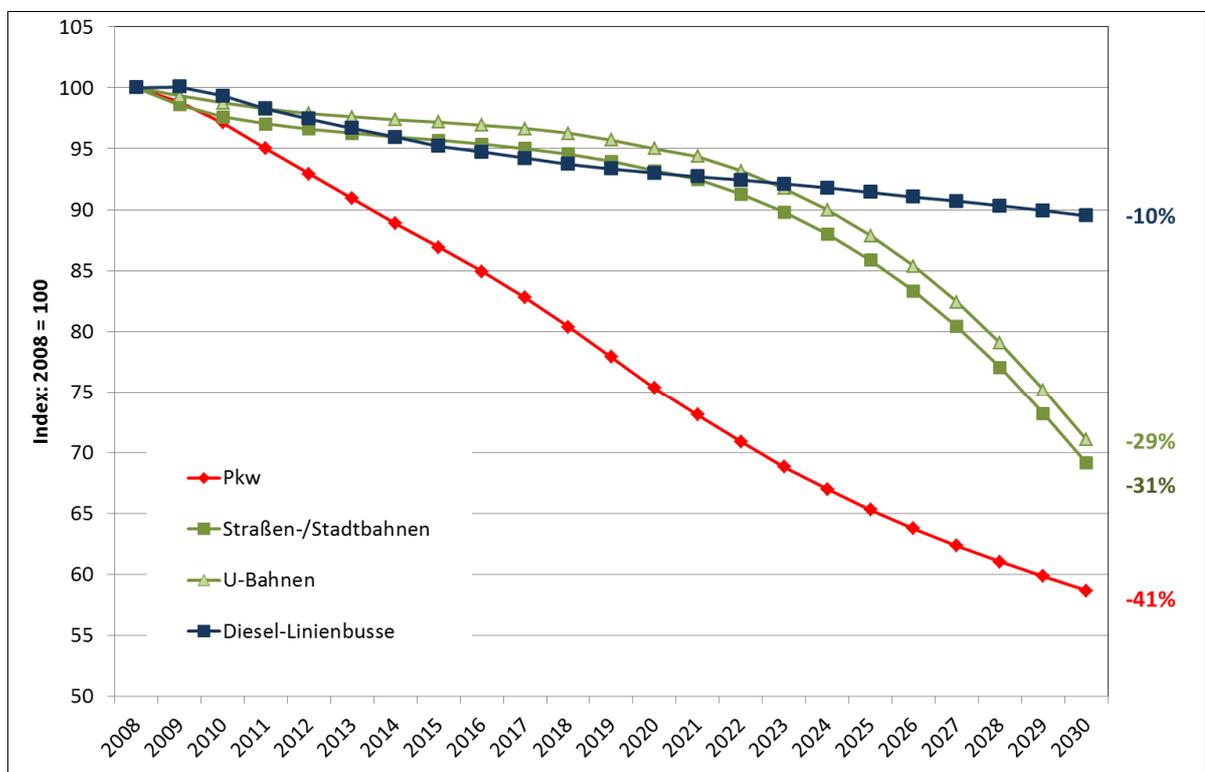
**Abbildung 51** Anteile der Verkehrsmittel des ÖPNV an der Verkehrsleistung, des Endenergie- und Primärenergieverbrauchs in den Jahren 2008, 2020 und 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen]

#### 5.4.2 Treibhausgasemissionen

Um zu beschreiben, wie hoch die Treibhausgasemissionen der verschiedenen Verkehrsmittel sind, werden meist die Emissionen pro Personenkilometer ausgewiesen. Will man aber pro Verkehrsmittel analysieren, wie sich die Treibhausgasemissionen entwickelt haben, bieten sich wie beim Energieverbrauch spezifische Werte pro Platz-km an. Im Gegensatz zum spezifischen Endenergieverbrauch wirken sich bei den spezifischen Treibhausgasemissionen pro Platz-km nicht nur Verbesserungen in der Energieeffizienz, sondern auch bei der Erzeugung des Fahrstroms oder der Kraftstoffe aus. Höhere Anteile an erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung sowie höhere Beimischungen an Biokraftstoffen führen dazu, dass die Minderungen der Treibhausgase über denen der Endenergie liegen. Der Vergleich der Abbildung 48 und Abbildung 52 zeigt dies eindrücklich für das Referenzszenario. Die Treibhausgasemissionen in Abbildung 52 sind als CO<sub>2</sub>-Äquivalente einschließlich der Produktion des Fahrstroms und der Kraftstoffe berechnet.

Die spezifischen Endenergieverbräuche pro Platz-km wurden im Referenzszenario in Bezug auf 2008 nur um 1 % (2020) bzw. 3 % (2030) bei U-Bahnen und 3 % (2020) bzw. 5 % (2030) bei Straßen-/Stadtbahnen gesenkt. Dagegen liegen die spezifischen Treibhausgasemissionen pro Platz-km im Jahr 2020 bei den U-Bahnen rund 5 % und bei den Straßen-/Stadtbahnen

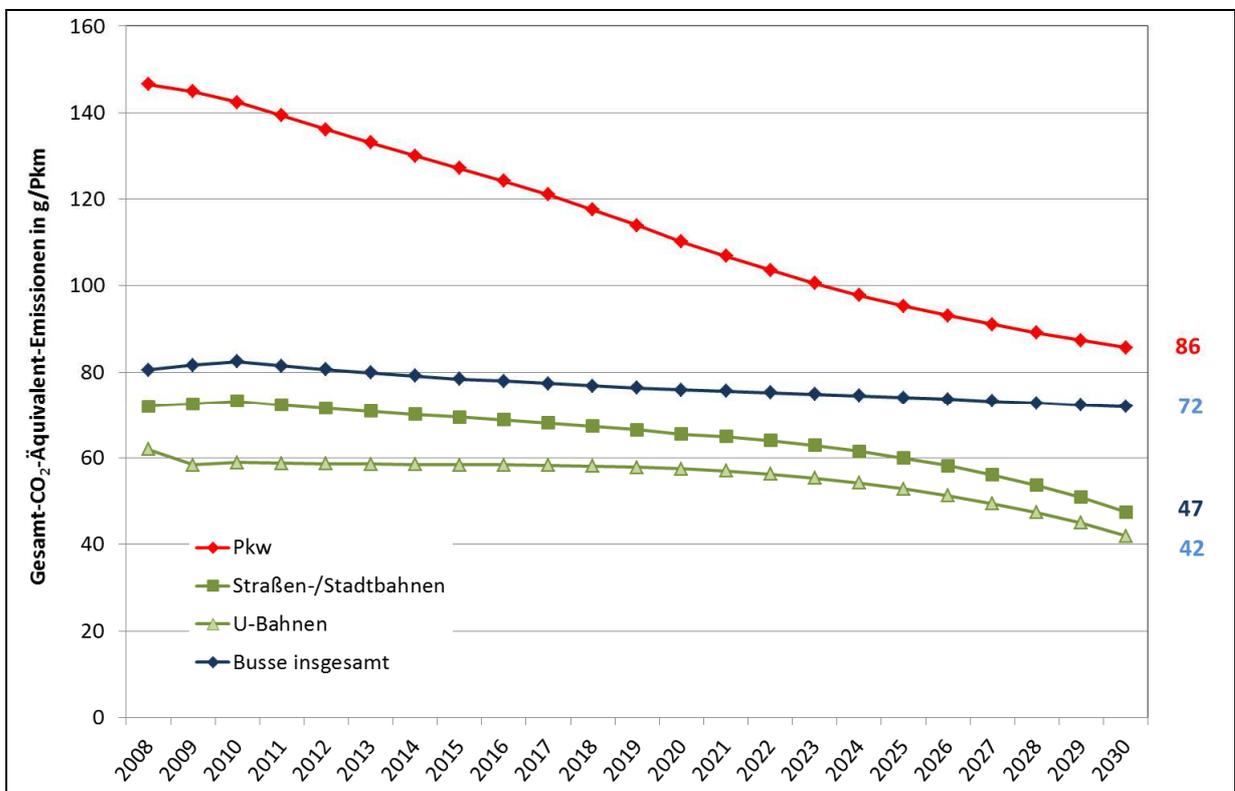
rund 7 % stärker unter den Werten von 2008. Für das Jahr 2030 fallen die Minderungen der spezifischen Treibhausgasemissionen gegenüber 2008 mit 29 % bei den U-Bahnen und 31 % bei Straßen-/Stadtbahnen sogar noch deutlicher aus. Zurückzuführen ist dies insbesondere auf die sinkenden Treibhausgasemissionen der Stromproduktion durch die Umstellung auf regenerative Energien. Dies zeigt aber auch nachdrücklich, welchen großen Einfluss die Strombereitstellung auf die Gesamtklimabilanz des elektrisch betriebenen ÖPNV hat. Der Vergleich beider Abbildungen macht aber auch deutlich, dass die Beimischungen der Biokraftstoffe sich nur leicht positiv auf die spezifischen CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen auswirken. Lag die Reduktion beim spezifischen Energieverbrauch der Linienbusse mit Diesel bei 9 %, ist die Minderung bei den spezifischen Treibhausgasemissionen 10 %.



**Abbildung 52 Entwicklung der spezifischen Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Platz-km (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für ausgewählte Verkehrsmittel des ÖPNV und für den Pkw-Verkehr 2008 bis 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen]**

Trotz der nun deutlichen Minderungen der spezifischen Treibhausgasemissionen bei Straßen-, Stadt- und U-Bahnen – dies zeigt Abbildung 52 ebenfalls – ist der Rückgang der Emissionen beim Pkw gegenüber 2008 noch größer. Dies lässt die Vermutung zu, dass der Pkw-Verkehr im Jahr 2030 bezogen auf einen Personenkilometer womöglich geringere Treibhausgasemissionen aufweist als die Verkehrsmittel des ÖPNV. Abbildung 53 zeigt, dass dies aber nicht der Fall ist. Zwar hat der Pkw-Verkehr gegenüber den Verkehrsmitteln des ÖPNV deutlich aufgeholt, dennoch liegen deren spezifische Emissionen noch niedriger als die des Pkw-Verkehrs.

Der Busverkehr (einschließlich Hybrid, Erdgas- und O-Busse) hat im Referenzszenario im Jahr 2030 mit 72 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Personenkilometer von den Verkehrsmittel des ÖPNV die höchsten Emissionen. Dennoch unterschreitet er die Emissionen des Pkw-Verkehrs immer hin noch um 16 % (31 % im Jahr 2020). Deutlich besser schneiden Straßen-/Stadtbahnen sowie U-Bahnen ab. Deren Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer liegen im Jahr 2030 45 % bzw. 51 % (im Jahr 2020 41 % bzw. 48 %) unter den Werten des Pkw. Dies ist erstaunlich, da die unterstellten Emissionen der Strombereitstellung als eher hoch einzustufen sind (siehe Kapitel 5.3.2). Der Umweltvorteil des ÖPNV bleibt somit selbst im Referenzszenario, dass bezüglich Effizienzverbesserungen sowie Einsatz erneuerbarer Energie wenig vorteilhaft ist, erhalten. Allerdings hat sich der Abstand gerade des Busverkehrs zum Pkw-Verkehr stark reduziert.

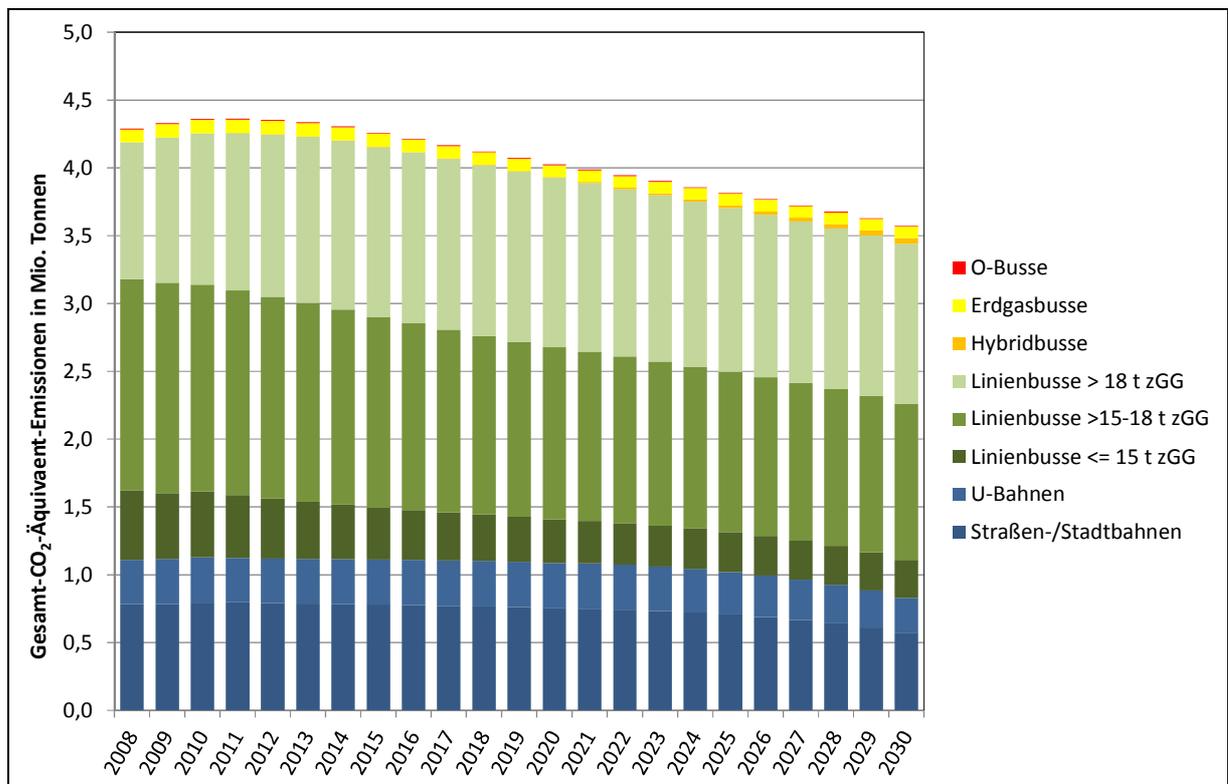


**Abbildung 53 Entwicklung der spezifischen Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für Verkehrsmittel des ÖPNV und für den Pkw-Verkehr 2008 bis 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen]**

Die Reduktion der spezifischen Treibhausgasemissionen der ÖPNV-Verkehrsmittel führt auch dazu, dass sich die Treibhausgasemissionen des ÖPNV insgesamt reduzieren. Die Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) gehen von 4,29 Mio. t im Jahr 2008 auf 4,03 Mio. t im Jahr 2020 und 3,57 Mio. t im Jahr 2030 zurück. Dies entspricht einem Rückgang von 6 % bis 2020 und 17 % bis 2030 (Entwicklung der Verkehrsleistung: +0,7 % / +1,3 %). Während sich die Emissionen des elektrisch

betriebenen ÖPNV bis 2020 bzw. 2030 um 2 % bzw. 25 % reduziert haben, liegen die Rückgänge beim ÖPNV mit konventionellem Motor bei lediglich 8 % bzw. 14 %.

Im Jahr 2020 werden rund 73 % der Emissionen des ÖPNV im Referenzszenario durch Busverkehre verursacht, in 2030 sind es 77 %. Rund 27 % bzw. 23 % entfallen in 2020 bzw. 2030 auf Straßen, Stadt- und U-Bahnen. Den größten Einzelbeitrag zu den Emissionen liefern Diesel-Linienbusse über 18 t zGG – auf sie entfallen 31 % (2020) bzw. 33 % (2030) der gesamten Treibhausgasemissionen. Dieselbusse der Gewichtsklasse über 15 t zGG bis zu 18 t zGG sind für rund 31 % bzw. 32 % der Emissionen im Jahr 2020 bzw. 2030 verantwortlich.



**Abbildung 54 Entwicklung der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen des ÖPNV (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) 2008 bis 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen]**

### 5.4.3 Energiekosten

Die Auswertungen haben gezeigt, dass auch im Referenzszenario die Energieeffizienz des ÖPNV gestiegen ist. Gleichzeitig werden die Preise für Fahrstrom und Kraftstoffe bis 2030 steigen. Für die Preisentwicklung für Strom und Kraftstoffe wurde – wie in Kapitel 5.1 beschrieben – die Annahmen des Referenzszenarios der Grundlagenstudie zum Energiekonzept der Bundesregierung zugrunde gelegt [Prognos et al. 2010]. In diesem Szenario steigen die Strompreise moderat, die Kraftstoffpreise bereits spürbar.

Interessant für die ÖPNV-Unternehmen wird sein, inwieweit die steigenden Energiekosten durch die Steigerung der Energieeffizienz aufgefangen werden kann. Hierzu kann für das Referenzszenario klar festgehalten werden, dass die Energiepreise schneller wachsen als die Energieeinsparung. Abbildung 55 zeigt, dass gegenüber 2012 bereits im Jahr 2020 die ÖPNV-Unternehmen in Deutschland rund 70 Mio. Euro mehr für Energie bezahlen müssen (zu konstanten Preisen von 2008). Im Jahr 2030 werden es bereits 140 Mio. Euro sein.

Im Zeitraum von 2012 bis 2020 führen die ansteigenden Energiepreise zu Mehrausgaben in Höhe von insgesamt 0,42 Mrd. Euro und im Zeitraum 2012 bis 2030 in Höhe von insgesamt 1,33 Mrd. Euro (zu konstanten Preisen von 2008). Im Jahr 2030 entfallen davon auf Dieselbusse (einschließlich Hybrid) mehr als 70 % der Mehrkosten (rund 940 Mio. Euro). Bei Straßen-/Stadt- und U-Bahnen führen die Energiepreissteigerungen zu Mehrausgaben in Höhe von 190 Mio. Euro (14 %). Insbesondere die Anhebung der Energie-Besteuerung von Erdgas verursacht deutliche Mehrkosten bei ÖPNV-Unternehmen, die Erdgas-Fahrzeuge einsetzen (rund 200 Mio. Euro bzw. 15 % der Gesamtmehrkosten). Diese Zahlen belegen, dass die im Referenzfall unterstellten Energieeinsparungen bei weitem nicht ausreichend sind, den Anstieg der Energiekosten zu kompensieren.

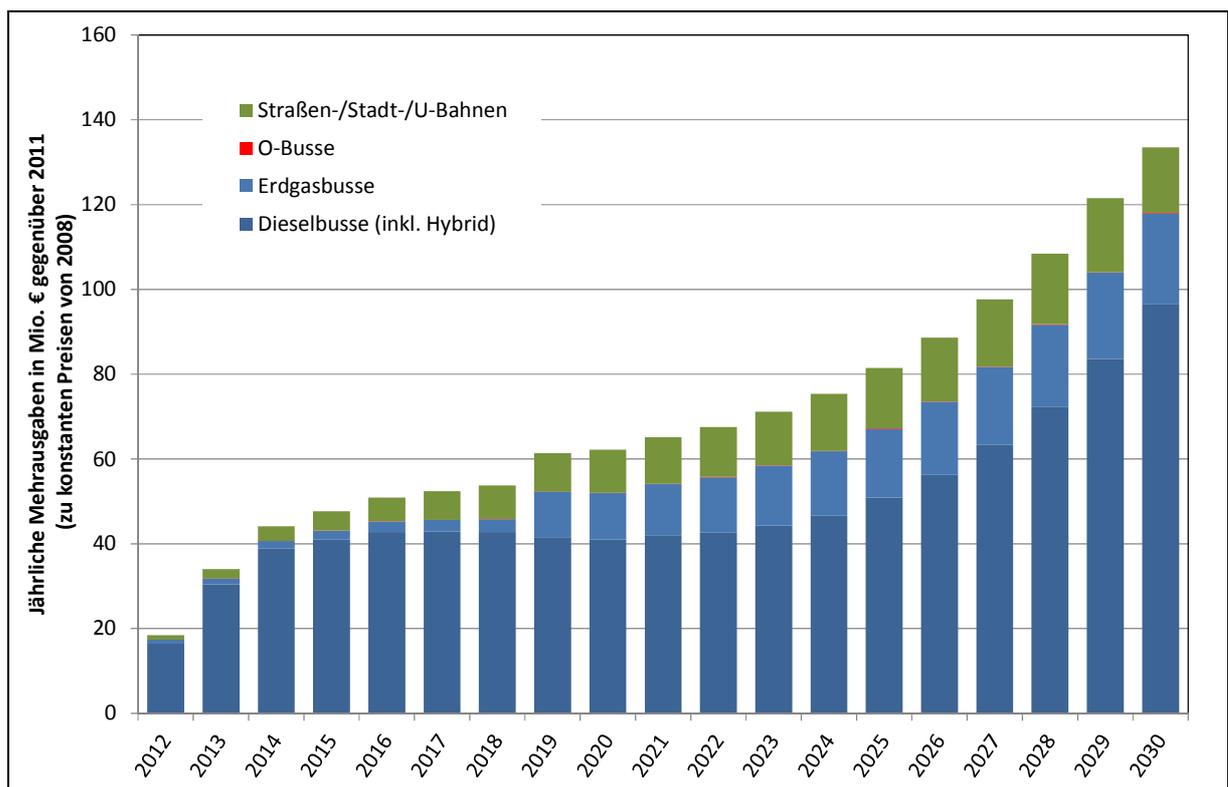


Abbildung 55 Entwicklung der jährlichen Mehrkosten des ÖPNV für Energiekosten 2008 bis 2030 gegenüber 2011 im Referenzszenario [eigene Berechnungen]

## 5.5 Zusammenfassung

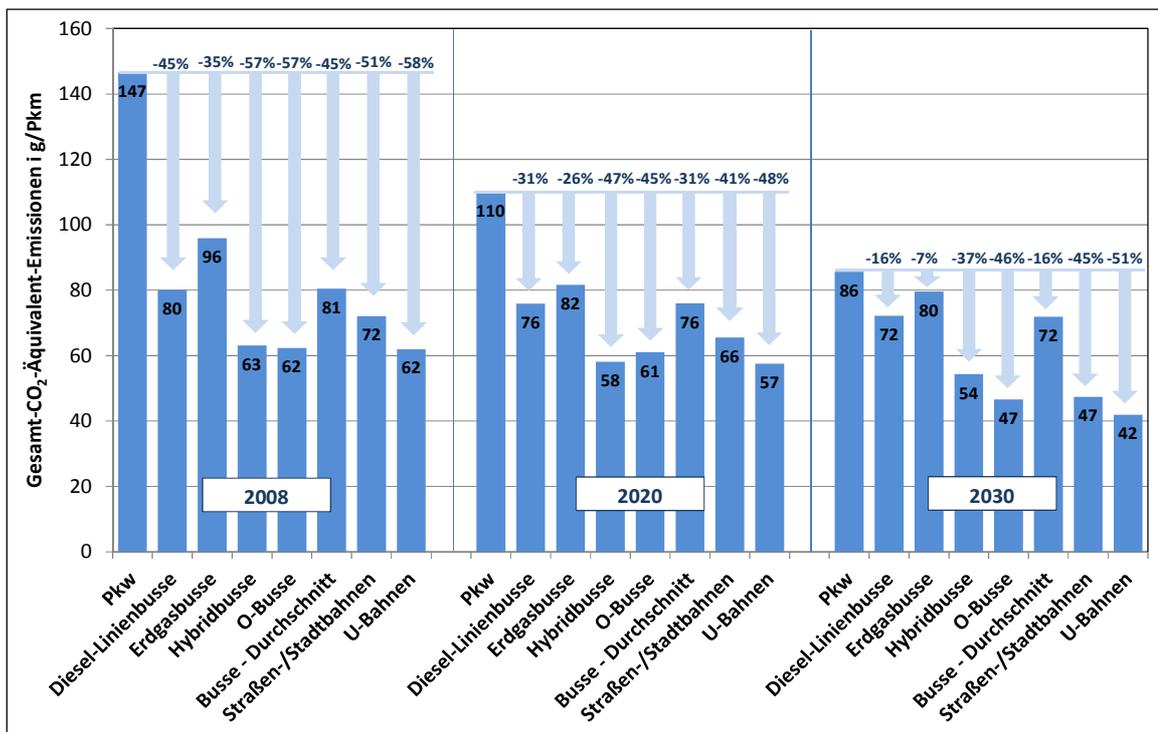
Im vorgestellten Referenzszenario bis 2030 wird davon ausgegangen, dass die ÖPNV-Unternehmen nicht aktiv Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz oder des Anteils erneuerbarer Energien ergreifen. Vielmehr werden lediglich die Maßnahmen umgesetzt, die sich aufgrund der Flottenmodernisierung zwangsläufig ergeben bzw. kurze Amortisationszeiträume aufweisen. Von staatlicher Seite werden alternative Antriebs- und Kraftstoffkonzepte nicht gefördert. Dies hat unter anderem zur Folge, dass Diesel-Hybridbusse bis 2030 nur eine Nischenerscheinung bleiben – ihr Anteil im Gesamtbestand liegt im Jahr 2030 bei knapp unter 2 %. Neue Dieselbusse werden unter den Annahmen des Referenzszenarios bis 2020 rund 3 % und bis 2030 rund 7 % effizienter.

Wie Tabelle 18 zeigt, steigt für alle Verkehrsmittel des ÖPNV bis 2030 deren Energieeffizienz – unabhängig davon, ob pro Fahrzeug- bzw. Wagen-Kilometer oder pro Platz-Kilometer gemessen wird. Allerdings zeigt der Vergleich mit dem Pkw-Verkehr, dass die Steigerung der Energieeffizienz im Referenzfall verhältnismäßig gering ist. Der direkte Vergleich der Reduktion des Energieverbrauchs und der spezifischen Treibhausgasemission pro Platz-km (berechnet als CO<sub>2</sub>-Äquivalente) zeigt, dass die Emissionen der Stromproduktion selbst im Referenzfall deutlich gesenkt wurden. Die ÖPNV-Unternehmen profitieren damit im Referenzfall von der Senkung der Treibhausgasemissionen bei der Stromproduktion, ohne sich aktiv an der Förderung des Ausbaus der erneuerbaren Energien zu beteiligen. Die Senkung der Treibhausgasemissionen durch Nutzung von Diesel mit Biokraftstoffbeimischung wirkt sich nur marginal auf die Treibhausgasbilanz des Busverkehrs aus, wie der Vergleich der spezifischen Energieeffizienz und Treibhausgasemissionen pro Platz-km zeigt. Auch bei den spezifischen Treibhausgasemissionen sind die Reduktionen des Pkw im Zeitraum 2008 bis 2030 höher als beim ÖPNV.

Größe	Einheit	2008	2015	2020	2025	2030	Δ % 2030/08
<b>Energieverbrauch pro Fahrzeug-/Wagen-km</b>							
Pkw	MJ/km	2,6	2,3	2,0	1,8	1,58	-39%
Busse	MJ/km	14,0	14,2	14,2	14,0	13,6	-3%
Straßen-/Stadtbahnen	MJ/Wagen-km	14,8	14,7	14,7	14,6	14,5	-2%
U-Bahnen	MJ/Wagen-km	7,7	7,6	7,6	7,6	7,5	-2%
<b>Verbrauch pro Platz-km</b>							
Pkw	MJ/Platz-km	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	-39%
Busse	MJ/Platz-km	0,20	0,19	0,19	0,19	0,18	-9%
Straßen-/Stadtbahnen	MJ/Platz-km	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	-5%
U-Bahnen	MJ/Platz-km	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-3%
<b>CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Platz-km</b>							
Pkw	g CO <sub>2</sub> e/Platz-km	44,0	38,2	33,1	28,7	25,8	-41%
Busse	g CO <sub>2</sub> e/Platz-km	16,2	15,4	15,0	14,7	14,4	-11%
Straßen-/Stadtbahnen	g CO <sub>2</sub> e/Platz-km	14,4	13,8	13,4	12,4	10,0	-31%
U-Bahnen	g CO <sub>2</sub> e/Platz-km	10,6	10,3	10,1	9,3	7,5	-29%
<b>CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Pkm</b>							
Pkw	g CO <sub>2</sub> e/Pkm	146,6	127,1	110,2	95,4	85,7	-42%
Busse	g CO <sub>2</sub> e/Pkm	80,5	78,4	75,9	74,1	71,9	-11%
Straßen-/Stadtbahnen	g CO <sub>2</sub> e/Pkm	72,1	69,5	65,5	60,0	47,4	-34%
U-Bahnen	g CO <sub>2</sub> e/Pkm	62,0	58,4	57,5	52,8	42,0	-32%
<b>Quelle:</b> eigene Berechnungen.							

**Tabelle 18 Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs und der spezifischen CO<sub>2</sub>-Äquivalente des ÖPNV und des Pkw-Verkehrs in Deutschland im Zeitraum 2008 bis 2030 im Referenzszenario**

Trotz dieser deutlichen Verbesserungen bei Energieeffizienz und Treibhausgasminderung schneidet der Pkw-Verkehr im Jahr 2030 selbst unter den Rahmenbedingungen des Referenzszenarios bei den CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer nicht besser ab als die Verkehrsmittel des ÖPNV (siehe Abbildung 56). Der Klimavorteil des ÖPNV bleibt auch im Jahr 2030 gegenüber dem Pkw erhalten. Allerdings holt der Pkw deutlich auf. Der Busverkehr hat pro Personenkilometer nur noch 16 % niedrigere Treibhausgasemissionen als der Pkw. Die Straßen-, Stadt- und U-Bahnen liegen aber in Bezug auf Treibhausgasemissionen auch im Referenzszenario 2030 deutlich besser als der Pkw-Verkehr.



**Abbildung 56 Spezifische Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für Verkehrsmittel des ÖPNV und für den Pkw-Verkehr 2008, 2020 und 2030 für das Referenzszenario im Vergleich [eigene Berechnungen]**

Insgesamt nimmt der gesamte Endenergieverbrauch des ÖPNV im Referenzszenario bis 2020 um 4 % und bis 2030 um 10 %, die Gesamt-Treibhausgasemissionen (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) bis 2020 um 6 % und bis 2030 um 17 % ab. Die Verkehrsleistung des ÖPNV steigt um 0,7 % (2020) bzw. 1,3 % (2030). Dass diese Effizienzsteigerungen des ÖPNV nicht ausreichend sind, kann daran gemessen werden, dass dadurch die Steigerungen der im Referenzfall unterstellten moderaten Energiepreisteigerungen nicht kompensiert werden können. Im Zeitraum von 2012 bis 2030 werden die ÖPNV-Unternehmen trotz der erreichten Steigerung der Energieeffizienz im Referenzszenario durch steigende Energiepreise Mehrausgaben in Höhe von 1,33 Mrd. Euro haben (zu konstanten Preisen von 2008). Davon entfallen auf Dieselbusse allein 940 Mio. Euro (siehe Abbildung 57). Dies zeigt, dass die ÖPNV-Unternehmen zwingend mehr in Energieeffizienz investieren müssen als im Referenzszenario angenommen, damit die zukünftigen Energiepreisteigerungen kompensiert werden können. Dies ist auch möglich, da sich Energiesparmaßnahmen über kurz und lang grundsätzlich in Kosteneinsparungen niederschlagen werden. Energiesparen hilft Kosten sparen.

Aber auch aus gesamtwirtschaftlicher Sicht muss der ÖPNV mehr tun, als im Referenzszenario unterstellt. Erneuerbare Energien können nicht den heutigen Endenergieverbrauch decken. Soll der Anteil erneuerbarer Energie gesteigert werden, müssen nicht nur entsprechende Anlagen z. B. zur Stromerzeugung gebaut werden, sondern es muss

auch gleichzeitig die Endenergienachfrage nachhaltig gesenkt werden. Eine Minderung von 10 % in einem Zeitraum von 20 Jahren, wie es sich im Referenzszenario ergibt, ist hierzu nicht ausreichend. Welche Möglichkeiten bestehen, Energieeffizienz und erneuerbare Energie weiter zu steigern, wird im folgenden Kapitel näher untersucht.

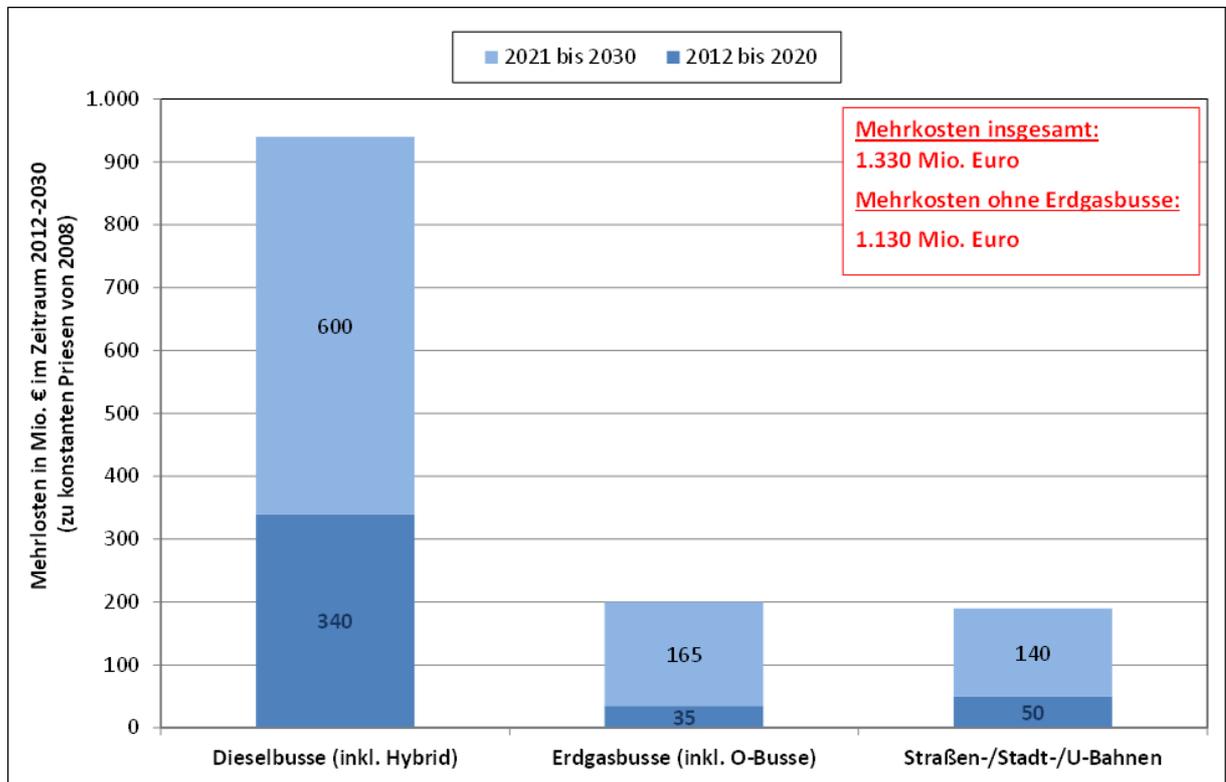


Abbildung 57 Gesamte Mehrkosten des ÖPNV für Energiekosten für den Zeitraum 2012 bis 2020 und 2021 bis 2030 im Referenzszenario [eigene Berechnungen]

## 6 Entwicklung des ÖPNV in den Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien bis 2030

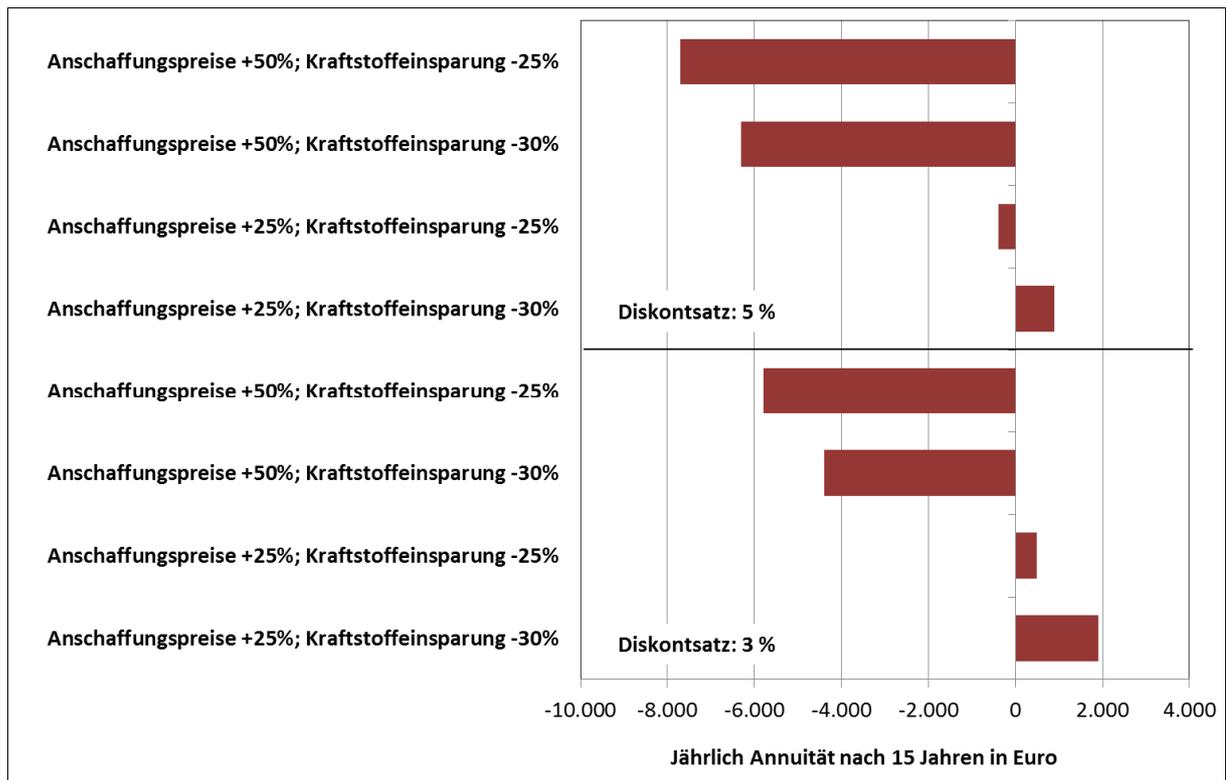
Das Referenzszenario 2030, das in Bezug auf Energieeffizienz und erneuerbare Energien nur auf Mitnahmeeffekte von ohnehin stattfindenden Verbesserungen baut, hat gezeigt: Zwar wird der Klimavorteil des ÖPNV gegenüber dem Pkw deutlich kleiner, der Vorteil gegenüber dem Auto bleibt aber erhalten. Unabhängig davon führen aber die geringen Effizienzgewinne des Referenzszenarios und die gleichzeitig zunehmenden Strom- und Kraftstoffpreise zu stark ansteigenden Energieausgaben. Für den Zeitraum von 2012 bis 2030 müssen die ÖPNV-Unternehmen im Referenzszenario 1,3 Mrd. Euro mehr für Fahrstrom und Kraftstoffe ausgeben.

Daher muss das Ziel der ÖPNV-Unternehmen sein, die ansteigenden Energiekosten durch die Senkung des Energieverbrauchs aufzufangen. Energiesparen reduziert nicht nur die Treibhausgasemissionen des ÖPNV, sondern senkt auch die jährlichen Ausgaben für Energie und damit auch langfristig die Gesamtkosten. Allerdings müssen den Einsparungen bei den Energiekosten die notwendigen Anfangsinvestitionskosten für Energiespartetechnologien sowie die entgangenen Zinseinnahmen (unter Berücksichtigung eines Diskontsatzes) gegengerechnet werden. Entscheidend für die Einführung von Effizienztechnologien wird sein, ob sich die Anfangsinvestitionen über die erzielten jährlichen Einsparungen innerhalb der Nutzungsdauer amortisieren. Abbildung 58 zeigt beispielsweise anhand einer vereinfachten Lebenszykluskostenrechnung auf Basis der Annuitätenmethode für einen Diesel-Hybrid-Gelenkbus, dass sich ein 50 % höherer Anschaffungspreis im Vergleich zum konventionellen Dieselbus innerhalb einer Nutzungsdauer von 15 Jahren über die erzielten Kraftstoffeinsparungen selbst bei geringen Diskontsätzen nicht amortisieren kann. Für den Dieselpreis wurden dabei die im Referenzszenario verwendeten Steigerungen unterstellt. Liegt der Anschaffungspreis lediglich 25 % über dem Anschaffungspreis, ergibt sich über 15 Jahre gerechnet eine positive Annuität. Die ÖPNV-Unternehmen sparen also jährlich Geld, wenn sie diese Investition tätigen. Unabhängig davon wird aber im günstigsten Fall (Anschaffungspreis: +25 %, Kraftstoffeinsparungen: -30 %; Diskontsatz: 3 %) der Amortisationszeitpunkt erst nach elf Jahren erreicht. Gerade die späten Amortisationszeitpunkte halten viele Unternehmen davon ab, dann entsprechende Investitionsentscheidungen zu treffen.

Im Rahmen dieses Kapitels soll daher untersucht werden, welche Minderungen erreichbar sind, wenn die ÖPNV-Unternehmen alle Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz umsetzen, die sich innerhalb der Lebensdauer klar rechnen. Dies ist heute, gerade weil anfangs für Energiesparmaßnahmen hohe Anfangsinvestitionen notwendig sein können, nicht der Fall. Dieser Pfad wird im Folgenden als „**Effizienzscenario mittel**“ bezeichnet. Wie in Kapitel 5 werden die Auswirkungen auf den Energieverbrauch, die Treibhausgasemissionen und auf die Energiekosten im Folgenden dargestellt.

Zusätzlich wird in diesem Kapitel aber auch untersucht, welche Auswirkungen ein „**Effizienzscenario hoch**“ auf Energieverbrauch, Emissionen und Kosten hätte. Für diese Szenario-Variante wird unterstellt, dass die ÖPNV-Unternehmen auch Effizienzmaßnahmen

durchführen, die sich derzeit gerade so noch rechnen. Zudem wird für dieses Szenario unterstellt, dass der Staat durch geeignete Förderprogramme die Einführung effizienter Technologien unterstützt, um langfristig die Kosten der Technologien zu senken. Mit zunehmenden Stückzahlen – das zeigen die Erfahrungen der Vergangenheit – greift die Kostendegression bei der Produktion und die Herstellungskosten sinken. Im Szenario „Effizienzscenario hoch“ wird unterstellt, dass insbesondere ein Programm des Staates zur Markteinführung von Hybridbussen aufgelegt wird.



**Abbildung 58 Vereinfachte Lebenszykluskostenanalyse für einen Hybrid-Gelenkbus unter verschiedenen Rahmenbedingungen (Kraftstoffpreissteigerung entsprechend dem Referenzszenario) [eigene Berechnungen]**

Im Gegensatz zu Energieeffizienzmaßnahmen führt der verstärkte Einsatz von regenerativen Energien für die ÖPNV-Unternehmen zu deutlichen Mehrkosten. Auf Basis von im Referenzszenario durchgeführten Zusatzanalysen kann gezeigt werden, dass zum Beispiel der schrittweise Umstieg auf Reinbetankung von Biokraftstoffen im Busverkehr bis 2030 zwar die Treibhausgasemissionen um rund 60 % senken könnte, es aber gleichzeitig zu enormen Mehrausgaben für Kraftstoffe kommen würde. Bei den erwarteten Mehrkosten für Biokraftstoffe gegenüber Diesel mit Beimischung (2020: +50 %; 2030: +35 %) würden sich in dem Zeitraum von 2012 bis 2030 für das Referenzszenario zusätzliche Mehrausgaben in Höhe von 4,1 Mrd. Euro zu den eh schon gestiegenen Energiekosten von 1,1 Mrd. Euro für Kraftstoffe ergeben. Demgegenüber würde der Bezug von Strom mit höherem regenerativen Anteilen im Referenzszenario zu überschaubaren Mehrausgaben führen. Diese lägen bei rund 0,3 Mrd. Euro, wobei gegenüber 2020 von einem um 2 €-Cent höherem Strompreis gegenüber

den Annahmen des Referenzszenarios ausgegangen wurde. Im Jahr 2030 würden sich die Strompreise sogar angleichen.

Diese Berechnungen zeigen klar, dass eine Reinbetankung von Biokraftstoffen für die ÖPNV-Unternehmen ohne entsprechende Förderung keine Option darstellt. Kein noch so ein umfangreiches Maßnahmenpaket zur Steigerung der Energieeffizienz wird diese Mehrausgaben wieder kompensieren können. Beim Bezug von regenerativem Strom kann sich dies allerdings durchaus anders darstellen, weil sich das auch langfristig nach 2030 für die ÖPNV-Unternehmen rechnen kann. Aus diesem Grund wird zusätzlich untersucht, welche Auswirkungen auf Treibhausgasemissionen und Kosten des ÖPNV der Strombezug mit größeren regenerativen Anteilen in Kombination mit den beiden Energieeffizienzszenarien hat.

Wird im Folgenden lediglich vom „EffizienzszENARIO mittel“ bzw. „EffizienzszENARIO hoch“ gesprochen, dann handelt es sich um eine Kombination der Szenarien mit der Art des Strombezuges, wie er auch im Referenzszenario unterstellt wurde (basierend auf dem Referenzszenario der Grundlagenstudie zum Energiekonzept) [Prognos et al. 2010]. Wird verstärkt grünerer Strom eingesetzt, wird von „**EffizienzszENARIO mittel + erneuerbare Energien**“ bzw. „**EffizienzszENARIO hoch + erneuerbare Energien**“ gesprochen. Diese Unterscheidung in diese vier Fälle (siehe Tabelle 19) ist im Folgenden nur dann notwendig, wenn die Treibhausgasemissionen und Kosten betrachtet werden. Beim Energieverbrauch reicht eine Unterscheidung in die beiden Energieeffizienzszenarien.

<b>EffizienzszENARIO mittel</b>	Umsetzung aller Maßnahmen, die sich innerhalb Lebensdauer rechnen
<b>EffizienzszENARIO mittel + erneuerbare Energien</b>	Zusätzlich verstärkter Einsatz grünen Stroms
<b>EffizienzszENARIO hoch</b>	Zusätzliche Umsetzung von Maßnahmen, die sich gerade noch rechnen und staatliche Förderprogramme
<b>EffizienzszENARIO hoch + erneuerbare Energien</b>	Zusätzlich verstärkter Einsatz grünen Stroms

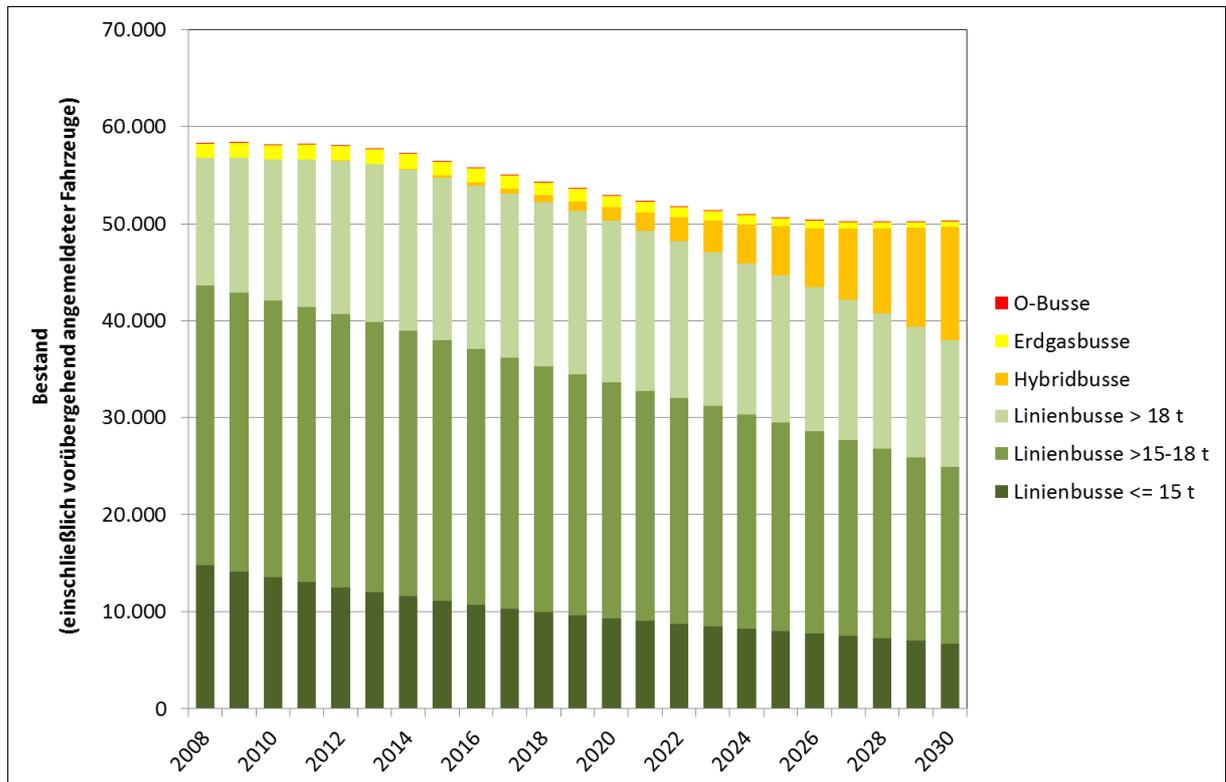
**Tabelle 19 Übersicht der Szenarien [eigene Darstellung]**

Wie im Referenzszenario werden im Folgenden in einem ersten Schritt die verkehrlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen für die Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien vorgestellt (siehe Kapitel 6.1). In Kapitel 6.2 werden den Szenarien zugrunde liegenden Annahmen zur Energieeffizienz vorgestellt, bevor in Kapitel 6.3 die Annahmen zum Einsatz erneuerbarer Energien beschrieben werden. Kapitel 6.4 beschreibt die Auswirkungen der Szenarien auf Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Energiekosten des ÖPNV. Kapitel 6.5 fasst die Ergebnisse der Szenarien „Energieeffizienz und erneuerbare Energien“ zusammen.

## **6.1 Rahmenbedingungen der Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien**

Den Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien liegen die gleichen Rahmenbedingungen zur verkehrlichen Entwicklung wie im Referenzszenario zugrunde (siehe Kapitel 5.1) [Progtrans/Prognos 2011]. Damit unterscheiden sich die Szenarien in diesem Kapitel weder bei der Entwicklung der Verkehrs- und Fahrleistungen im ÖPNV, den angebotenen Platzkilometern noch bei der Höhe der Fahrzeugbestände und der Anzahl der Neuzulassungen.

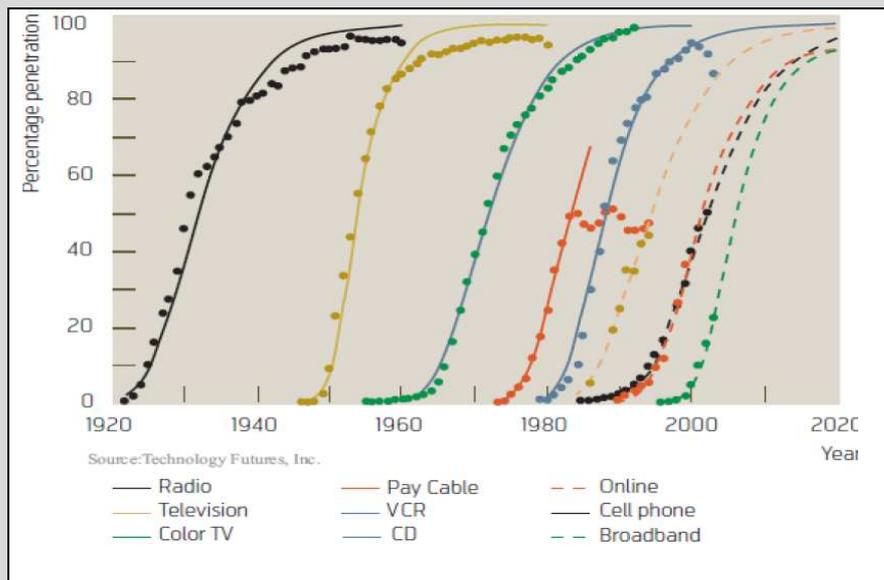
Unterschiede ergeben sich aber in der Struktur der Fahrzeugbestände. Bei den Straßen-, Stadt- und U-Bahnen werden sich verstärkt energieeffiziente Fahrzeuge durchsetzen. Beim Busbestand ergeben sich Unterschiede vor allem in der Anzahl der Diesel-Hybridbusse, die Rückwirkungen auf konventionelle Dieselsebusse und Erdgasbusse haben werden. Im „Effizienzscenario mittel“ wird davon ausgegangen, dass sich Hybridbusse aufgrund von sinkenden Mehrkosten und der Bereitschaft der ÖPNV-Unternehmen, auch aktiv Energieeffizienzmaßnahmen umzusetzen, langsam durchsetzen werden. Analysen des Öko-Instituts zu Technikdiffusionen zeigen (siehe Exkurs Technologiediffusion), dass die Wachstumsraten neuer Technologien ohne gezielte, umfangreiche Förderprogramme sich anfangs erst langsam am Markt durchsetzen. Konkret lassen diese Analysen erwarten, dass etwa nach 10 Jahren rund 15 % der neu zugelassenen Busse Hybridtechnologie besitzen, nach 20 Jahren etwas mehr als 50 %. Die Entwicklung folgt dabei dem so genannten Gompertz-Wachstumsmodell (siehe Exkurs Technologiediffusion). Der Bestand der Diesel-Hybridbusse wächst im „Effizienzscenario mittel“ bis zum Jahr 2020 auf rund 1.400 Busse bzw. rund 3 % des Bestandes an, bis 2030 steigt die Anzahl auf 11.700 Busse an – das entspricht rund 23 % aller Fahrzeuge im Bestand (siehe Abbildung 59). Gleichzeitig wird erwartet, dass der Erdgasbus durch die Hybridtechnologie verdrängt wird. Die Zahl der Neuzulassungen geht auf null zurück; im Busbestand des Jahres 2030 sind dann noch rund 500 Erdgasbusse vorhanden.



**Abbildung 59 Entwicklung des Busbestandes (einschließlich vorübergehend abgemeldeter Fahrzeuge) in Deutschland im Zeitraum von 2008 bis 2030 differenziert nach Größenklassen und Antriebskonzepten im „Effizienzscenario mittel“ [eigene Berechnungen]**

### Exkurs: Technologiediffusion

Technische Innovationen, die sich in einem Markt mit konkurrierenden Technologien befinden, können ihr vollständiges Marktpotenzial in der Regel erst mit der Zeit erschließen. In der Technikgeschichte kann diese Entwicklung anhand zahlreicher Beispiele (nachfolgende Abbildung 60) nachvollzogen werden.



**Abbildung 60 Reale Marktentwicklung von Beispieltechnologien und deren Simulation nach Gompertz [Muraleedharakurup et al. 2010]**

Die Marktentwicklung von erfolgreichen Technologien nimmt dabei typischerweise einen S-förmigen Verlauf: auf eine Phase der Nischenanwendung nach Beginn der Markteinführung folgt eine Phase der zunehmenden Marktdurchdringung, bevor sich das Wachstum wieder abschwächt und die Technologie ihr Sättigungsniveau – also das Marktpotenzial – erreicht.

Die Ursachen für die zeitverzögerte Erschließung des Marktpotenzials können vielfältig sein; bezogen auf die Marktentwicklung von Hybridbussen wird die Annahme getroffen, dass sich vor allem das Angebot an Fahrzeugen und die zusätzlichen Qualifikationen für die Wartung und Instandhaltung in den Werkstätten der Verkehrsunternehmen erst langsam entwickeln und somit die Marktnachfrage insbesondere in den ersten Jahren stark dämpfen wird.

Eine Auswertung historischer Daten zur Entwicklung von Innovationen im Automobilsektor zeigt, dass im Mittel erst nach 10 bis 20 Jahren ein Marktanteil von 5 % erreicht wird [Krömer & Heywood 2007]. Die Absatzentwicklung von Hybrid-Pkw in den USA, welche in den USA innerhalb von 10 Jahren einen Marktanteil von 6 % erreichen konnte [EPA 2010], stellt eine besonders positive Entwicklung einer verwandten Technologie in jüngster Vergangenheit dar.

Um den zeitlichen Verlauf der Diffusion von innovativen Technologien zu prognostizieren, werden unterschiedliche nicht-lineare Wachstumsmodelle angewendet. Diese Modelle versuchen den Zeitraum zu beschreiben, der notwendig ist, um das maximale Marktpotenzial zu erreichen. Typische Beispiele für solche Wachstumsmodelle sind das Logistische Wachstums-Modell bzw. die Wachstumsmodelle nach Gompertz, Bass und Fisher-Pry.

Das Gompertz-Wachstumsmodell eignet sich besonders für die Darstellung des frühen Markthochlaufs und kommt im Automobilsektor häufig als Prognosemodell zur Anwendung. Es kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$AM(t) = M e^{-ae^{-bt}}$$

Die Marktentwicklung der Hybridbusse  $AM(t)$  d. h. der Anteil am Marktpotenzial, der unter Berücksichtigung der Technologiediffusion tatsächlich auf dem Markt verkauft wird, ergibt sich aus dem Marktpotenzial  $A$ , welches in diesem Vorhaben mit den Neuzulassungszahlen gleichgesetzt wird, sowie einem Regressionsfaktor  $a$  und einer Wachstumsrate  $b$ . Die Variablen  $a$  und  $b$  wurden mittels der Methode der kleinsten Quadrate aus aktuellen Neuzulassungsdaten von Hybrid-Pkw in den USA unter der Annahme eines Potenzials für Hybrid-Pkw am US-Gesamtmarkt von 33 % bestimmt. Die Zeit nach Markteintritt der Hybridbusse ist dabei durch die Variable  $t$  dargestellt.

Die generierte Technologiediffusionskurve in der unten dargestellten Abbildung stellt die Dämpfungsfunktion für die Marktentwicklung von Hybridbussen in Deutschland dar. Nach etwa 10 Jahren wären demnach rund 15 % der neu zugelassenen Busse Hybridbusse, nach 20 Jahren wären dies bereits mehr als 50 % der Neuzulassungen.

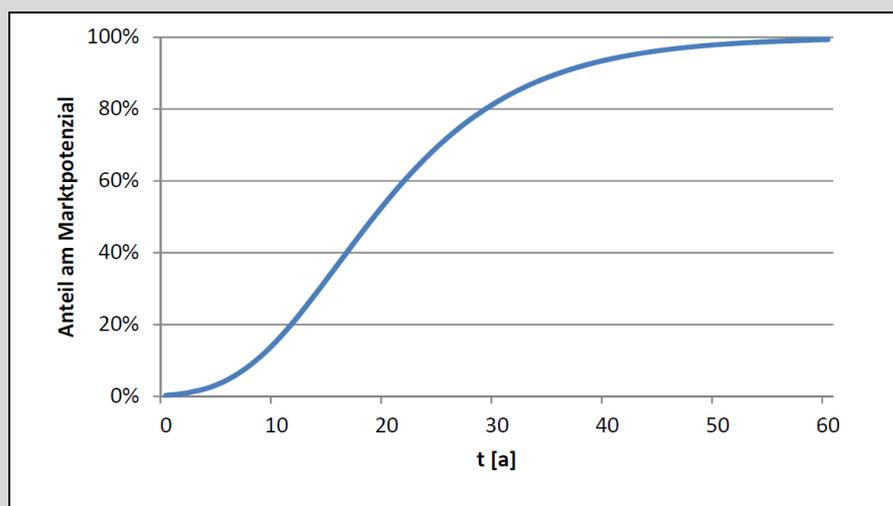
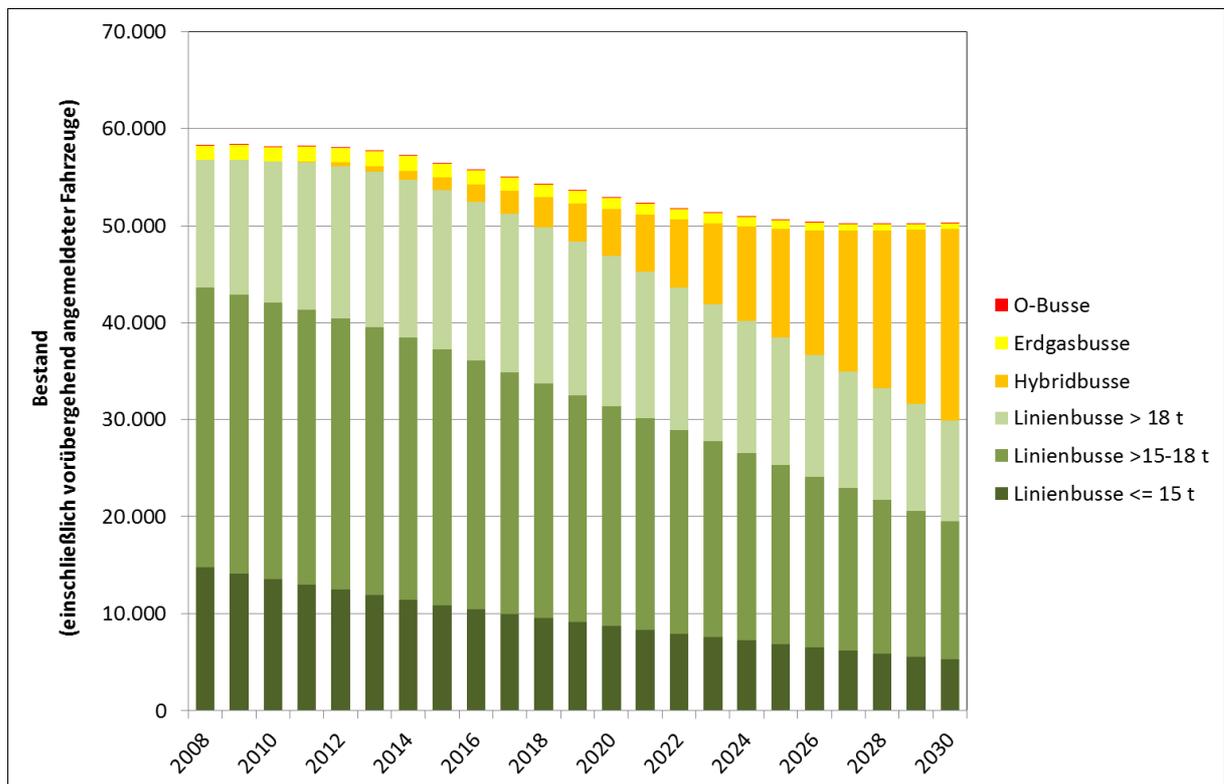


Abbildung 61 Technologiediffusionskurve nach Gompertz (Referenz: Marktentwicklung Hybrid-Pkw in den USA) [Öko-Institut 2011]

Schlussbericht

Im Gegensatz zum „Effizienzscenario mittel“ wird für das „Effizienzscenario hoch“ unterstellt, dass für die Anfangsjahre die derzeit bestehenden Förderprogramme des BMVBS und des BMU für Busse, die im Rahmen des Konjunkturprogramms II aufgelegt wurden, fortgesetzt werden. Das BMVBS hat sich im Rahmen des Förderprogramms „Elektromobilität in Modellregionen“ an der Anschaffung von 60 Hybridbussen von ÖPNV-Unternehmen beteiligt [BMVBS 2011]. Das BMU hat zur Förderung der Anschaffung von Hybridbussen im öffentlichen Nahverkehr 20 Mio. Euro bereitgestellt. Die Förderung erfolgt dabei als Investitionszuschuss. Dieser berechnet sich auf Grundlage der Investitionsmehrkosten zur Erreichung der Umweltziele des Förderprogramms (z. B. CO<sub>2</sub>-Minderung mindestens 20 %) [BMU 2009]. Die zukünftigen Förderprogramme werden sich auf rein elektrisch-betriebene Busse konzentrieren; die Förderung von Diesel-Hybridbussen ist derzeit nicht vorgesehen.

Die oben durchgeführten vereinfachten Lebenszykluskostenanalysen zeigen, dass durch eine Reduktion der Mehrkosten bei der Anschaffung von Hybridbussen auf 25 % die Wirtschaftlichkeit bereits gegeben ist. Wird unterstellt, dass heute die Mehrkosten für Solobusse bei bis zu 70 %, die von Gelenkbussen bei bis zu 100 % liegen und zudem die ÖPNV-Unternehmen aus Marketinggründen auch bereit sind in den Anfangsjahren geringfügig eine Kostenunterdeckung zu akzeptieren (z. B. 5 % der Mehrkosten), müsste ein staatliches Förderprogramm die Differenz zwischen den von den ÖPNV-Unternehmen getragenen Mehrkosten (z. B. 30 %) und den realen Mehrkosten decken. Geht man zudem davon aus, dass sich die Mehrkosten bis 2020 auf 25 % bis 30 % einpendeln, wäre ein jährliches Fördervolumen von rund 25 bis 30 Mio. Euro notwendig, um die Einführung der Hybridbusse für ÖPNV-Unternehmen wirtschaftlich vertretbar zu gestalten. Die konkrete Auswirkung dieser Förderpolitik wäre, dass sich die Marktentwicklung nach dem Gompertz-Wachstumsmodell fünf Jahre nach vorne schieben würde. Die Fördersumme, die sich durch diese schnellere Einführung der Hybridfahrzeuge ergeben würde, wäre unter Berücksichtigung der sinkenden Mehrkosten über das oben genannte Volumen des Förderprogramms gedeckt. Durch diese schnellere Einführung würde der Anteil der Hybridfahrzeuge an den Neuzulassungen im Jahr 2020 bereits bei einem Drittel, im Jahr 2030 bei rund zwei Drittel liegen. Im Busbestand des Jahres 2020 bzw. 2030 hätten die Hybridbusse bereits einen Anteil von knapp unter 9 % bzw. 40 % (rund 5.000 bzw. 20.000 Fahrzeuge). Für das „Effizienzscenario hoch“ wurde diese Marktentwicklung unterstellt. Die Entwicklung des Busbestandes bis 2030 differenziert nach den Antriebskonzepten ist in Abbildung 62 dargestellt. Wie im „Effizienzscenario mittel“ werden die Erdgasbusse durch die Hybridbusse verdrängt.



**Abbildung 62 Entwicklung des Busbestandes (einschließlich vorübergehend abgemeldeter Fahrzeuge) in Deutschland im Zeitraum von 2008 bis 2030 differenziert nach Größenklassen und Antriebskonzepten im „Effizienzscenario hoch“ [eigene Berechnungen]**

Für die Entwicklung der Kraftstoffkosten wurden in allen Szenarien die gleichen Werte zugrunde gelegt, wie sie auch im Referenzszenario verwendet wurden (siehe Kapitel 5.1 und Tabelle 20). Die Werte basieren auf dem Referenzszenario der Studie „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ [Prognos et al. 2010].

Bei der Strompreisentwicklung ergibt sich aber eine Unterscheidung: In den reinen Energieeffizienzszenarien mittel und hoch werden wie im Referenzszenario die identischen Strompreisentwicklungen (und auch die Treibhausgasminderungen, siehe Kapitel 6.4.3) übernommen (siehe auch Tabelle 20). Für die Effizienzszenarien hoch und mittel in Kombination mit dem Ausbau erneuerbarer Energie, wie sie in diesem Kapitel zusätzlich betrachtet werden sollen, ist mit steigenden Strompreisen zu rechnen. Entsprechend den in Kapitel 6.4.3 aufgeführten Qualitäten in Bezug auf erneuerbare Energien und Anforderungen an die Stromproduktion der konventionellen Kraftwerke, ist mit einem Preisanstieg gegenüber 2008 bis 2020 von 2,7 €-Cent pro kWh Strom (zu konstanten Preisen von 2008) zu rechnen. Im Vergleich zur Referenzentwicklung im Jahr 2020 ist dies ein Plus von rund 2 €-Cent pro kWh Strom (siehe Tabelle 20). Basis für die Kosteneinschätzungen ist die BMU-Leitstudie zum Ausbau erneuerbarer Energie, wobei für die fossilen Energieträger nur ein moderater Energiepreisanstieg unterstellt wurde [DLR et al. 2010].

Durch den frühzeitigen Umstieg auf hohe Anteile erneuerbarer Energien bei der Stromproduktion sinken mittelfristig die Betriebskosten und machen die Stromproduktion unabhängiger von den Preisentwicklungen der fossilen Energieträger. Nach der BMU-Leitstudie wird daher erwartet, dass bis 2030 die Strompreise wieder sinken könnten. Im Vergleich zur Strompreisentwicklung ohne Ausbau erneuerbarer Energien würde dann der Strompreis 2030 niedriger liegen (siehe Tabelle 20). Verkürzt könnte man also sagen, dass ÖPNV-Unternehmen, die frühzeitig gemeinsam mit ihrem Energieversorger auf erneuerbare Energien umsteigen, kurz- und mittelfristig deutlich höhere Stromkosten haben werden, dass aber langfristig (allerdings nach 2030 und damit außerhalb des Betrachtungszeitraums der Szenarien) der Umstieg Kostenvorteile haben wird.

Kenngröße	Einheit	2008	2020	Δ 2020/08	2030	Δ 2030/08
<b>Effizienzscenario mittel und hoch</b>						
Strom	€ <sub>2008</sub> /kWh	0,110	0,118	7%	0,121	10%
Diesel	€ <sub>2008</sub> /Liter	0,95	1,11	17%	1,25	32%
Erdgas	€ <sub>2008</sub> /kg	0,80	1,15	44%	1,53	91%
<b>Effizienzscenario mittel und hoch + erneuerbare Energie</b>						
Strom	€ <sub>2008</sub> /kWh	0,110	0,137	25%	0,119	8%
Diesel	€ <sub>2008</sub> /Liter	0,95	1,11	17%	1,25	32%
Erdgas	€ <sub>2008</sub> /kg	0,80	1,15	44%	1,53	91%
<b>Quellen:</b> [Prognos et al. 2010]; [DLR et al. 2010]; [IWES et al. 2011]; eigene Berechnungen.						

**Tabelle 20 Entwicklung der Preise für Fahrstrom und Kraftstoffe im Zeitraum 2008 bis 2030 auf Preisbasis 2008 in den Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien**

## 6.2 Energieeffizienz im Szenario Energieeffizienz und erneuerbare Energien

Im Folgenden wird beschreiben, in welchen Punkten sich die beiden Szenarien Energieeffizienz mittel und Energieeffizienz hoch genau unterscheiden. Dabei wird wiederum zwischen dem ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren und dem elektrisch betriebenen ÖPNV unterschieden.

### 6.2.1 ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, unterscheiden sich die Szenarien Energieeffizienz mittel und hoch für den Busbereich lediglich in der Struktur des Fahrzeugbestandes. Im Szenario „Energieeffizienz hoch“ sind nochmals deutlich mehr Hybridfahrzeuge im Bestand als im Szenario „Energieeffizienz mittel“. Beide Effizienzscenario unterscheiden sich aber nicht in den erreichbaren Kraftstoffminderungen innerhalb einer Technologie (z.B. Dieselfahrzeug, Hybrid- oder Erdgasbus).

Maßnahmenbereich	Szenarien Energieeffizienz mittel und hoch	
	Realisierter Anteil des Maximal- potentials	Minderung bzw. Mehr- verbrauch <sup>2)</sup>
<b>Maßnahmenwirkung 2020</b>		
Energetische Optimierung von Motor und Getriebe	100,0 %	-5,0 %
Techn. Maßnahmen zur Beeinflussung des Fahrerverhaltens	25,0 %	-2,5 %
Verbesserung der Energieeffizienz der Klimaanlage	50,0 %	-2,5 %
Energetische Optimierung der Nebenaggregate	50,0 %	-2,5 %
Mehrverbrauch durch gegenläufige Entwicklungen		+2,5 %
<b>Gesamtwirkung<sup>1)</sup></b>		<b>-9,7 %</b>
<b>Maßnahmenwirkung 2030</b>		
Energetische Optimierung von Motor und Getriebe	50,0 %	-7,5 %
Techn. Maßnahmen zur Beeinflussung des Fahrerverhaltens	25,0 %	-3,8 %
Verbesserung der Energieeffizienz der Klimaanlage	50,0 %	-2,5 %
Energetische Optimierung der Nebenaggregate	100,0 %	-5,0 %
Mehrverbrauch durch gegenläufige Entwicklungen		+2,5%
<b>Gesamtwirkung<sup>1)</sup></b>		<b>-15,5 %</b>
<sup>1)</sup> Die Gesamtwirkung der Einzelmaßnahmen ist nicht die Summe der Wirkungen der Einzelmaßnahmen. Die Gesamtwirkung ergibt sich durch Multiplikation der Einsparungen bzw. Mehrverbräuche. <sup>2)</sup> Die Verbrauchsminderung und der Mehrverbrauch beziehen sich auf den Gesamtverbrauch der Fahrzeuge in l/100 km. <b>Quellen:</b> [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]; eigene Berechnungen.		

**Tabelle 21 Kraftstoffeinsparungen bzw. Mehrverbrauch einzelner Maßnahmen für neu zugelassene Linienbusse in den Jahren 2020 und 2030 im Vergleich zu heutigen Dieselbussen (bezogen auf den Verbrauch in l/100 km) in den beiden Energieeffizienzscenarien**

Zur Ableitung der Kraftstoffminderungen in den beiden Effizienzscenarien wird grundsätzlich analog vorgegangen, wie es in Kapitel 5.2.1 für das Referenzszenario beschreiben ist. Es werden daher für die konventionellen Dieselbusse wiederum die gleichen maximalen Kraftstoffminderungspotentiale für die einzelnen Maßnahmenbausteine wie im Referenzszenario (siehe Abbildung 45) angenommen. Im Gegensatz zum Referenzszenario wird allerdings angenommen, dass es – wie beschrieben – zusätzliche Bemühungen gibt, die Energieeffizienz im ÖPNV zu erhöhen, um langfristig die Kosten und Treibhausgasemissionen zu senken. Diese Bemühungen spiegeln sich in höheren vom Maximalpotential erzielten Anteilen wider. Diese Anteile und die sich daraus ergebenden Kraftstoffverbrauchsminderungen bezogen auf den Verbrauch pro Bus-km eines heutigen Dieselbusses sind für die Jahre 2020 und 2030 in Tabelle 21 aufgeführt.

Aus Tabelle 21 geht hervor, dass die maximal möglichen Energieeinsparpotentiale zu einem deutlich höheren Anteil als im Referenzszenario ausgeschöpft werden. Weiterhin ist ersichtlich, dass auch im Effizienzscenario nicht davon ausgegangen wird, dass in allen Bereichen stets das maximale Potential erreicht wird. Für die Entwicklung von 2020 bis 2030 wird vor allem eine Effizienzsteigerung in den Bereichen der Motor- und Getriebeentwicklung und bei den Nebenaggregaten gesehen. Für den Zeitraum nach 2020 werden für den Bereich Motor- und Getriebeoptimierung von größeren Steigerungen hinsichtlich des maximalen Potentials ausgegangen, von dem dann allerdings nicht wie in 2020 100 % erschlossen werden können. Auch in den Effizienzscenarien wird ein möglicher zusätzlicher Verbrauch berücksichtigt. Für 2020 entspricht dieser mit 2,5 % dem Wert im Referenzszenario, für 2030 wird hingegen keine weitere Zunahme unterstellt. Insgesamt ergeben sich für neu zugelassene Dieselbusse für den ÖPNV in den beiden Effizienzscenarien mittel und hoch Kraftstoffeinsparungen von rund 9,7 % im Jahr 2020 und von rund 15,5 % im Jahr 2030.

Tabelle 22 zeigt die Gesamt-Kraftstoffeinsparungen für Linienbusse mit Dieselmotor und für Diesel-Hybridbusse im Vergleich zu einem heutigen Dieselbus (bezogen auf den Verbrauch in l/100 km) sowie für Linienbusse mit Erdgasmotor im Vergleich zu einem heutigen Erdgasbus (bezogen auf den Verbrauch in kg/100 km), wie sie in den Energieeffizienzscenarien verwendet werden. Für Linienbusse mit Erdgasmotor wird im Vergleich zum Dieselbus von leicht niedrigeren Einsparpotentialen ausgegangen. Für die Diesel-Hybridbusse wird ebenfalls von den Effizienzpotentialen ausgegangen, die aber den Werten im Referenzszenario entsprechen (25 % in 2020; 30 % in 2030).

Fahrzeugkonzept	Neuzulassungen 2020	Neuzulassungen 2030
	%	%
Busse mit Dieselmotor	- 9,7 %	-15,5 %
Linienbusse mit Erdgasmotor	- 9,0 %	- 13,0 %
Diesel-Hybridbusse	-25,0 %	-30,0 %

**Quellen:** [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]; eigene Berechnungen.

**Tabelle 22 Kraftstoffeinsparungen für in den Jahren 2020 und 2030 neu zugelassene Linienbusse mit Diesel- und Erdgasmotor sowie Diesel-Hybridbusse im Vergleich zu heutigen Dieselbussen im Szenario Energieeffizienz und erneuerbare Energien bezogen auf den Gesamtverbrauch in l/100 km**

Aufgrund der teilweise deutlich höheren Ausschöpfungen der Maximalpotentiale der Effizienzmaßnahmen muss im Gegensatz zum Referenzszenario bei den in Tabelle 22 aufgeführten Werten von Mehrkosten bei der Fahrzeugbeschaffung ausgegangen werden. Allerdings werden die Mehrkosten sich innerhalb der Nutzungsdauer der Fahrzeuge durchweg amortisieren.

Die in Tabelle 22 aufgeführten Werte werden im weiteren Vorgehen in das Bus-Bestandsmodell eingespeist, um die Entwicklung der Energieeffizienz der gesamten Busflotte zu bestimmen (siehe Kapitel 5.2.1). Die Ergebnisse dieser Modellierung für den Energieverbrauch des ÖPNV werden in Kapitel 6.4 vorgestellt.

### **6.2.2 Elektrisch betriebener ÖPNV**

Das Szenario Energieeffizienz soll nicht das realisierbare Maximum aller Maßnahmen und Synergieeffekte abbilden, sondern orientiert sich an wirtschaftlich sinnvollen und darüber hinaus an besonders wirksamen Maßnahmen. Außerdem wird berücksichtigt, dass nicht jede Maßnahme auf jeder Strecke bzw. jedem Netz die bisher im Rahmen von Tests ermittelten Effizienzpotentiale erzielen kann. Der Ansatz hinsichtlich der Altersstruktur der Fahrzeugflotte im elektrisch betriebenen ÖPNV und der Fahrzeuganzahl bleibt im Vergleich zum Referenzszenario identisch. Unterschieden wird - wie beim Referenzszenario - zwischen Straßenbahnen und U-Bahnen, da hier auch die Differenzen im Stromverbrauch der Infrastruktur beider Verkehrssysteme berücksichtigt werden müssen. Folgende Maßnahmen werden im Szenario Energieeffizienz fahrzeugseitig als umgesetzt betrachtet: Die Bestandsfahrzeuge, die im Jahr 2010 nicht älter als 10 Jahre sind, erhalten im Rahmen der Überholung bedarfsgerecht gesteuerte Klimaanlage. Gleiches gilt für Neufahrzeuge, die nach dem Jahr 2020 zugelassen werden. Die Bestandsfahrzeuge, die im Jahr 2010 nicht älter als 20 Jahre sind, erhalten größtenteils Außentemperatur gesteuerte Dachklimaanlagen. Diese Annahme wird auch auf Neufahrzeuge, die zwischen 2010 und 2020 zugelassen werden, getroffen. Die Neufahrzeuge, die nach dem Jahr 2020 verfügbar sein werden, erhalten Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen und nutzen Abwärmerückgewinnung zur Effizienzsteigerung. Daraus ergeben sich folgende Konsequenzen: Der Energiebedarf der Bestandsfahrzeuge, wie der Neufahrzeuge mit einer Zulassung zwischen 2010 und 2020 wird dadurch negativ beeinflusst.

An den Fahrwerken der Bestandsfahrzeuge werden keine nennenswerten Änderungen zur Verringerung des Fahrwiderstands vorgenommen. Bei Neufahrzeugen, die nach dem Jahr 2020 zum Einsatz kommen, wird erwartet, dass der Bogenwiderstand signifikant geringer sein wird. Damit werden Änderungen des Fahrstromverbrauchs ab Unterwerk von 2 % prognostiziert.

Es wird nicht davon ausgegangen, dass Bestandsfahrzeuge, die über Gleichstromtraktionsmotoren verfügen auf Wechselstromtraktionsmotoren umgerüstet werden. Diese Bauart von Traktionsmotoren wird aber ab dem Jahr 2020 flächendeckend im Einsatz sein, zugleich mit der Verbreitung von IGBT-Umrichtern in der Fahrzeugflotte. Dazu kommt,

Schlussbericht

dass die ab dem Jahr 2020 eingeführten Neufahrzeuge über Energiespeicher an Bord verfügen werden. Eine Nachrüstung von Fahrzeugen, die im Jahr 2010 älter als 10 Jahre waren, gilt als sehr unwahrscheinlich.

Die Effizienzgewinne durch Leichtbau werden mit 0,9 % ab Unterwerk berücksichtigt.

Betriebliche Maßnahmen werden wie folgt berücksichtigt: Der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen zur Unterstützung energiesparender Fahrweisen wird sehr stark verbreitet sein. Zum Teil werden das Einzelfahrzeug optimierende und zum Teil netzweit optimierende Systeme sein. Die Fahrplangestaltung erfolgt unter verstärkter Berücksichtigung folgender Randbedingung: Vorrangschaltungen bei Straßenbahnen führen zur Nutzung von Pufferzeiten. Leistungsfähigere Leit- und Sicherungssysteme werden genutzt, um die Zugfolge verdichten zu können. Damit steigt die Anzahl von Fahrzeugen innerhalb eines Speiseabschnitts mit positiven Effekten auf die Rückspeisefähigkeit. Bei gleichzeitiger Verwendung der Energiespeicher in den Fahrzeugen steigt aber die Netzbelastung nicht im gleichen Maß, was die Effizienz des Systems Schiene weiter steigert.

Für die Infrastruktur und Fahrzeuge in der Abstellung werden folgende Maßnahmen als umgesetzt angesehen: So weit möglich werden die Fahrzeuge während der Abstellung vom Netz getrennt und erst mit dem Vorheizen ca. 30 min vor Einsatzbeginn wieder mit dem Fahrdraht verbunden. In Verbindung mit Fördermaßnahmen und im Fall, dass die Verkehrsunternehmen an den Betriebshöfen dies realisieren können, werden Kalthallen zu geringeren Energieverbräuchen im Winter führen.

Die Prognose zur Effizienzsteigerung umfasst die flächendeckende Erhöhung der Fahrdrahtspannung und die Vermaschung der Versorgungsnetze in Längs- und Querrichtung. Der Einsatz von rückspeisefähigen Unterwerken ist zwar besonders wünschenswert, weil dadurch auch die öffentlichen Versorgungsnetze entlastet werden können, allerdings wird bis zum Jahr 2030 kein flächendeckender Einsatz erwartet. Bei unterirdischen Haltestellen und anderen U-Bahnanlagen wird im Effizienzscenario davon ausgegangen, dass die Weiterentwicklung der Standards in der Gebäudetechnik mit vollzogen wird. Entsprechende Maßnahmen wären zum Beispiel neben bedarfsgerechter Steuerung von Heizung und Lüftung die Abwärmenutzung und der Einsatz von Wärmepumpen und Geothermie in unterirdischen Haltestellen. Der Effizienzgewinn, der aus den Infrastrukturmaßnahmen resultiert, wird mit ca. 11 bis 20% des Gesamtverbrauchs der Infrastruktureinrichtungen quantifiziert, je nachdem wie groß der Anteil an unterirdischen Haltestellen ist.

Die Summe aller Maßnahmen führt zu dem Verlauf des spezifischen Fahrstromverbrauches pro Platzkilometer im Zeitraum von 2010 bis 2030, dargestellt in der Abbildung 44.

Wenn die skizzierten Maßnahmen mit dem im Exkurs in Kapitel 5.1 dargestellten Erneuerungsprofil der Fahrzeuge kombiniert werden, ergibt sich die in Tabelle 23 quantitativ aufgelistete Verbrauchsminderung.

Fahrzeugkonzept	Bestand 2020	Bestand 2030
	%	%
<b>Minderung gegenüber 2008</b>		
Straßen- und Stadtbahnen	-4,9%	-9,9%
U-Bahnen	-5,2%	-11,6%
<b>Minderung gegenüber 2010</b>		
Straßen- und Stadtbahnen	-5,0%	-10,0%
U-Bahnen	-6,4%	-12,7%
<b>Quellen:</b> [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]; eigene Berechnungen.		

**Tabelle 23 Stromeinsparungen der gesamten Flotte an Straßen-, Stadt- und U-Bahnen in Deutschland in den Jahren 2020 und 2030 im „Effizienzzenario mittel“ im Vergleich zu 2008 bzw. 2010**

## 6.3 Erneuerbare Energien im Szenario Energieeffizienz und erneuerbare Energien

Inwieweit zusätzlich zu den beiden im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Szenarien „Effizienz mittel und „Effizienz hoch“ noch erneuerbare Energien zum Einsatz kommen, wird für den ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren in Kapitel 6.3.1 und für den elektrisch betriebenen ÖPNV in Kapitel 6.3.2 erläutert.

### 6.3.1 ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren

Wie bereits eingangs zu diesem Kapitel beschrieben, ist der Einsatz von Biokraftstoffen in Reinbetankung mit sehr hohen Zusatzkosten für die ÖPNV-Unternehmen verbunden. Aus diesem Grund wird für beide Effizienzsznarien davon ausgegangen, dass analog zum Referenzszenario nur Biokraftstoffe als Beimischung zum konventionellen Diesel verwendet werden.

Die Beimischungsquoten sowie die Treibhausgasminderungen des beigemischten Biokraftstoffs werden in den Effizienzsznarien analog angesetzt wie im Referenzszenario. Die verwendeten Beimischungsquoten wie auch die Treibhausgasminderungen der Biokraftstoffe können daher dem Kapitel 5.3 entnommen werden.

### 6.3.2 Elektrisch betriebener ÖPNV

Für den elektrisch betriebenen ÖPNV werden zwei Fälle unterschieden:

- **Fall 1:** Die Verkehrsunternehmen beziehen wie im Referenzszenario keinen besonders klimafreundlichen Strom und partizipieren lediglich indirekt vom Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. Im Rahmen dieses Kapitels wird untersucht, welche Auswirkungen die Kombination der beiden Energieeffizienzsznarien (Effizienz mittel und Effizienz hoch) mit der durchschnittlichen Verbesserung der deutschen Stromproduktion hat. Die Treibhausgasemissionen pro verbrauchte kWh Strom entsprechen damit exakt denen des Referenzszenarios (siehe Tabelle 24), allerdings sind in den Effizienzsznarien die Energieverbräuche des elektrisch betriebenen ÖPNV deutlich niedriger als im Referenzszenario.
- **Fall 2:** Die ÖPNV-Unternehmen richten bewusst mit dem Energieversorger ihre Stromversorgung auf erneuerbare Energie aus. Konkret bedeutet dies, dass der Energieversorger für die ÖPNV-Unternehmen gezielt Anlagen zur Erzeugung erneuerbaren Stroms bauen muss. Damit die Anlagen nicht über die EEG-Umlage allen Stromkunden zu Gute kommen, bedeutet dies, dass diese Anlagen ohne Förderung des EEG errichtet werden müssen (siehe Kapitel 4.2.2). Dies führt einerseits dazu, dass der Anteil erneuerbarer Energie am Strommix für die ÖPNV-Unternehmen schneller steigt als deren Anteil bei der bundesdeutschen Stromproduktion. Dies führt andererseits dazu, dass die Treibhausgasemissionen pro produzierter kWh Strom niedriger sind, vorausgesetzt der konventionelle Kraftwerksmix wird ebenfalls nicht allein unter betriebswirtschaftlichen Aspekten, sondern auch unter Berücksichtigung von Klimaschutzzielen gesteuert. Andererseits führt diese Variante zu Mehrkosten – allerdings nur kurz- bis mittelfristig, da

Schlussbericht

sich die ÖPNV-Unternehmen von der Preisentwicklung fossiler Energieträger unabhängiger machen und gleichzeitig von den geringeren Betriebskosten der Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien profitieren.

Im Rahmen dieses Szenarios wird unterstellt, dass die ÖPNV-Unternehmen Strom nutzen, der die Anteile erneuerbarer Energien für 2020 und 2030 erreicht, wie sie in der BMU-Leitstudie zum Ausbau der erneuerbaren Energie angegeben sind (siehe Tabelle 24). Im konventionellen Kraftwerkspark werden die Kraftwerke unter Klimagesichtspunkten optimiert eingesetzt. Für diesen Strom werden im Jahr 2020 Treibhausgasemissionen in Höhe von 388 g und im Jahr 2030 in Höhe von 221 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro kWh Strom berechnet [DLR et al. 2010; Öko-Institut et al. 2011]. Die spezifischen Treibhausgasemissionen liegen damit im Jahr 2020 um rund 31 % und im Jahr 2030 rund 49 % niedriger als im Fall 1. Dieser Umbau wird sich allerdings in Strompreiserhöhungen bis 2020 in Höhe von fast 3 €-Cent pro kWh Strom niederschlagen (zu Preisen von 2008) [DLR et al. 2010]. Bereits 2030 liegen die Stromkosten unter denen des Falls 1.

Da viele ÖPNV-Unternehmen mit Stadtwerken unter einem Dach organisiert sind, kann davon ausgegangen werden, dass dieser gezielte Umbau des Strommixes hin zu einer stark an erneuerbaren Energien ausgerichteten Produktion durchaus auch möglich sein kann. In den weiteren Betrachtungen wird zusätzlich zum Fall 1 auch der Fall 2 untersucht. In diesen Fällen wird dann jeweils von den Szenarien „Effizienz mittel + erneuerbare Energien“ bzw. „Effizienz hoch + erneuerbare Energien“ gesprochen. Fehlt der Zusatz „+ erneuerbare Energien“, handelt es sich immer um den Fall 1.

Größe	Einheit	2020		2030	
		Effizienz-szenario mittel/hoch (Fall 1) <sup>1)</sup>	Effizienz-szenario mittel/hoch + erneuerbare Energien (Fall 2) <sup>2)</sup>	Effizienz-szenario mittel/hoch (Fall 1) <sup>1)</sup>	Effizienz-szenario mittel/hoch + erneuerbare Energien (Fall 2) <sup>2)</sup>
Anteil erneuerbare Energien	%	34 %	47 %	45 %	67 %
CO <sub>2</sub> -Emissionen	g CO <sub>2</sub> /kWh	541	365	410	203
CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen	g CO <sub>2</sub> e/kWh	566	388	432	221
<sup>1)</sup> Entspricht dem Referenzszenario dieser Studie und basiert auf [Prognos et al. 2010]. – <sup>2)</sup> Basiert auf der BMU-Leitstudie 2010 [DLR et al. 2010]. <b>Quellen:</b> [Prognos et al. 2010]; [DLR et al. 2010]; [GEMIS 4.7]; eigene Berechnungen.					

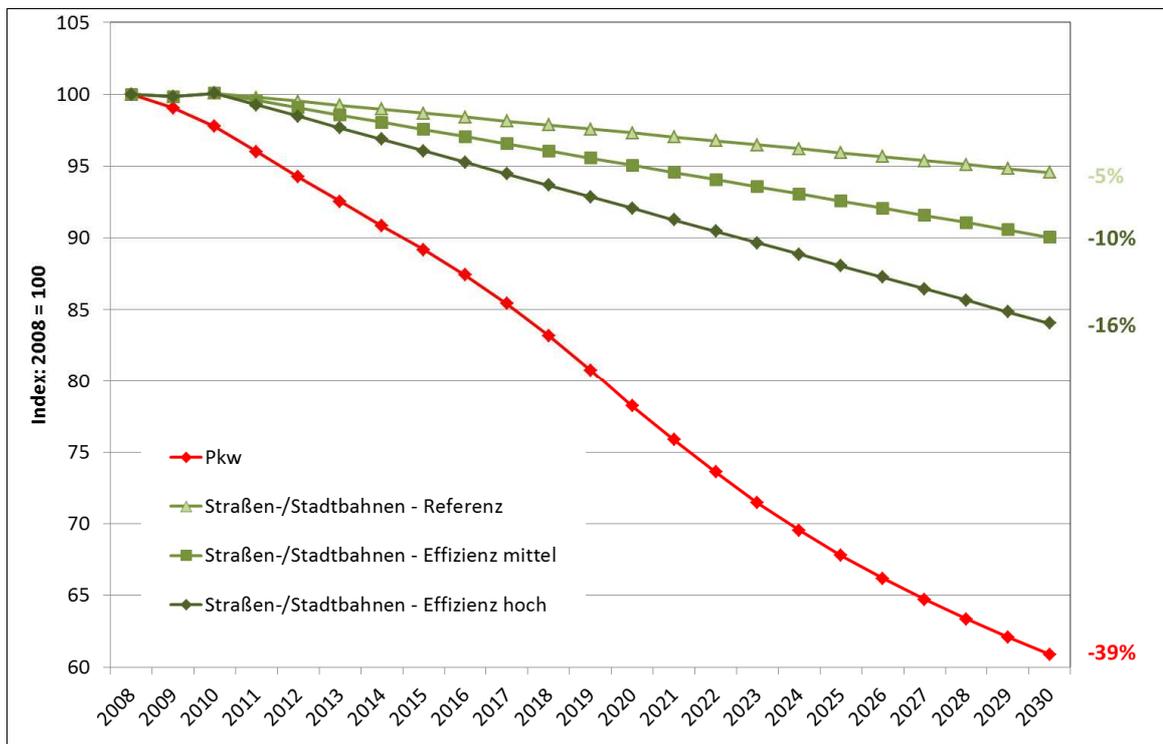
**Tabelle 24 CO<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionsfaktoren für Strom in den Jahren 2020 und 2030 einschließlich Verteilungsverluste in den Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien**

## **6.4 Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Energiekosten im Szenario Energieeffizienz und erneuerbare Energien bis 2030**

### **6.4.1 Energieverbrauch**

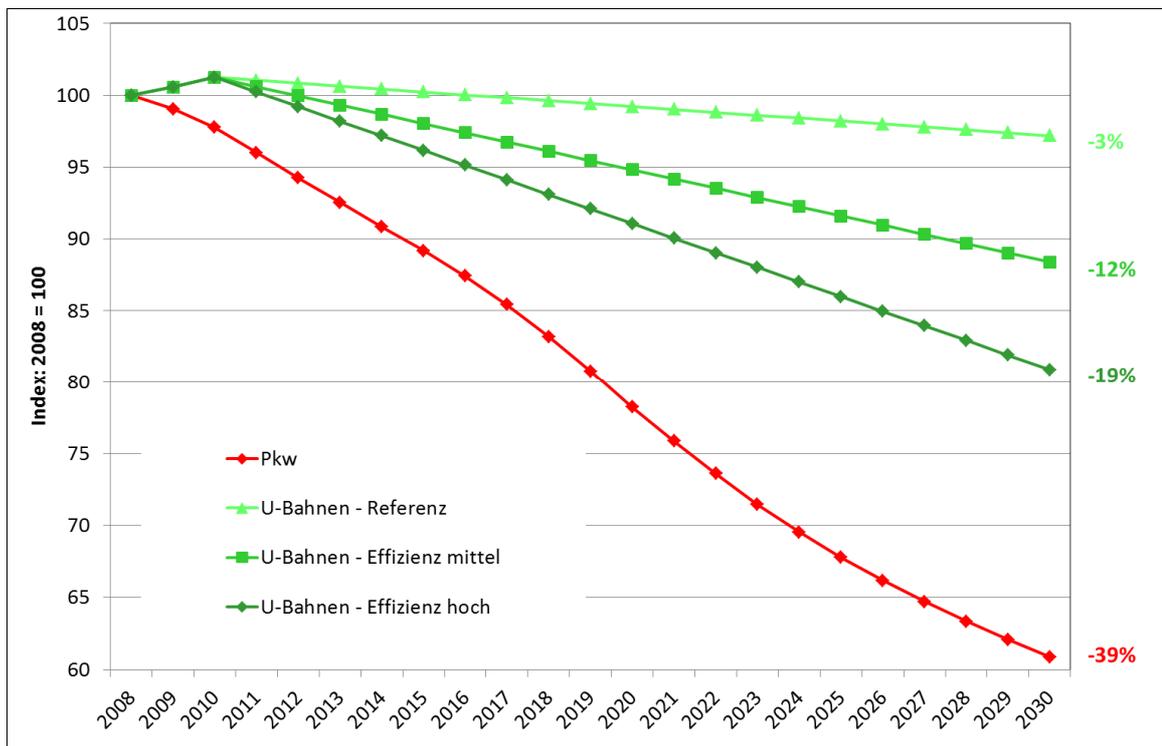
Analog zum Referenzszenario werden im Folgenden für die beiden Effizienzszenarien („mittel“ und „hoch“) die Entwicklung der Einsparung des Energieverbrauchs auf Basis der spezifischen Werte pro Platz-Kilometer für den Zeitraum 2008 bis 2030 analysiert. Dabei werden die Effizienzgewinne – getrennt für jedes Verkehrsmittel des ÖPNV – einerseits mit der dem Effizienzgewinn der Referenzentwicklung, zum anderen mit der Entwicklung des spezifischen Verbrauchs des Pkw-Verkehrs pro Platz-km verglichen. Damit die erzielten Minderungen bis 2030 besser erkennbar sind, werden die Entwicklungen bezogen auf 2008 dargestellt (Index: 2008 = 100).

Abbildung 63 zeigt die auf 2008 bezogene Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km für Straßen- und Stadtbahnen. Im Vergleich zur Referenzentwicklung, bei der eine Minderung des spezifischen Endenergieverbrauchs von 3 % bis 2020 und 5 % bis 2030 erreicht wurde, liegen die Einsparungen in den beiden Energieeffizienzszenarien deutlich höher. Im „Effizienzscenario mittel“ konnte im Vergleich zu 2008 der Endenergieverbrauch um 5 % (2020) bzw. 10 % (2030), im „Effizienzscenario hoch“ um 8 % (2020) bzw. 16 % (2030) gegenüber 2008 gesenkt werden. Der Vergleich zum Pkw-Verkehr zeigt, dass die Effizienzsteigerung der Straßen- und Stadtbahnen selbst bei unterstellter hoher Effizienz deutlich hinter dem Auto zurück bleiben. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass Straßen- und Stadtbahnen durchschnittlich viel länger genutzt werden als Pkw. Dies hat aber zur Folge, dass sich im Bestand energiesparsame Neufahrzeuge viel langsamer durchsetzen als bei den Pkw. Aufgrund der langen Nutzungsdauern ist es daher umso wichtiger, frühzeitig energieeffiziente Bahnen zu beschaffen.



**Abbildung 63 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km von Straßen-/Stadtbahnen 2008 bis 2030 im Referenzszenario sowie in den Energieeffizienzszenarios im Vergleich zum Pkw [eigene Berechnungen]**

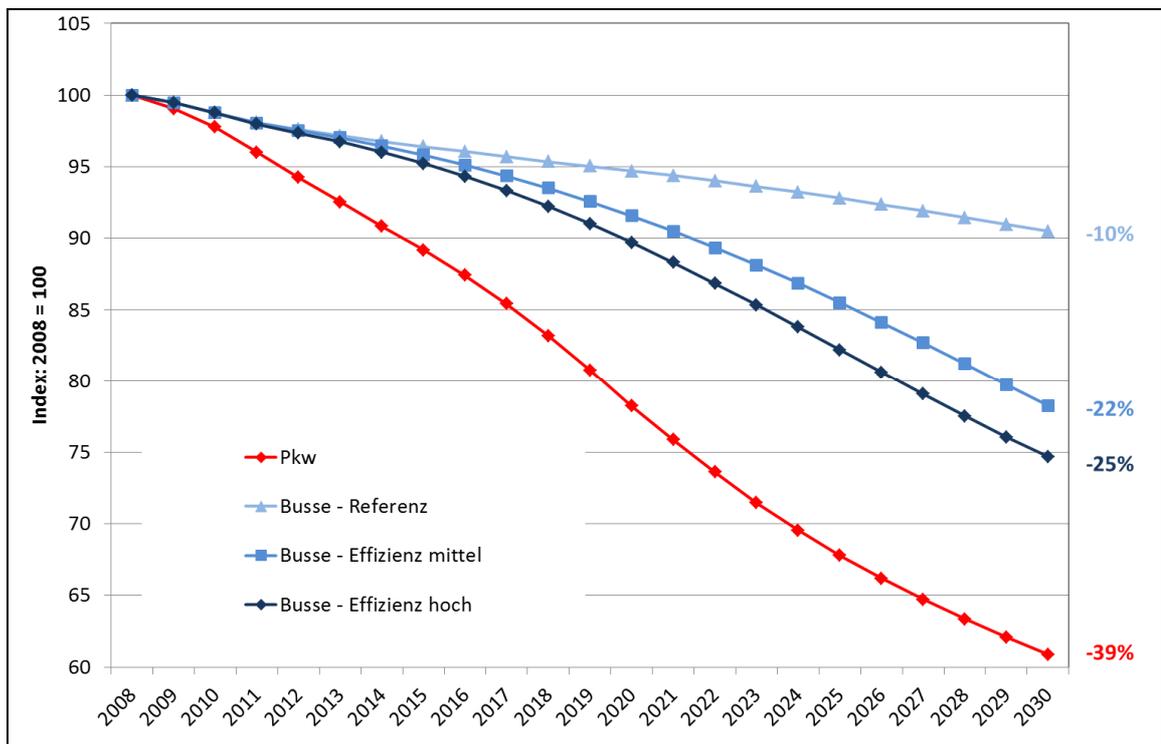
Abbildung 64 zeigt die auf 2008 bezogene Entwicklung des Endenergieverbrauchs pro Platz-km für die U-Bahnen. Während im Referenzszenario die Rückgänge des spezifischen Endenergieverbrauchs eher gering ausfielen, liegen die Werte für die beiden Effizienzszenarios über denen der Straßen- und Stadtbahnen. Während sich der spezifische Endenergieverbrauch der U-Bahnen im Referenzszenario bis 2020 lediglich um 1 % und bis 2030 um 3 % verringerte, fällt die Minderung im „EffizienzszENARIO mittel“ mit 5 % (2020) bzw. 12 % (2030) deutlich höher aus. Im „EffizienzszENARIO hoch“ wird gegenüber 2008 sogar eine Reduktion um 9 % (2020) bzw. 19 % (2030) erreicht. Die hohen Energieeinsparungen zeigen, dass gerade im U-Bahnbereich viele noch nicht genutzte Effizienzpotentiale erschlossen werden können, wenn die ÖPNV-Unternehmen eine aktive, auf Energieeinsparen ausgerichtete Unternehmenspolitik verfolgen.



**Abbildung 64 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km von U-Bahnen 2008 bis 2030 im Referenzszenario sowie in den Energieeffizienzszenarien im Vergleich zum Pkw [eigene Berechnungen]**

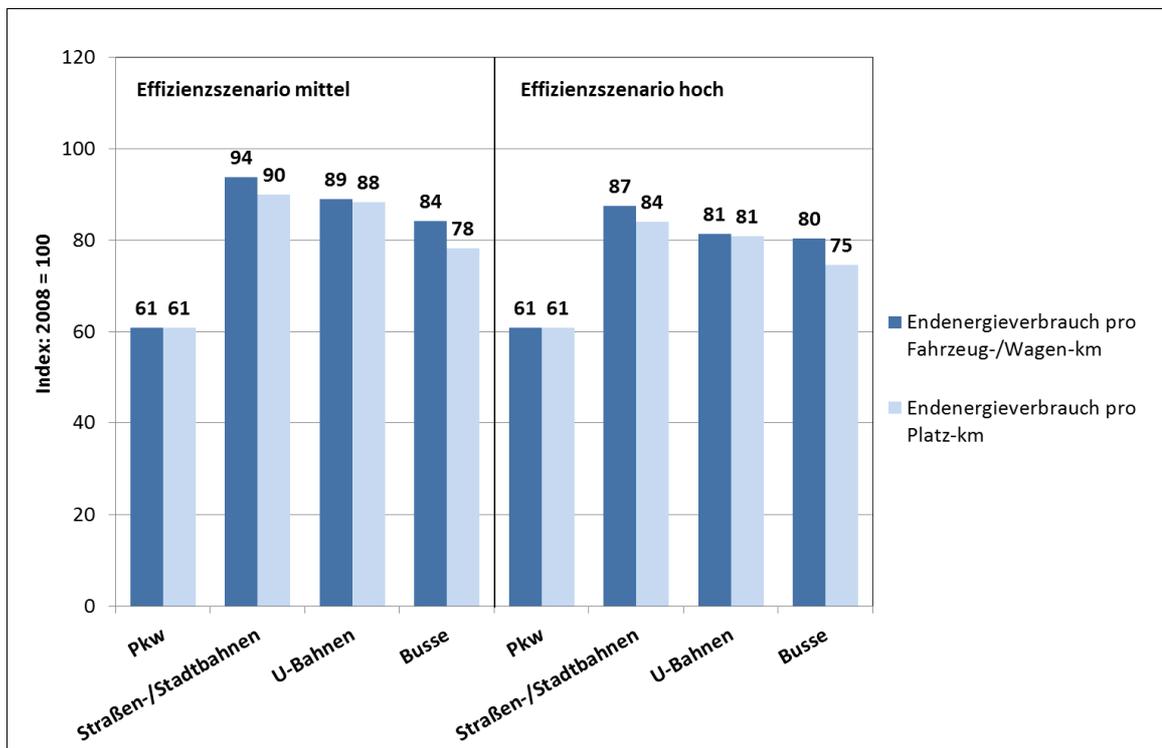
Im Busbereich, das zeigt Abbildung 65, sind von allen ÖPNV-Verkehrsmitteln die höchsten Verbesserungen beim spezifischen Energieverbrauch in beiden Energieeffizienzszenarien bis 2030 zu verbuchen. Die Senkung des spezifischen Verbrauchs pro Platz-km in Höhe von 8 % bzw. 22 % im „Szenario mittel“ und 10 % bzw. 25 % im Szenario „Effizienz hoch“ bis 2020 bzw. 2030 gegenüber 2008 sind beachtlich. Eine Ursache sind die im Vergleich zu Straßen-, Stadt- und U-Bahnen kürzere Haltedauern, weshalb energieeffiziente Neufahrzeuge in den Bestand kommen. Zum anderen werden mit neuen Fahrzeugen deutlich mehr Kilometer pro Jahr zurückgelegt als mit alten Bussen. Auch dies trägt dazu bei, dass Effizienzverbesserungen sich schneller in der Busflotte bemerkbar machen. Aber auch die erzielten Effizienzverbesserungen beim Bus liegen deutlich hinter denen, die vom Pkw bis 2030 erzielt werden.

Weiterhin ist auffällig, dass trotz des deutlich höheren Anteils an Hybridfahrzeugen im Bestand (20.000 statt 11.700 Busse in 2030) die Energieeffizienz im Szenario „Effizienz hoch“ nur geringfügig besser ist als im Szenario „Effizienz mittel“. Ursache ist, dass auch der Verbrauch von konventionellen Dieselnbussen in den beiden Effizienzszenarien deutlich gesunken ist.



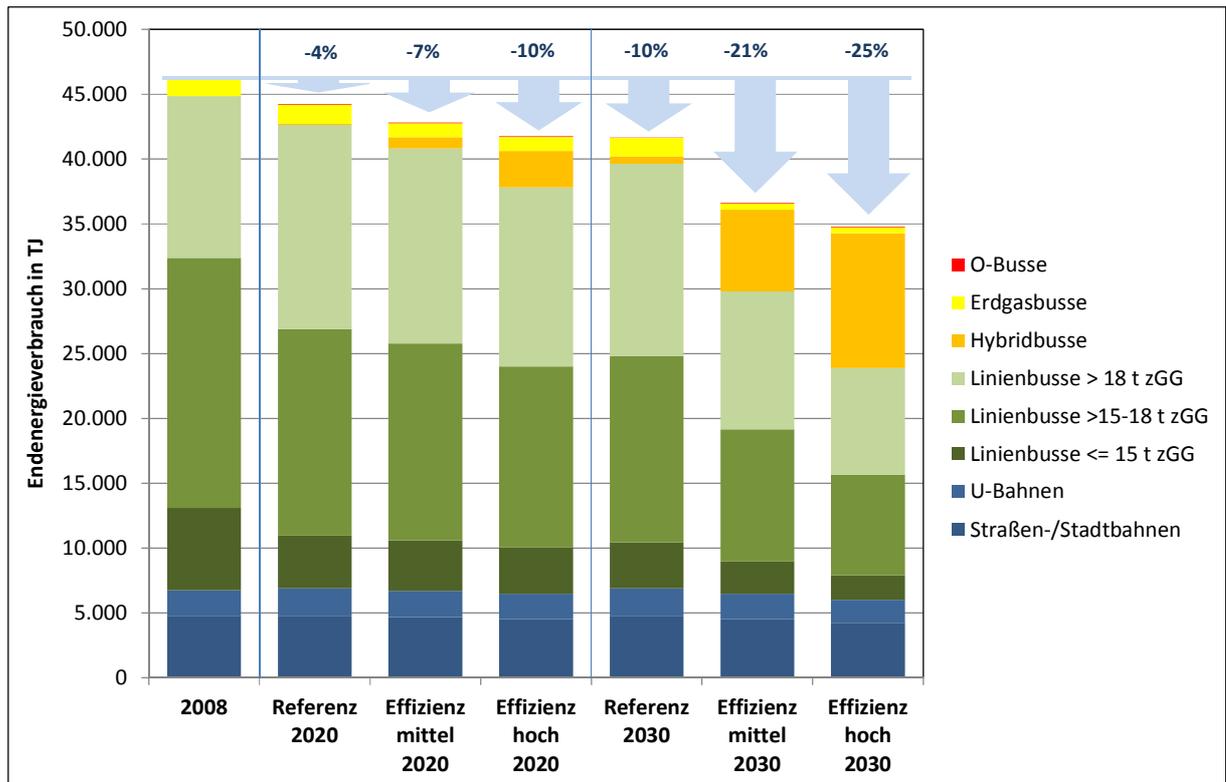
**Abbildung 65 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km von Linienbussen 2008 bis 2030 im Referenzszenario sowie in den Energieeffizienz-szenarien im Vergleich zum Pkw [eigene Berechnungen]**

Abbildung 66 vergleicht für das Jahr 2030 die spezifischen Endenergieverbräuche pro Fahrzeug- bzw. Wagen-km mit denen pro Platz-km für die Verkehrsmittel des ÖPNV und den Pkw-Verkehr. Die Abbildung macht deutlich, dass in beiden Effizienz-szenarien die Rückgänge der spezifischen Endenergieverbräuche pro Fahrzeug- bzw. Wagen-km geringer ausfallen als bei denen pro Platz-km. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Plätze pro Fahrzeug bzw. pro Wagen für die Verkehrsmittel des ÖPNV im Zeitraum zwischen 2008 und 2030 ansteigen. Besonders auffällig ist dies beim Busverkehr, wo das Anwachsen der Platzanzahl pro Bus durch eine Verschiebung der Busgrößenklassen zustande kommt (siehe auch Referenzszenario).



**Abbildung 66 Spezifischer Endenergieverbrauch pro Fahrzeug- bzw. Wagen-km sowie pro Platz-km für verschiedene Verkehrsmittel im ÖPNV und des Pkw-Verkehrs 2030 in den beiden Effizienzscenarioen [eigene Berechnungen]**

Wie hoch der absolute Energieverbrauch des ÖPNV in den Jahren 2020 und 2030 in den beiden Effizienzscenarioen ist, zeigt Abbildung 67. Im „Effizienzscenario mittel“ liegt der Endenergieverbrauch in 2020 bei etwa 42.800 TJ und in 2030 bei rund 36.600 TJ. Zum Vergleich: 2008 lag der Endenergieverbrauch des ÖPNV noch bei 46.300 TJ. Dies ist ein Rückgang des Verbrauchs von 7 % bzw. 21 %. Im „Effizienzscenario hoch“ geht der Endenergieverbrauch sogar auf 41.750 TJ bzw. 34.800 TJ zurück – das ist ein Rückgang um 10 % bzw. 25 %. Im Referenzscenario ging der Energieverbrauch lediglich um 4 % bis 2020 bzw. 10 % bis 2030 zurück. Die hohen Rückgänge beim Energieverbrauch könnten aber ein wichtiger Beitrag des ÖPNV sein, um den Energieverbrauch in Deutschland zu senken. Dies ist notwendig, da ohne nachhaltige Senkung des Endenergieverbrauchs kein schneller Umbau hin zu erneuerbaren Energien in Deutschland möglich ist. Energieeffizienz ist somit Voraussetzung für ein ambitioniertes Ausbauziel für erneuerbare Energien.



**Abbildung 67 Endenergieverbrauchs des ÖPNV in 2020 und 2030 im Vergleich zu 2008 im Referenzszenario sowie den beiden Effizienzszenarien [eigene Berechnungen]**

Welche Anteile die Verkehrsmittel des ÖPNV am gesamten End- und Primärenergieverbrauch in den Jahren 2020 und 2030 haben, zeigen Abbildung 68 und Abbildung 69. Um die Bedeutung der elektrisch betriebenen Verkehrsmittel am Energieverbrauch richtig abbilden zu können, müssen die Anteile für den Primärenergieverbrauch betrachtet werden. Die Abbildungen zeigen, dass in den beiden Effizienzszenarien die Bedeutung alternativer Antriebe zunimmt. Im „Effizienzszenario mittel“ entfällt auf diese Gruppe in 2020 4 % des Primärenergieverbrauchs, in 2030 sind es schon 16 %. Im „Effizienzszenario hoch“ sind es in 2020 8 % und in 2030 bereits 28 %. Im Referenzszenario waren es noch 3 % im Jahr 2020 und 4 % im Jahr 2030. Augenscheinlich ist auch, dass in den Effizienzszenarien der Anteil der Straßen-, Stadt- und U-Bahnen am Primärenergieverbrauch in 2030 leicht höher liegt als im Referenzszenario. Da das Verkehrsmengengerüst für das Referenzszenario und für die Effizienzszenarien identisch ist, ist dies allein darauf zurückzuführen, dass die Effizienzsteigerungen beim Bus höher sind als beim elektrisch betriebenen ÖPNV.

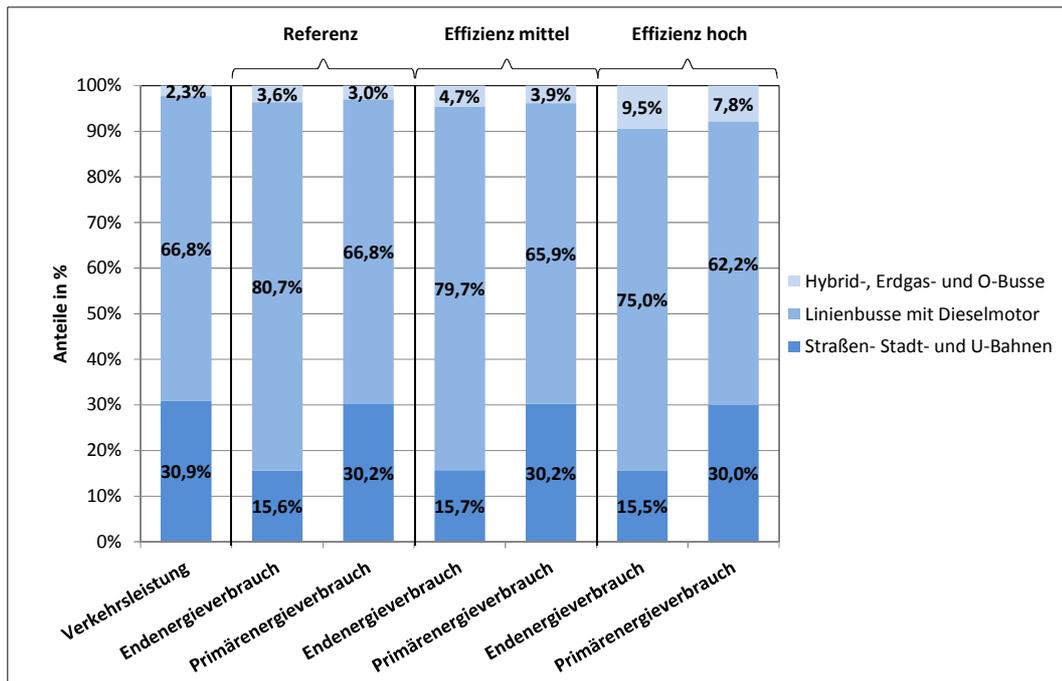


Abbildung 68 Anteile der Verkehrsmittel des ÖPNV an der Verkehrsleistung, des Endenergie- und Primärenergieverbrauchs im Jahr 2020 im Referenzszenario sowie den beiden Referenzszenarien [eigene Berechnungen]

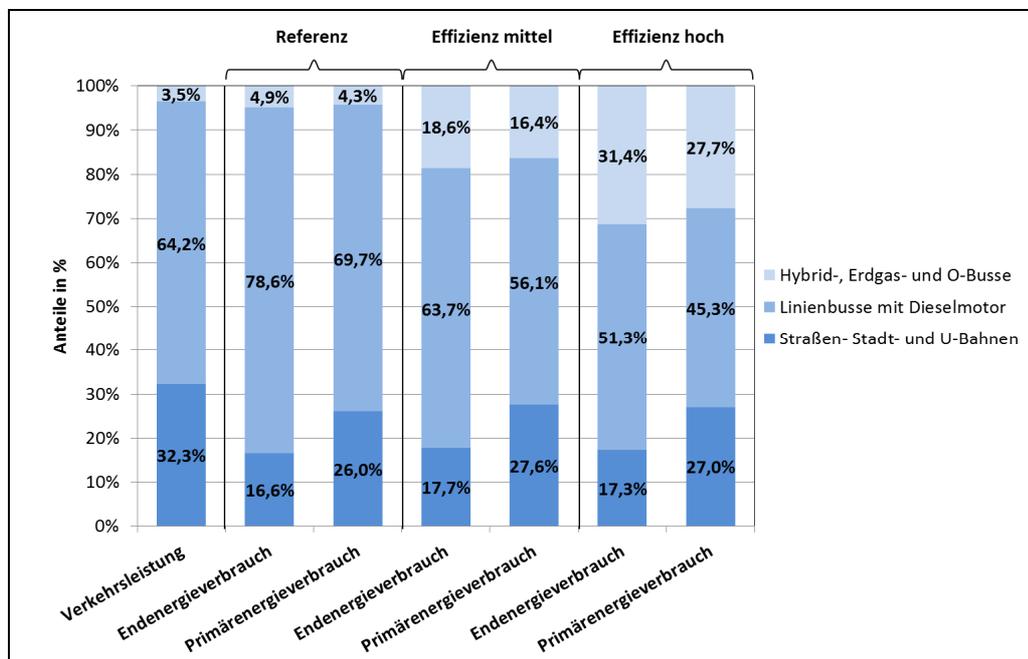


Abbildung 69 Anteile der Verkehrsmittel des ÖPNV an der Verkehrsleistung, des Endenergie- und Primärenergieverbrauchs im Jahr 2030 im Referenzszenario sowie den beiden Referenzszenarien [eigene Berechnungen]

#### **6.4.2 Treibhausgasemissionen**

Die Entwicklung der spezifischen Treibhausgasemissionen (berechnet als CO<sub>2</sub>-Äquivalente; einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) pro Platz-km für den Zeitraum 2008 bis 2030 ist in der Tabelle 25 dargestellt. Wie beim Referenzszenario liegen die Rückgänge der spezifischen Treibhausgasemissionen über den Minderungen bei den spezifischen Endenergieverbräuchen. Zurückzuführen ist dies darauf, dass die eingesetzten Energieträger (Strom, Kraftstoffe) im Zeitverlauf weniger Treibhausgasemissionen verursachen. Bei Diesel ergibt sich dies durch die Beimischung von Biokraftstoffen. Die zusätzlich erzielte Minderung ist jedoch sehr klein. Deutlich größer fällt der Unterschied beim Strom aus. Zwischen 2008 und 2030 sinken die Treibhausgasemissionen für Strom durch den Ausbau erneuerbarer Energien. Diese Verbesserungen sind in der Tabelle 25 standardmäßig bei beiden Effizienzszenarien berücksichtigt. Zusätzlich sind in der Tabelle aber auch die Ergebnisse für den Fall dargestellt, dass die ÖPNV-Unternehmen gezielt den Anteil erneuerbarer Energien an ihrer Stromversorgung erhöhen (Effizienzszenarien ergänzt um das Kürzel EE). Für diesen Fall würden die spezifischen Treibhausgasemissionen pro Platz-km für Straßen-, Stadt- und U-Bahnen bis 2020 um 38 % und bis 2030 bis 41 % gegenüber 2008 sinken.

Größe	Einheit	2008	2015	2020	2025	2030	Δ 2030/08
<b>Referenzszenario</b>							
Pkw	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	44,0	38,2	33,1	28,7	25,8	-41%
Busse	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	16,2	15,4	15,0	14,7	14,4	-11%
Straßen-/Stadtbahnen	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	14,4	13,8	13,4	12,4	10,0	-31%
U-Bahnen	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	10,6	10,3	10,1	9,3	7,5	-29%
<b>Effizienzszenario mittel</b>							
Pkw	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	44,0	38,2	33,1	28,7	25,8	-41%
Busse	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	16,2	15,3	14,5	13,6	12,5	-23%
Straßen-/Stadtbahnen	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	14,4	13,6	13,1	11,9	9,5	-34%
Straßen-/Stadtbahnen	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	10,6	10,1	9,6	8,7	6,8	-35%
Straßen-/Stadtb. + EE <sup>1)</sup>	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	14,4	11,5	9,0	6,9	4,8	-66%
U-Bahnen + EE <sup>1)</sup>	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	10,6	8,5	6,6	5,0	3,5	-67%
<b>Effizienzszenario hoch</b>							
Pkw	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	44,0	38,2	33,1	28,7	25,8	-41%
Busse	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	16,2	15,2	14,2	13,1	12,0	-26%
Straßen-/Stadtbahnen	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	14,4	13,4	12,7	11,3	8,8	-39%
Straßen-/Stadtbahnen	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	10,6	9,9	9,2	8,1	6,3	-41%
Straßen-/Stadtb. + EE <sup>1)</sup>	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	14,4	11,3	8,7	6,5	4,5	-69%
U-Bahnen + EE <sup>1)</sup>	CO <sub>2</sub> e/Platz-km	10,6	8,3	6,3	4,7	3,2	-70%
<sup>1)</sup> EE = Erneuerbare Energie. In diesen Varianten wird Strom bezogen, dessen Anteil an erneuerbaren Energien über dem bundesdeutschen Durchschnitt liegt (siehe Erklärung im Text). <b>Quelle:</b> eigene Berechnungen.							

**Tabelle 25 Entwicklung der spezifischen Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Platz-km (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für Verkehrsmittel des ÖPNV und für den Pkw-Verkehr 2008 bis 2030 im Referenzszenario sowie in den Szenarien Energieeffizienz + erneuerbare Energien**

Um verschiedene Verkehrsmittel in Hinblick auf deren Treibhausgasemissionen beurteilen zu können, bietet sich die Kenngröße „g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Personenkilometer“ an. Die Abbildung 70 zeigt diese Kenngröße im Jahr 2020 „Effizienzszenario mittel“ und „Effizienzszenario hoch“ im Vergleich zum Referenzszenario. Abbildung 71 zeigt diesen Vergleich für das Jahr 2030. In beiden Abbildungen ist zusätzlich angegeben, welche Treibhausgaswirkungen sich ergeben, wenn bei Straßen-, Stadt- und U-Bahnen verstärkt Strom aus regenerativen Quellen eingesetzt wird (in den Abbildungen orange gekennzeichnet). Von allen ÖPNV-Verkehrsmitteln haben Busse die höchsten spezifischen CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen aller ÖPNV-Verkehrsmittel. In 2020 liegen sie mit 74 g bzw. 72 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/Pkm sowie in 2030 mit 63 g bzw. 60 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Personenkilometer in beiden Effizienzszenarien aber deutlich unter den Werten des Pkw-Verkehrs (110 g im Jahr 2020, 86 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/Pkm im Jahr 2030) – der Busverkehr hat

Schlussbericht

in 2020 ca. 33 % bzw. 34 % und im Jahr 2030 rund 27 % bzw. 30 % niedrigere Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer im Vergleich zum Auto. Die Verkehrsmittel Straßen-/Stadtbahnen und U-Bahnen schneiden bei den spezifischen Treibhausgasemissionen noch mal günstiger ab als der Busverkehr. Gegenüber dem Pkw besitzen sie ohne zusätzlichen Strom aus erneuerbaren Energien im Jahr 2020 Emissionsvorteile von 42 % bis 52 % und im Jahr 2030 47 % bis 59 %. Wird zusätzlicher Strom aus erneuerbarer Energie bezogen, liegen die Emissionen im Vergleich zum Pkw im Jahr 2020 60 % bis 67 % und im Jahr 2030 73 % bis 79 % niedriger.

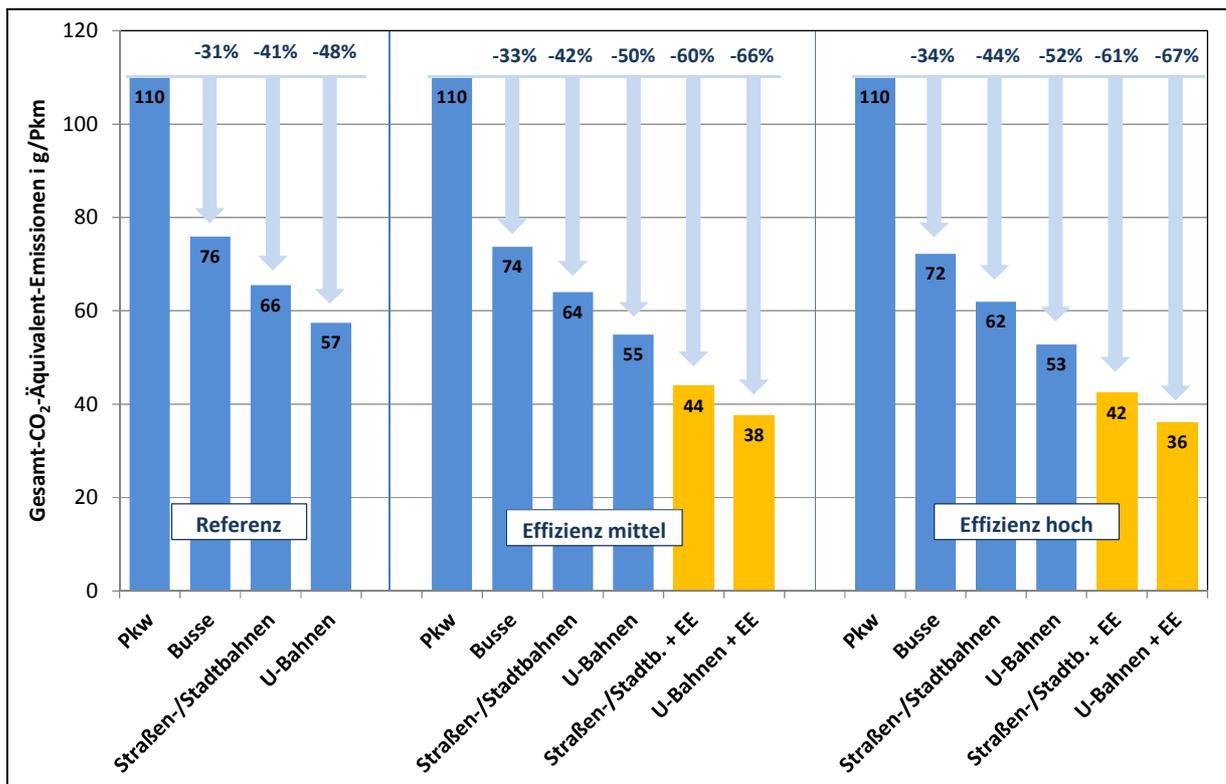
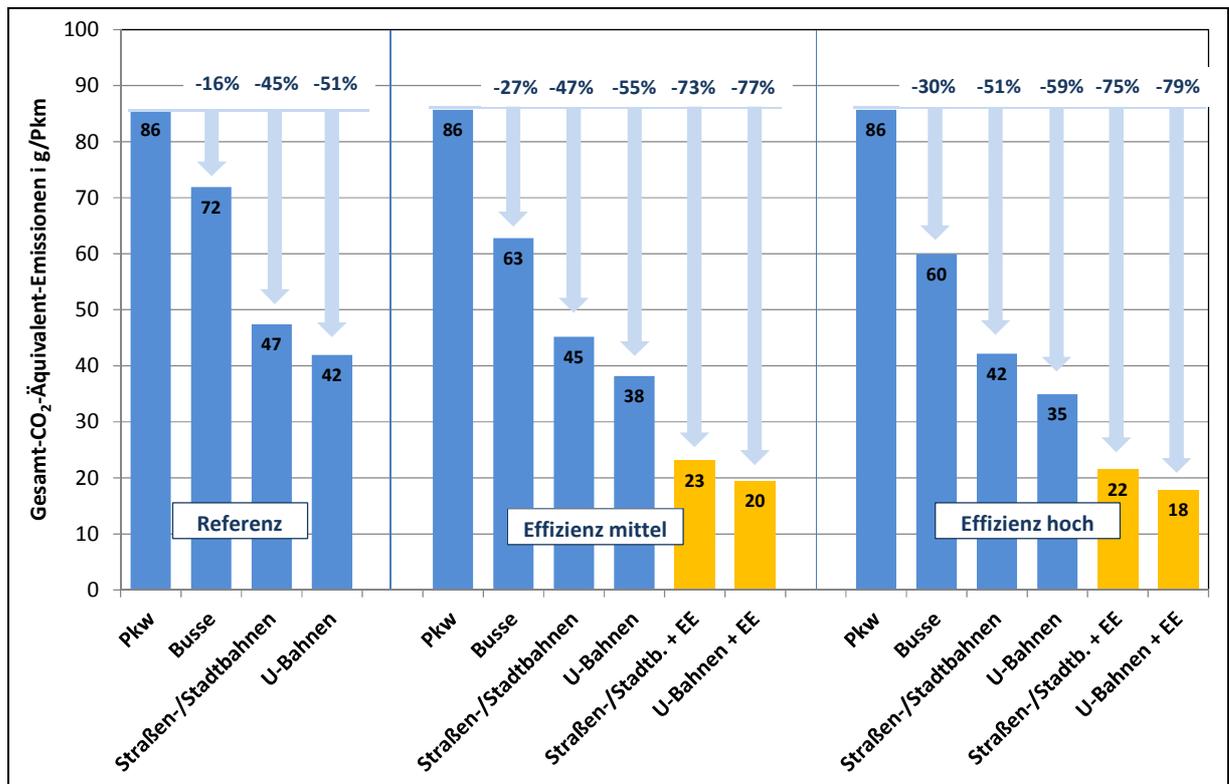


Abbildung 70 Spezifische Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für den ÖPNV und den Pkw-Verkehr 2020 im Referenzszenario, im „Effizienzscenario mittel + erneuerbare Energien“ sowie im „Effizienzscenario hoch + erneuerbare Energien“ [eigene Berechnungen]



**Abbildung 71 Spezifische Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für den ÖPNV und den Pkw-Verkehr 2030 im Referenzszenario, im „Effizienzscenario mittel + erneuerbare Energien“ sowie im „Effizienzscenario hoch + erneuerbare Energien“ [eigene Berechnungen]**

Die Gesamt-Treibhausgasemissionen des ÖPNV für die Jahre 2020 und 2030 (berechnet als CO<sub>2</sub>-Äquivalente, einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) differenziert nach den beiden Effizienzscenarien in Kombination mit der Nutzung zusätzlicher erneuerbarer Energien zeigt Abbildung 72. Unter Zugrundelegung des bundesdeutschen Strommixes ergeben sich für den gesamten ÖPNV im Fall des Szenarios „Effizienz mittel“ in 2020 ca. 3,9 Mio. t und in 2030 rund 3,17 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Im Fall des Szenarios „Effizienz hoch“ sind es im Jahr 2020 ca. 3,8 Mio. t und im Jahr 2030 rund 3,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Die Minderung gegenüber 2008 beträgt in 2020 9 % bzw. 11 % und in 2030 26 % bzw. 30 %. Wird zusätzlicher, regenerativ erzeugter Strom verwendet, sinken im Szenario „Effizienz mittel“ die Emissionen in 2020 auf ca. 3,6 Mio. t und in 2030 auf 2,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente – das entspricht einer Minderung gegenüber 2008 in Höhe von 17 % bzw. 35 %. Im Szenario „Effizienz hoch“ werden in 2020 ca. 3,5 Mio. t und im Jahr 2030 rund 2,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittiert – das sind 19 % bzw. 38 % weniger als 2008. In der Abbildung 72 ist auch erkennbar, dass im Jahr 2030 in dem Szenario „Effizienz hoch“ Hybridfahrzeuge schon nennenswert zu den Gesamt-Treibhausgasemissionen des ÖPNV beitragen.

Grundsätzlich kann aber resümiert werden, dass die Effizienzscenarien anders als das Referenzszenario die Treibhausgasemissionen des ÖPNV bis 2030 deutlich senken und –

schlägt der ÖPNV diesen Weg ein – auch einen wichtigen Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen in Deutschland liefern.

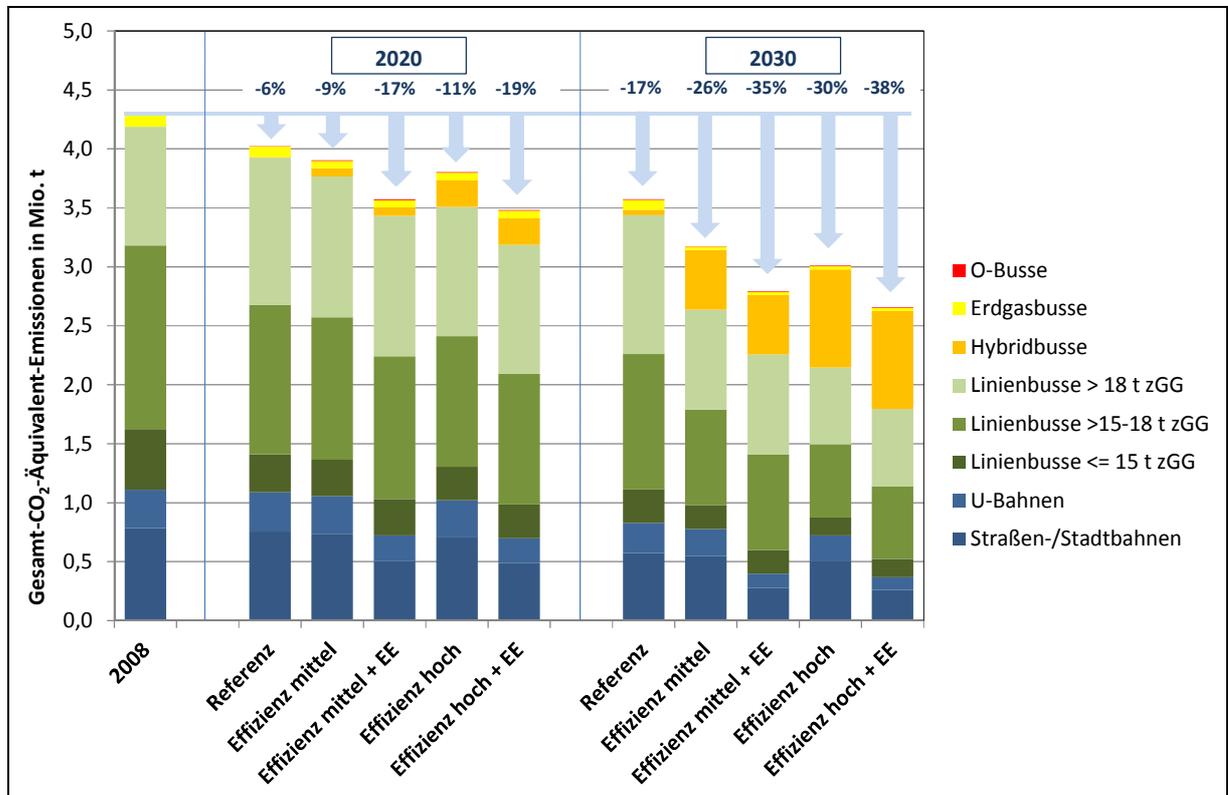
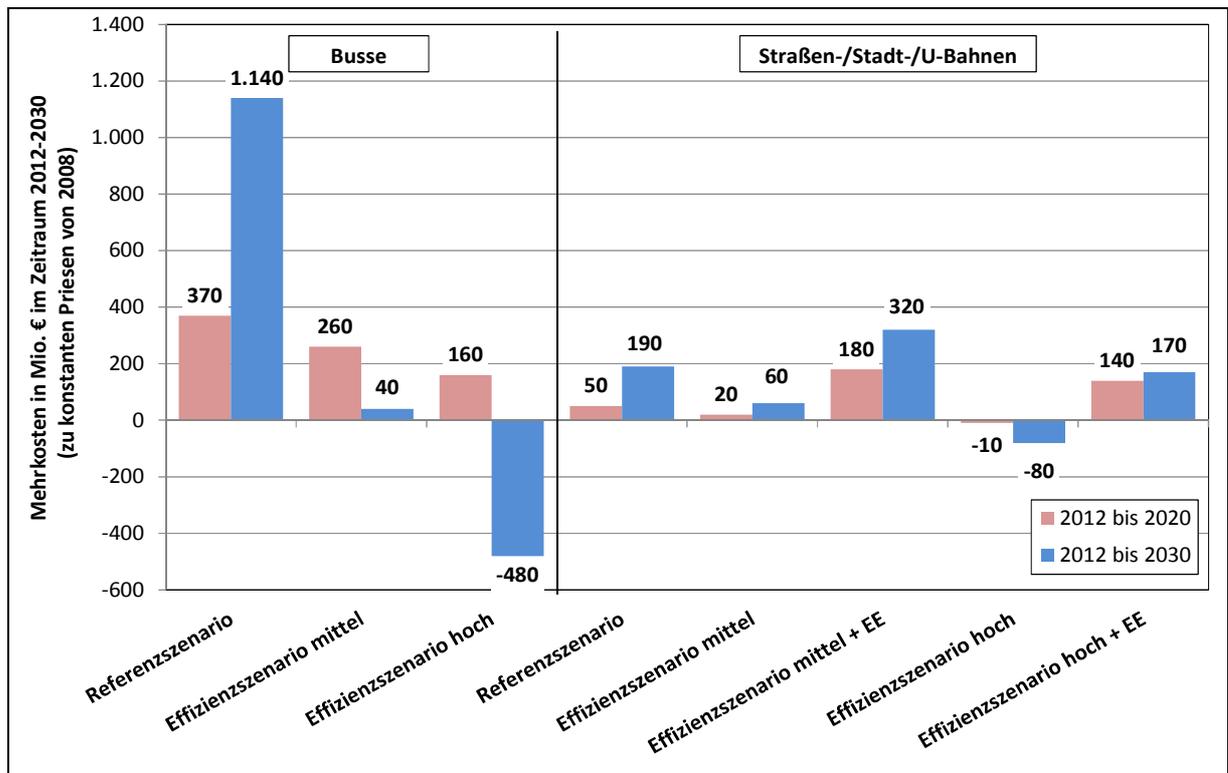


Abbildung 72 Entwicklung des Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) des ÖPNV 2030 im Vergleich zu 2008 im Referenzszenario sowie den Szenarien Energieeffizienz + erneuerbare Energien [eigene Berechnungen]

### 6.4.3 Energiekosten

Im Referenzszenario wurden Mehrausgaben für den Zeitraum 2012 bis 2030 in Höhe von 1,3 Mrd. Euro ermittelt (1,14 Mrd. Euro im Busbereich und 0,19 Mrd. Euro bei Straßen-, Stadt- und U-Bahnen), da die Energiepreissteigerungen nicht durch Effizienzgewinne aufgefangen werden konnten (siehe Abbildung 73). Im „Effizienzscenario mittel“ sind die Effizienzgewinne bei den Bussen in 2030 so groß, dass nur noch 40 Mio. Euro aufgrund der gestiegenen Energiepreise über den gesamten Zeitraum 2012 bis 2030 zu bezahlen wären. Im „Effizienzscenario hoch“ würden die ÖPNV-Unternehmen über den gesamten Zeitraum 0,48 Mrd. Euro einsparen. Die höhere Energieeffizienz würde sich somit für die ÖPNV-Unternehmen rechnen.



**Abbildung 73 Mehr- bzw. Minderausgaben des ÖPNV für Energie für den gesamten Zeitraum 2012 bis 2020 und 2012 bis 2030 im Referenzszenario sowie in den Szenarien Energieeffizienz + erneuerbare Energien (zu Preisen von 2008) [eigene Berechnungen]**

Bei den Straßen-, Stadt- und U-Bahnen würden sich – ohne Bezug des besonders umweltfreundlichen Stroms – auch die Effizienzmaßnahmen positiv bemerkbar machen. Im „Effizienzscenario mittel“ müssen die ÖPNV-Unternehmen aufgrund gestiegener Energiekosten noch 60 Mio. Euro über den gesamten Zeitraum bis 2030 zusätzlich bezahlen. Im „Effizienzscenario hoch“ würden rund 80 Mio. Euro von 2012 bis 2030 von den ÖPNV-Unternehmen eingespart – trotz gestiegener Energiekosten (siehe Abbildung 73). Wird zusätzlich auf Strom mit hohen regenerativen Anteilen umgestiegen, steigen die Energiekosten im „Effizienzscenario mittel“ auf Werte an, die höher liegen als im Referenzszenario (320 Mio. Euro). Im „Effizienzscenario hoch“ können diese Mehrkosten auf nur noch 170 Mio. Euro reduziert werden. Grundsätzlich kann aber festgestellt werden, dass der Umstieg auf grüneren Strom sich nicht durch Energieeffizienzsteigerungen kompensieren lässt (wenn nicht die Gewinne bei den Bussen zur Refinanzierung herangezogen werden).

Die positive Nachricht ist somit, dass die höhere Energieeffizienz in den beiden Szenarien dazu beiträgt, die zukünftigen Mehrkosten aufgrund steigender Energiepreise mehr oder weniger zu kompensieren. Energieeffizienz rechnet sich somit für die ÖPNV-Unternehmen.

## 6.5 Zusammenfassung

Die Analysen zum Referenzszenario haben gezeigt, dass zum einen der Klimavorteil des ÖPNV zum Pkw immer mehr schwindet, zum anderen dass die Unternehmen des ÖPNV im Zeitraum 2012 bis 2030 rund 1,3 Mrd. Euro mehr für Energie ausgeben müssen. Dass die Unternehmen im Referenzszenario sich nicht aktiv für Energie sparen und Klimaschutz einsetzen, macht sich somit negativ bei den Energiekosten bemerkbar. Zudem werden im Referenzszenario der Endenergieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des ÖPNV nur mäßig reduziert.

Um die Auswirkungen einer aktiven Umweltschutzpolitik der ÖPNV-Unternehmen auf den Energieverbrauch, die Treibhausgasemissionen sowie die Energiekosten bis 2030 zu untersuchen, wurden die Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien entwickelt. In dem „Effizienzscenario mittel“ wird davon ausgegangen, dass alle Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz umgesetzt werden, deren Investitionskosten sich innerhalb der Lebens- bzw. Nutzungsdauer amortisieren. Zusätzlich wird in dem „Effizienzscenario hoch“ untersucht, welche Auswirkungen es hätte, wenn die ÖPNV-Unternehmen auch Effizienzmaßnahmen durchführen, die sich derzeit gerade so noch rechnen. Der Staat unterstützt dabei gezielt durch ausgewählte Förderprogramme die Einführung effizienter Technologien. Konkret wird unterstellt, dass derzeit auslaufende Förderprogramme zu Hybridbussen fortgesetzt werden. Die beiden Effizienzscenarien unterscheiden sich sowohl für den Busverkehr als auch für Straßen-/Stadt- und U-Bahnen darin, dass im „Effizienzscenario hoch“ im jeweiligen Fahrzeugbestand der Anteil energiesparender Fahrzeuge deutlich ansteigt (z. B. die Anzahl der Hybridbusse).

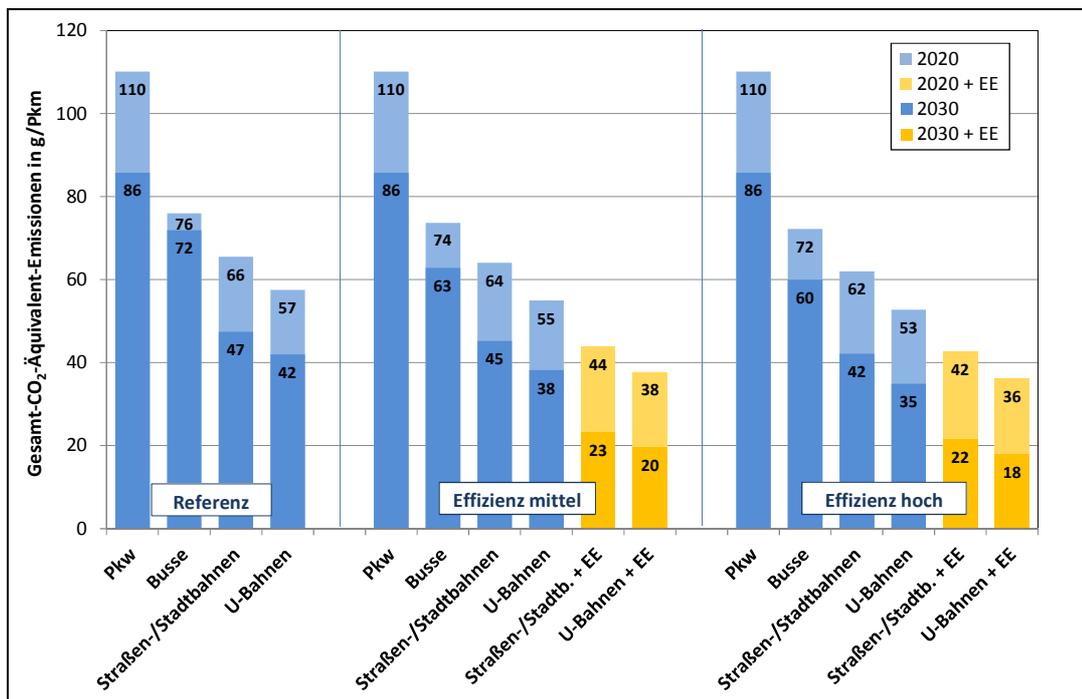
Zusätzlich wird betrachtet, welche Effekte es auf Treibhausgasemissionen und Energiekosten in den beiden Effizienzscenarien hat, wenn zusätzlich die ÖPNV-Unternehmen über ihre Energiedienstleister regenerativ erzeugten Strom einkaufen, der nicht über das EEG gefördert worden ist. Der Strom im Jahr 2030, der für die ÖPNV-Unternehmen unterstellt wird, hat einen regenerativ erzeugten Anteil von 67 %. Die Kosten für diesen Strom steigen bis 2020 um fast 3 €-Cent pro kWh (berechnet zu konstanten Preisen von 2008), um anschließend wieder zu sinken (+ 1 €-Cent pro kWh Strom gegenüber 2008). Für die beiden Effizienzscenarien mittel und hoch wurde einerseits angenommen, dass der bundesdeutsche Durchschnittstrom, wie er auch im Referenzszenario eingesetzt wurde, verwendet wird; andererseits wurde dieser Strom mit hohem regenerativ erzeugten Anteil mit den beiden Effizienzscenarien kombiniert.

Wie Tabelle 26 zeigt, fällt die Steigerung der Energieeffizienz des ÖPNV – gemessen pro Platz-km – in den beiden Effizienzscenarien bis 2030 deutlich höher aus als im Referenzszenario. Die Steigerungen der Energieeffizienz treten bei allen Verkehrsmitteln des ÖPNV gleichermaßen auf. Auffällig ist aber, dass der U-Bahnverkehr insbesondere im „Effizienzscenario hoch“ nochmals deutlich steigen kann. Überraschend ist in diesem Zusammenhang, dass trotz der Förderung von Hybridbussen der Effizienzsprung vom „Effizienzscenario mittel“ zum „Effizienzscenario hoch“ verhältnismäßig klein ausfällt. Weiterhin zeigen die Werte der Tabelle 26 klar, dass selbst in den Energieeffizienzscenarien die Verbesserungen des Pkw-Verkehrs deutlich über denen des ÖPNV liegen.

Größe	Einheit	2008	2015	2020	2025	2030	Δ 2030/08
<b>Referenzszenario</b>							
Pkw	MJ/Platz-km	0,52	0,46	0,41	0,35	0,32	-39%
Busse	MJ/Platz-km	0,20	0,19	0,19	0,19	0,18	-10%
Straßen-/Stadtbahnen	MJ/Platz-km	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	-5%
U-Bahnen	MJ/Platz-km	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-3%
<b>Effizienzscenario mittel</b>							
Pkw	MJ/Platz-km	0,52	0,46	0,41	0,35	0,32	-39%
Busse	MJ/Platz-km	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	-22%
Straßen-/Stadtbahnen	MJ/Platz-km	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	-10%
U-Bahnen	MJ/Platz-km	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-12%
<b>Effizienzscenario hoch</b>							
Pkw	MJ/Platz-km	0,52	0,46	0,41	0,35	0,32	-39%
Busse	MJ/Platz-km	0,20	0,19	0,18	0,17	0,15	-25%
Straßen-/Stadtbahnen	MJ/Platz-km	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	-16%
U-Bahnen	MJ/Platz-km	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	-19%
<b>Quelle:</b> eigene Berechnungen.							

**Tabelle 26 Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs des ÖPNV und des Pkw-Verkehrs pro Platz-km in Deutschland im Zeitraum 2008 bis 2030 im Referenzszenario sowie den beiden Effizienzscenarien**

Auch wenn die Effizienzgewinne des Pkw in dem Zeitraum von 2008 bis 2030 enorm hoch sind, wird er dennoch nicht die Verkehrsmittel des ÖPNV in Bezug auf Klimaschutz einholen. Abbildung 74 zeigt im Vergleich zum Referenzszenario, dass in den beiden Effizienzscenarien die Verkehrsmittel des ÖPNV ihre spezifischen Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer nochmals senken konnten. Der Klimavorteil gegenüber dem Pkw wird somit nicht nur aufrechterhalten, sondern weiter abgesichert. Aus der Abbildung 74 wird zudem ersichtlich, dass sich der rechtzeitige Umstieg auf eine grünere Stromproduktion beim elektrisch betriebenen ÖPNV nochmals deutlich emissionsmindernd bemerkbar macht. Weiterhin zeigt die Abbildung, dass im Busverkehr der Unterschied der beiden Effizienzvarianten – trotz höherem Hybridanteil – eher gering ausfällt.



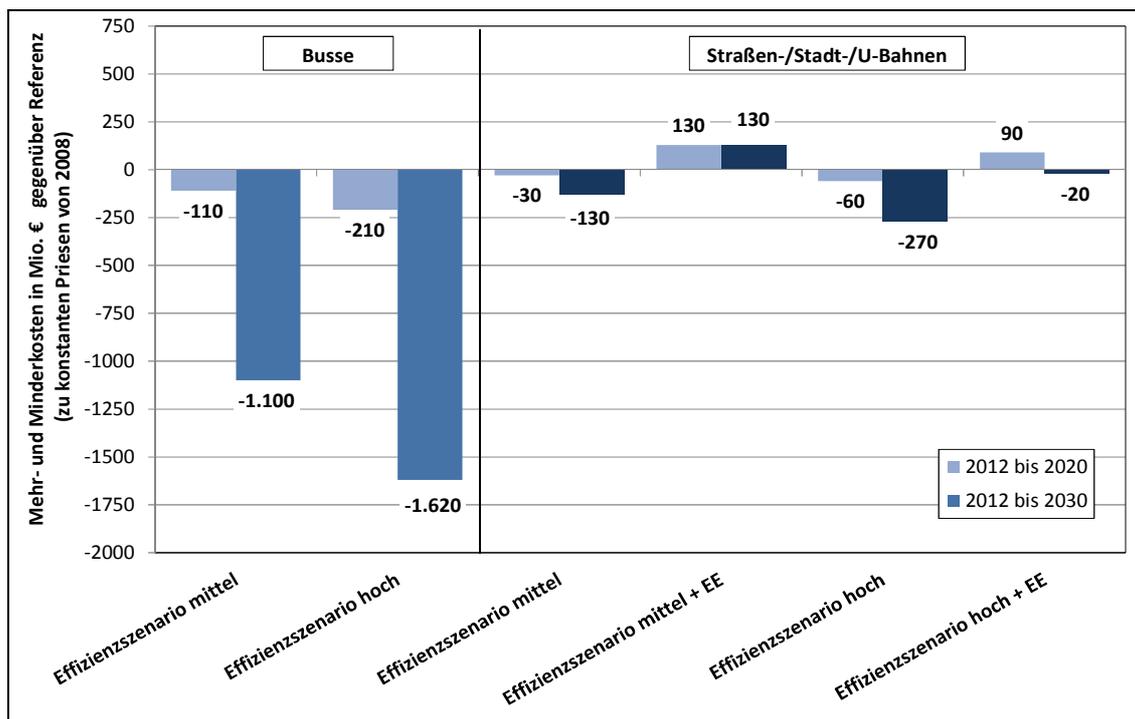
**Abbildung 74 Spezifische Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für den ÖPNV und den Pkw-Verkehr 2020 und 2030 im Referenzszenario sowie in den „Effizienzszenarien mittel und hoch + erneuerbare Energien“ [eigene Berechnungen]**

Ökologisch wirkt sich also der stärkere Einsatz der Hybridbusse – betrachtet man nur das Jahr 2030 – nur begrenzt positiv aus. Im „Effizienzszenario hoch“ werden im Jahr 2030 nur rund 110.000 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente gegenüber dem „Effizienzszenario mittel“ eingespart bei Gesamtemissionen des ÖPNV in Höhe von rund 3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Allerdings kommen im „Effizienzszenario hoch“ Hybridbusse deutlich schneller in den Markt mit der Folge, dass über einen langen Zeitraum eine Treibhausgasminderung erreicht wird. Insgesamt werden im Zeitraum 2012 bis 2030 im Busverkehr durch das „Effizienzszenario hoch“ gegenüber dem „Effizienzszenario mittel“ zusätzlich 1,3 Mio. t aufgrund des stärkeren Einsatzes der Hybridbusse eingespart.

Dies wirkt sich auch positiv auf die Energieausgaben aus. Abbildung 75 zeigt die Summe der Mehr- bzw. Minderausgaben für Energie im Vergleich zum Referenzszenario für den gesamten Zeitraum 2012 bis 2030 (zu konstanten Preisen von 2008). Wird eine mittlere Energieeffizienz realisiert, können im Bereich der Kraftstoffe gegenüber dem Referenzszenario 1,1 Mrd. Euro eingespart werden; damit wären die Mehrkosten von ebenfalls rund 1,1 Mrd. Euro im Referenzszenario aufgrund der höheren Effizienz der Busse fast ausgeglichen. Durch den Übergang vom „Effizienzszenario mittel“ auf das „Effizienzszenario hoch“ würden nochmals eine halbe Mrd. Euro über den Zeitraum 2012 bis 2030 eingespart. Dies spiegelt ebenfalls wieder, dass im „Effizienzszenario hoch“ Hybridbusse viel früher im Bestand sind als im „Effizienzszenario mittel“. Dies hat zur Folge, dass schon

über einen langen Zeitraum Kostenvorteile gegenüber dem Referenzszenario erzielt werden können.

Abbildung 75 zeigt außerdem, dass für Straßen-, Stadt- und U-Bahnen in beiden Effizienzszenarien Kostenvorteile gegenüber dem Referenzfall bestehen. Im „Effizienzscenario hoch“ werden die Mehrausgaben für Strom im Referenzszenario (rund 0,19 Mio. Euro) überkompensiert. Die Mehrkosten für eine stärker auf regenerativen Energien basierende Stromversorgung können zumindest im Effizienzscenario gegenüber der Referenz vermeiden werden.



**Abbildung 75 Differenz der Ausgaben des ÖPNV für Energie für den gesamten Zeitraum 2012 bis 2020 und 2012 bis 2030 in den Szenarien Energieeffizienz + erneuerbare Energien zum Referenzszenario (zu Preisen von 2008) [eigene Berechnungen]**

Die beiden Effizienzszenarien in Kombination mit erneuerbaren Energien bewirken für den ÖPNV, dass der Energieverbrauch (-7 % bis 10 % im Jahr 2020 und -21 % bis -25 % im Jahr 2030 gegenüber 2008) und die Treibhausgasemissionen (-9 % bis 19 % in 2020 und 26 % bis -38 % im Jahr 2030) trotz leicht steigender Verkehrsleistung (+0,7 % im Jahr 2030 und +1,3 % im Jahr 2030) sinken. Der ÖPNV trägt somit nachhaltig zum Erreichen der deutschen Klimaschutzziele bei. Gleichzeitig, das zeigen die Analysen zu den Energiekosten, können insbesondere im Busverkehr die erzielten Effizienzsteigerungen bereits im „Effizienzscenario mittel“ die Mehrkosten für Kraftstoffe nahezu vollständig kompensieren. Dies zeigt, dass die ÖPNV-Unternehmen den Weg zu mehr Energieeffizienz einschlagen müssen, um die Energiepreissteigerungen aufzufangen. Wie die ÖPNV-Unternehmen auf ihrem Weg zu mehr Energieeffizienz und erneuerbaren Energien unterstützt werden können, wird im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

## 7 Entwicklung des ÖPNV bis 2050

Die Szenarien „Energieeffizienz mittel“ und „Energieeffizienz hoch“ (Kapitel 6) haben gezeigt, dass bis zum Jahr 2030 deutliche Energieeffizienzgewinne gegenüber dem Referenzszenario (Kapitel 5) erzielt werden können. Während der Endenergieverbrauch im Referenzszenario in 2030 lediglich 10 % unter dem Wert von 2008 liegt, wird im „Effizienzscenario mittel“ eine Minderung von 21 % und im „Effizienzscenario hoch“ von 25 % erreicht. Weiterhin wird verdeutlicht, dass sich durch die Kombination von Energieeffizienzmaßnahmen mit einem verstärktem Bezug von regenerativ erzeugtem Fahrstrom die Treibhausgasemissionen des ÖPNV um bis zu 38 % gegenüber 2008 verringern lassen.

Welche Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs und zum Ausbau erneuerbarer Energie nach 2030 umsetzbar sind, hängt stark davon ab, auf welche Technologien mittelfristig im Bereich des Busverkehrs und des schienengebundenen ÖPNV gesetzt wird und wie sich die Bereitstellung der Energieversorgung weiter entwickelt. Will Deutschland seinen Beitrag zum Klimaschutz durch eine Minderung der Treibhausgasemissionen bis 2050 in der Größenordnung von 80 % bis 90 % gegenüber 1990 leisten, muss dabei auch der ÖPNV nach 2030 deutliche Minderungsanstrengungen unternehmen.

In diesem Kapitel soll daher untersucht werden, welche Minderungen der Treibhausgasemissionen über das Jahr 2030 hinaus erreichbar erscheinen, wenn die ÖPNV-Unternehmen nach 2030 weiterhin Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz umsetzen und den Anteil erneuerbarer Energien erhöhen. Aufgrund der hohen Unsicherheit hinsichtlich der technologischen Entwicklungspfade und Kosten zukünftiger Maßnahmen wird abweichend vom Vorgehen in Kapitel 6 lediglich ein Effizienzscenario, welches als „Effizienzscenario hoch“ bezeichnet wird, untersucht. In diesem Szenario sind alle Maßnahmen enthalten, welche gerade noch wirtschaftlich vertretbar sind.

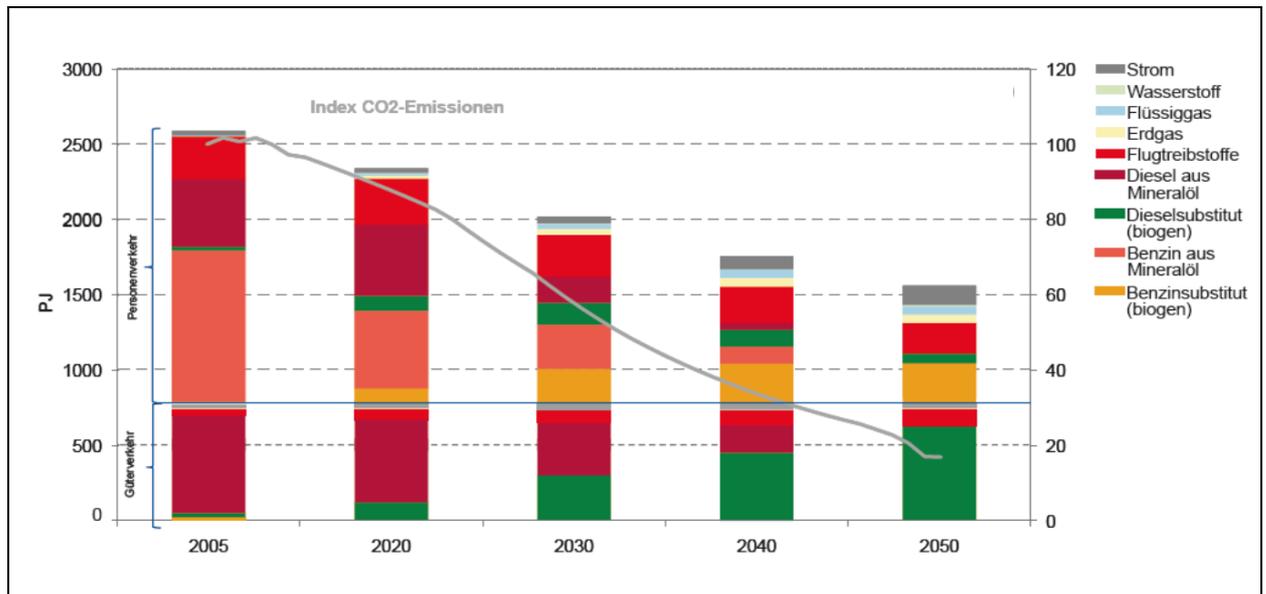
Nachfolgend werden in Kapitel 7.1 zunächst die Rahmenbedingungen vorgestellt, die neben der zugrunde gelegten Verkehrsleistung insbesondere die mögliche Entwicklung einer Elektrifizierung der Linienbusse beschreiben. Anschließend wird in Kapitel 7.2 dargelegt, welche Annahmen dem Referenzszenario und dem „Effizienzscenario hoch“ für den ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor hinsichtlich des Einsatzes erneuerbarer Energien (7.2.1) und der Energieeffizienz (7.2.2) zugrunde liegen. Wie sich die Szenarien auf den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen auswirken, zeigen Kapitel 7.2.3 und 7.2.4. In Kapitel 7.3 ist dies Analog für den elektrisch betriebenen ÖPNV dargestellt.

Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 7.4 zusammengefasst.

## 7.1 Rahmenbedingungen für den Zeitraum 2030 bis 2050

Grundsätzlich bestehen nach 2030 im Wesentlichen zwei Optionen, die Treibhausgasemissionen im Verkehr zu senken: Zum einen durch den Einstieg in die Elektromobilität, zum anderen durch den Einsatz von alternativen Kraftstoffen wie Biokraftstoffen oder regenerativ erzeugtem Wasserstoff bzw. CO<sub>2</sub>-ärmeren Kraftstoffen wie Erdgas oder Flüssiggas (siehe z. B. Abbildung 76). Gleichzeitig muss aber auch der Energieverbrauch insgesamt gesenkt werden, so dass die Menge der zur Verfügung stehenden, CO<sub>2</sub>-armen und CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffe bzw. des Fahrstroms zur Versorgung des gesamten Energieverbrauchs des Verkehrs ausreichen. Eine Studie des Öko-Instituts zusammen mit der Prognos AG im Auftrag des Umweltverbandes WWF hat beispielsweise untersucht, wie für Deutschland ein ambitioniertes Klimaschutzziel mit einer Treibhausgasreduzierung von 90 % bis 2050 möglich ist. Die Studie zeigt für den Verkehrsbereich folgendes [Prognos/Öko-Institut 2009]:

- Im Güterverkehr können bis 2050 die Energieverbräuche aufgrund des weiter prognostizierten Verkehrswachstums – ähnlich wie im Luftverkehr – nicht nennenswert gesenkt werden. Gleichzeitig können alternative Antriebskonzepte wie Elektromobilität aufgrund der begrenzten Reichweite der Fahrzeuge im Güterfernverkehr auch zukünftig nur begrenzt eingesetzt werden. Dies bedeutet, dass die nur begrenzt verfügbaren Biodieselmotoren bis 2050 vor allem im Güterverkehr eingesetzt werden müssen.
- Im Gegensatz zum Güterverkehr ist im Personenverkehr eine Elektrifizierung des Verkehrs möglich. Da Strom bis 2050 CO<sub>2</sub>-arm produziert werden kann und die alternativen Kraftstoffe nur begrenzt zur Verfügung stehen, muss überall dort auf Elektromobilität umgestiegen werden, wo diese möglich ist.



**Abbildung 76 Endenergieverbrauch des Personen- und des Güterverkehrs nach Energieträgern in PJ im Innovationsszenario der Studie Modell Deutschland [Prognos /Öko-Institut 2009]**

Für den ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren bedeutet dies, dass bis 2050 zwei sinnvolle Optionen zur Verfügung stehen, um nicht unnötig größere Mengen an Biokraftstoffen einzusetzen: Die Elektromobilität oder der Einsatz von Brennstoffzellenbussen mit Verwendung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Energieträger.

Mit dem zeitlich weiter entfernten Betrachtungshorizont bis 2050 steigen jedoch auch die Unsicherheiten hinsichtlich der technologischen Entwicklungspfade. Bei den Linienbussen wurden für den Zeithorizont bis 2030 lediglich die Fahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsmotor (Diesel und Erdgas), die Hybridbusse und die Oberleitungsbusse betrachtet. Nicht in die Betrachtung einbezogen wurden elektrisch betriebene Batteriebusse, Plug-in-Hybridbusse und Busse mit Brennstoffzellenantrieb. Für den Zeitraum bis Jahr 2030 erscheint dieses Vorgehen auch plausibel: zum einen sind derzeit keine Produkte auf dem Markt, die über ein Versuchsfahrzeug hinausgehen, zum anderen ist mittelfristig mit sehr hohen Zusatzkosten zu rechnen, sei es für die benötigten Energiespeicher (Batteriebusse) oder die Brennstoffzelle und den Wasserstoff als Kraftstoff. Langfristig kann es jedoch durchaus sein, dass aufgrund der fortschreitenden Entwicklung in der Batterietechnik und Skaleneffekte durch eine vermehrte Elektrifizierung im Pkw-Bereich die Kosten der Energiespeicher auf ein wirtschaftliches Niveau sinken.

Die hohen Batteriekosten werden als wesentliches Hemmnis für die Markteinführung von **Elektrobussen** gesehen. Die Annahmen der Nationalen Plattform Elektromobilität zu den zukünftigen Kosten für Energiespeicher sind in Abbildung 77 dargestellt. Sie lagen demnach im Jahr 2011 bei rund 800 € pro kWh [NPE 2011]. Aufgrund der Entwicklung im Pkw-Bereich wird allerdings in den nächsten Jahren eine Kostendegression erwartet. Für den Pkw-Bereich

hat sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2020 den Einsatz von einer Million Elektrofahrzeugen in Deutschland voranzubringen. Das vom BMU geförderte Forschungsprojekt OPTUM („Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen“) geht hingegen davon aus, dass dieses Ziel erst im Jahr 2022 erreicht werden wird, wobei es sich bei einem Großteil der Fahrzeuge um Plug-in-Hybridfahrzeuge und nur eine geringe Anzahl von vollelektrischen Pkw handeln dürfte [Öko-Institut 2011]. Im Jahr 2030 können der Studie zufolge rund 6 Millionen elektrische Pkw auf deutschen Straßen fahren, wobei davon rund eine Million vollelektrisch betrieben werden.

Für die Linienbusse ergibt sich jedoch ein anderes Bild: Im Gegensatz zu den Pkw existiert hier im Vergleich ein wesentlich kleinerer Markt. In der vorliegenden Studie wird beispielsweise für den Zeitraum von 2020 bis 2030 von jährlich 3.200 bis 3.500 Neuzulassungen ausgegangen. Auch die Entwicklung und die Zunahme des Angebotes an Hybridfahrzeugen verlaufen bei den Linienbussen wesentlich langsamer als bei den Pkw, wo mit dem Toyota Prius bereits seit 1997 erfolgreich ein Hybridkonzept auf dem Markt verfügbar ist.

Trotzdem wird die Entwicklung im Pkw-Bereich, sofern die gesetzten Ziele erreicht werden, zu sinkenden Batteriekosten führen. Die nationale Plattform für Elektromobilität geht beispielsweise für 2020 von um 65 % niedrigeren Kosten aus (280 €/kWh). Das Öko-Institut [2011] sieht für 2030 Kosten in Höhe von 230 € pro kWh.

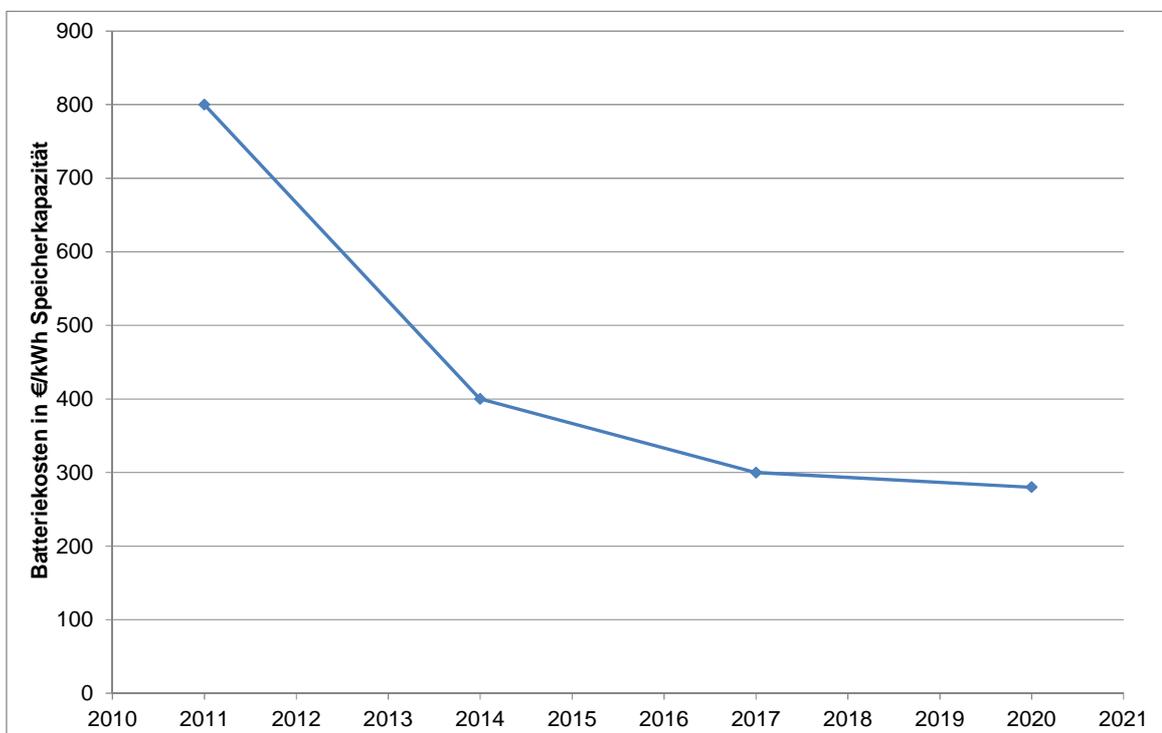


Abbildung 77 Annahmen der Nationalen Plattform für Elektromobilität zur Entwicklung der Batteriekosten [NPE 2011]

Schlussbericht

Entscheidend für den wirtschaftlichen Einsatz von elektrisch betriebenen Linienbussen sind jedoch nicht allein die Batteriekosten. In der Dissertation „Strategische Optimierung von Linienbusflotten“ von Ralph Pütz [2010] werden die Fahrzeugkosten von Bussen mit verschiedenen Antriebstechnologien und Abgasstandards im Modell berücksichtigt. Diese Kosten werden am Beispiel eines Solo-Stadtbusses bezogen auf ein Diesel-Euro V-Fahrzeug dargestellt. Die Kaufpreise basieren dabei auf Angaben deutscher Fahrzeughersteller und Verkehrsbetriebe. Pütz [2010] geht in seinen Modellannahmen beispielsweise für einen Solo-Stadtbuss mit Brennstoffzellentechnologie von einem Kaufpreis von 2.000.000 € im Vergleich zu 240.000 € für einem konventionellem Bus (EEV) bzw. 315.000 € für einen Dieselhybridbus aus. Unter Berücksichtigung von Restwert, Abschreibungen und Kapitalverzinsung ergibt sich für Brennstoffzellenbusse ein rund neunmal höherer Kapitaldienst. Da die gesamten jährlichen Fahrzeugkosten auch die Werkstattkosten und die Kosten von Kraftstoff- und Reagenzverbrauch berücksichtigen müssen, ergeben sich bei den Brennstoffzellenbussen noch rund fünfmal höhere Kosten als bei einem Diesel-Euro V-Bus.

Aus den Modellannahmen lässt sich gut erkennen, dass alle anderen Antriebstechnologien heute bezogen auf einen Diesel-Euro V-Solostadtbuss zu Mehrkosten führen. Bei den Hybridbussen geht Pütz immerhin von Mehrkosten von 12 % aus. Den Hybridbussen folgen die Batteriebusse, die zu 17 % höheren Kosten führen würden. Mit fast 400 % höheren, jährlichen Fahrzeugkosten sind wasserstoffbetriebene Busse, unabhängig davon, ob diese über einen Verbrennungsmotor oder eine Brennstoffzelle verfügen, deutlich teurer.

<b>Antriebs- technologie</b>	<b>Summe Kapitaldienst %</b>	<b>Jährliche Werkstatt- kosten %</b>	<b>Jährliche Kraftstoffkosten %</b>	<b>Jährliche Fahrzeug- kosten %</b>
Diesel-Euro V	100	100	100	<b>100</b>
Diesel-EEV	104	112	102	<b>105</b>
Diesel EEV-Hybrid	137	131	82	<b>112</b>
H2-ICE	187	126	316	<b>233</b>
H2-ICE-Hybrid	220	146	253	<b>221</b>
BZ	870	160	316	<b>496</b>
BZ-Hybrid	913	180	253	<b>488</b>
Batterie	187	131	51	<b>117</b>
1) einschließlich Reagenzkosten (AdBlue) <b>Quelle:</b> [Pütz 2010], eigene Berechnungen				

**Tabelle 27 Kapitaldienst, Werkstattkosten, Kraftstoffkosten und gesamte Fahrzeugkosten von Stadt-Solobussen in Abhängigkeit der Antriebstechnologie in % bezogen auf einen Diesel-Euro V-Bus**

Aus Sicht der Verkehrsunternehmen sind nach 2030 weiter steigende Energiepreise die Hauptmotivation, auf den Einsatz von elektrisch betriebenen Bussen zu setzen. Insbesondere stellt sich die Frage, ob sich die Konkurrenz um die Verfügbarkeit der Biokraftstoffe mit dem straßengebundenen Güterfernverkehr auch auf die Kraftstoffkosten auswirkt. Der Einsatz von elektrisch betriebenen Lkw mit Energiespeichern scheint in diesem Bereich aufgrund von

geringen Reichweiten nicht wahrscheinlich, so dass diese auf die verfügbaren Mengen Biokraftstoff angewiesen sein werden. Mit den steigenden Kraftstoffkosten bei sinkenden Kosten für die Energiespeicher könnten elektrisch betriebene Busse daher zunehmend wirtschaftlich betrieben werden.

Zudem spricht auch die derzeitige Entwicklung bei den Hybridbussen dafür, dass für den Zeitraum nach 2030 verstärkt Batteriebusse eingesetzt werden könnten. Der Einsatz von Hybridbussen bis 2030 wird vor allem als Option gesehen, mittelfristig die Energieeffizienz im Busbereich zu erhöhen. Wie Abbildung 78 zeigt, können serielle Hybridbusse bereits als Übergang zu rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen angesehen werden. Für den rein elektrischen Betrieb werden grundsätzlich dieselben Komponenten wie für den Hybridbetrieb benötigt. Dabei können serielle Plug-In-Hybridbusse, die an Haltestellen, Endhaltestellen oder während der Nachtabstellung beladen werden, als zusätzlicher Übergangsschritt hin zu vollelektrischen Fahrzeugen gesehen werden. Elektromobilität im Busbereich besitzt daher eine größere Anschlussfähigkeit an die Hybridentwicklung als die Wasserstoffbusse. Die beschriebene Entwicklung wird auch von den Verkehrsunternehmen erwartet [Interviews].

Allerdings setzt dies voraus, dass die Entwicklung der Speichertechnologie in Bussen (Batterien oder Super- oder Ultracaps) in den nächsten Jahren erfolgreich verläuft. Welche Auswirkungen der Umstieg auf die Elektromobilität im Busbereich konkret für die Energieeffizienz des ÖPNV mit Bussen hat, ist – wie oben beschreiben – nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens. Es ist aber klar davon auszugehen, dass im Jahr 2050 zur Einhaltung ambitionierter Klimaschutzziele der ÖPNV mit konventionellem Motor nur noch in Nischenanwendungen eine Rolle spielen wird.

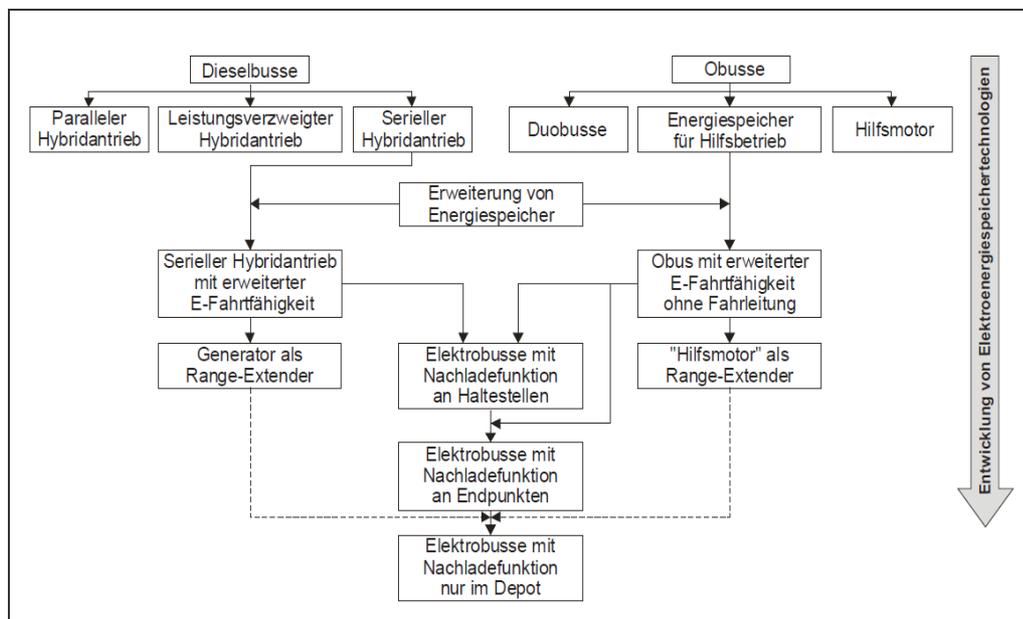


Abbildung 78 Darstellung von Entwicklungspfaden vom Hybrid- und Oberleitungsbusen hin zu reinen Elektrobussen [VCDB 2010]

Allerdings zeigen die Entwicklungen bei den Hybridbussen, dass bei Pkw erfolgreiche Konzepte nicht einfach auf den Busbereich übertragen werden können. Oftmals sind spezielle Anpassungen notwendig, um für den tatsächlichen Einsatzbereich die maximalen Einsparpotentiale zu realisieren. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass sich die Entwicklung im Vergleich zum Pkw deutlich verzögert realisieren wird.

Für rein elektrisch betriebene Linienbusse wird deshalb davon ausgegangen, dass sie ab 2020 in einzelnen Flotten als Versuchsfahrzeuge in Betrieb genommen werden. Aufgrund der Erfahrungen mit der verzögerten Fahrzeugentwicklung bei den Hybridbussen, verglichen mit den Pkw, wird in der vorliegenden Studie davon ausgegangen, dass ein vorseriennaher Betrieb erst ab 2030 stattfinden wird. Weiterhin wird der Druck auf die Verkehrsunternehmen zunehmen, den ÖPNV umwelt- und klimafreundlich zu betreiben. Mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien im Strommix (siehe Kapitel 7.2.1) wird der Umstieg von konventionellen Bussen oder Dieselhybridbussen nach 2030 zunehmend größere Umweltvorteile mit sich bringen.

Prinzipiell ist auch eine Renaissance der O-Busse denkbar, insbesondere wenn durch bessere Speichertechnologie das zeitweise oberleitungsfreie Fahren ermöglicht wird. Dies hätte den Vorteil, dass auf eine bereits bewährte Technologie gesetzt würde, besonders aber in Innenstädten auf die teilweise als störend empfundene Oberleitung verzichtet werden könnte. Letztlich müssten aber in diesem Fall größere Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur getätigt werden. Die Erfahrungen aus der Schweiz zeigen, dass der höhere Investitionsaufwand für Oberleitungen sich allerdings nur bei aufkommensstarken Linien amortisiert [Infras 2006 und 2007].

In der vorliegenden Studie wird deshalb davon ausgegangen, dass sich die Zahl der Neuzulassungen an Elektrobussen ab 2030 erhöhen wird. Aufgrund der im Vergleich zu den Schienenfahrzeugen kurzen Lebensdauer der Linienbusse wird der Anteil der Elektrobusse am Gesamtbestand bis 2050 einen relevanten Anteil besitzen. Trotzdem werden vermutlich auch 2050 noch Hybridfahrzeuge und Fahrzeuge mit anderen Antriebskonzepten sowohl im Bestand als auch in den Neuzulassungen zu finden sein.

Der Einsatz von **Wasserstoffbussen** scheint besonders in Regionen sinnvoll, in denen große Mengen an Windenergie produziert werden. In windreichen Zeiten könnte überschüssiger Strom in Form von Wasserstoff gespeichert und durch Brennstoffzellenbusse genutzt werden, ohne über lange Distanzen transportiert werden zu müssen. Auch batterieelektrische Fahrzeuge könnten zu einem Lastenmanagement in der Energieversorgung in Verbindung mit der Nutzung regenerativer Primärenergien beitragen [Pütz 2010]. Letztlich ist beim Einsatz von Wasserstoff der Bereitstellungspfad für die Treibhausgasemissionen entscheidend. Wird Wasserstoff mittels Elektrolyse aus Wasser hergestellt, ergibt sich gegenüber den batterieelektrischen Fahrzeugen ein zusätzlicher Wirkungsgradverlust. Der Wirkungsgrad der Elektrolyse dürfte in zentralen Anlagen zukünftig bei 70 % liegen [Wietschel et al. 2010]. Zusätzlich muss Energie aufgewendet werden, um den Wasserstoff zu komprimieren oder zu verflüssigen. Wietschel et al. [2010] gehen davon aus, dass für die Komprimierung im Jahr 2030 pro kWh Wasserstoff 0,21 kWh Strom benötigt wird. Aufgrund dieser Verluste wird der

Gesamtenergieverbrauch der Wasserstoffbusse in Kombination mit der Elektrolyse über dem der batterieelektrischen Busse liegen. In den durchgeführten Interviews und dem Expertenworkshop wurde deutlich, dass hinsichtlich der Antriebstechnologie der Dieselsebusse bei den Linienbussen keine eigenständige Entwicklung stattfindet sondern Motoren aus dem Lkw-Bereich eingesetzt werden. Als Begründung wurde von den Herstellern der zu kleine Markt für die Busse genannt. Es scheint daher unwahrscheinlich, dass die Fahrzeug- und Komponentenhersteller Brennstoffzellensysteme alleine für den Linienbusbetrieb entwickeln werden. Sollten Wasserstoff-Brennstoffzellen zukünftig verstärkt im Güterverkehr eingesetzt werden, wäre auch ein Einsatz in Linienbussen denkbar. Es scheint zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund des hohen Platzbedarfes der Wasserstofftanks für diesen Bereich allerdings eher unwahrscheinlich, dass im Lkw-Verkehr auf Brennstoffzellen-Technologie gesetzt wird. Die Einschätzung der Autoren, dass der Einsatz von mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen eher unwahrscheinlich ist, wird nicht von allen Akteuren geteilt. NOW [2011] beispielsweise sieht Brennstoffzellenfahrzeuge neben batterieelektrischen Fahrzeugen im Pkw-Bereich auf dem Weg zur kommerziellen Einführung. Die Kosten für die Brennstoffzellen könnten NOW [2011] zufolge bis 2020 um 90 % sinken, sofern Investitionen in die Brennstoffzelleninfrastruktur die Massenproduktion anregen. Ab dem Jahr 2025 werden in einem Szenario keine großen Unterschiede bei den Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership / TCO) zwischen Pkw mit Verbrennungsmotor und Batterieelektrischen Pkw bzw. mit Wasserstoff betriebenen Pkw gesehen. Die großen Unsicherheiten bezüglich der technologischen Entwicklungspfade bis zum Jahr 2050 müssen deshalb an dieser Stelle noch einmal hervorgehoben werden.

Eine wesentliche Eingangsgröße für die Berechnung des gesamten Endenergieverbrauches und der gesamten Treibhausgasemissionen in den Kapiteln 7.2 und 7.3 ist die durch den ÖPNV erbrachte **Verkehrsleistung**. Entsprechend dem Vorgehen in den Szenarien bis 2030 (vgl. Kapitel 5.1 und 6.1) basiert die Betrachtung für den Zeitraum von 2030 bis 2050 hinsichtlich der Entwicklung der Verkehrsleistung auf dem Referenzszenario von Prognos/Progtrans, welches im Auftrag des BMVBS entwickelt wurde (Stand Oktober 2011) [Prognos/Progtrans 2011]. Im Referenzszenario von Prognos/Progtrans werden ausschließlich Aussagen zur Entwicklung des gesamten Öffentlichen Personenstraßenverkehrs (ÖSPV) getroffen, die Aufteilung der Verkehrsleistung auf Linien- und Gelegenheitsverkehre im ÖSPV sowie eine weitere Unterteilung der Linienverkehre nach Straßen-, Stadt- und U-Bahnen und Busverkehre wird entsprechend dem Vorgehen in den Kapiteln 5.1 und 6.1 fortgeschrieben.

	<b>2008</b>	<b>2050</b>	<b>Δ 2050/08</b>
	<i>Mrd. Pkm</i>	<i>Mrd. Pkm</i>	%
<b>Öffentl. Straßenpersonenverkehr</b>	<b>79,7</b>	<b>79,1</b>	<b>-0,8%</b>
Linienverkehr	55,6	56,5	1,6%
Straßen-, Stadt-, U-Bahnen	16,1	18,6	15,5%
Busverkehre	39,5	37,9	-4,1%
Gelegenheitsverkehr	24,1	22,6	-6,2%
<b>Quellen:</b> [ViZ 2011]; [Prognos/Protrans 2011]; eigene Berechnungen.			

**Tabelle 28 Entwicklung der Verkehrsleistung des Öffentlichen Straßenpersonenverkehrs (ÖSPV) nach dem Referenzszenario von Prognos/Protrans bis 2050 (Stand Oktober 2011)**

## 7.2 ÖPNV mit konventionellem Verbrennungsmotor

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens können für im ÖPNV eingesetzte Linienbusse nur orientierend Entwicklungstrends bis 2050 skizziert werden. Eine Quantifizierung zukünftiger Entwicklungen auf Energieeffizienz und Treibhausgasemissionen der gesamten ÖPNV-Flotte ist nicht möglich. Dies hat im Wesentlichen zwei Gründe:

Zum einen ist im Busverkehr, wie in Kapitel 7.1 beschrieben, der Trend hin zur Elektromobilität nach 2030 zu erwarten. Im Busbestand werden sich daher bis 2050 Elektrobusse immer mehr durchsetzen und damit die Energieeffizienz und die Treibhausgasemissionen des ÖPNV maßgeblich mit beeinflussen. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde vom Auftraggeber explizit die Untersuchung des Einsatzes der Elektromobilität für Busse ausgeklammert. Verfügbarkeit der Technologie sowie damit verbundene wirtschaftliche Aspekte (z. B. Mehrkosten für Fahrzeuganschaffung) wurden daher nicht untersucht, weshalb keine eigene Markteinführungsszenarien entwickelt werden konnten. Zudem standen keine entsprechenden Informationen aus derzeit laufenden Vorhaben des BMVBS zur Verfügung. Aus diesem Grund konnte die Einführung von Elektromobilität oder Wasserstoff nicht in das Bestandsmodell, welches in den Kapiteln 5 und 6 zur Anwendung kam, integriert werden. Eine Bestandsmodellierung für den Zeitraum von 2030 bis 2050 war damit nicht möglich. Um Plug-in- und batterieelektrische Busse sowie Wasserstoffbusse im Bestand richtig abbilden zu können, müsste insbesondere die Frage, ab wann und in welcher Stückzahl diese Fahrzeuge in den Markt kommen, detaillierter untersucht werden.

Zum anderen wird die weitergehende Elektrifizierung der Busverkehre dazu führen, dass eine wichtige Energiequelle im ÖPNV Fahrstrom sein wird. Damit wird letztendlich die Treibhausgasbilanz im Wesentlichen davon abhängen, inwieweit CO<sub>2</sub>-armer bzw. CO<sub>2</sub>-freier Strom bis 2050 flächendeckend in Deutschland zur Verfügung stehen wird. Um diese Frage im Detail zu untersuchen, müssen die Wechselwirkungen der zunehmenden Elektromobilität und des damit zusätzlichen Strombedarfs und die Rückwirkungen auf die Stromerzeugung untersucht werden. Dies war ebenfalls nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens. Im Folgenden kann lediglich auf Prognosewerte verwiesen werden, wie sich zukünftig die Treibhausgasemissionen der Stromproduktion entwickeln werden.

Um dennoch eine orientierende Aussage über den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen treffen zu können, werden in den folgenden Kapiteln 7.2.3 und 7.2.4 jeweils die spezifischen Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen der im Jahr 2050 neu zugelassenen Busse dargestellt. Diese werden auch mit der zu erwartenden Entwicklung im Pkw-Bereich verglichen, wobei es sich dabei um den Fahrzeugbestand handelt, also einer Mischung aus älteren Fahrzeugen und neu zugelassenen Fahrzeugen, der in der Regel höhere Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen als Neuwagen aufweist. Zusätzlich zu den spezifischen Verbräuchen und Emissionen werden die Gesamtenergieverbräuche und Gesamtemissionen dargestellt. Auch an dieser Stelle handelt es sich um die Verbrauchswerte der neu zugelassenen Linienbusse, die Werte liegen demnach unter den Ergebnissen, wie sie aus einer Bestandsmodellierung hervorgegangen wären. Dabei werden vereinfachte orientierende Abschätzungen für die elektrisch betriebenen Linienbusse durchgeführt.

Wechselwirkungen durch den zusätzlichen Stromverbrauch auf den Strommarkt bleiben dabei unberücksichtigt.

### 7.2.1 Erneuerbare Energien

Wie Kapitel 5.2.1 darlegt, ist der Einsatz von Biokraftstoff in Reinform für den ÖPNV mit konventionellen Verbrennungsmotoren bis zum Jahr 2030 aus Kostengründen eine realitätsferne Option und wird aus diesem Grund weder im Referenzszenario noch in den Effizienzszenarien betrachtet. Trotzdem verringern sich die durch die Verbrennung von Dieselmotoren verursachten Treibhausgasemissionen, da von einer Erhöhung der Biokraftstoffbeimischung von 7 % im Jahr 2011 auf 13 % im Jahr 2020 ausgegangen wird [ifeu 2010]. Von 2020 bis 2030 wurde keine weitere Steigerung der Biokraftstoffanteile unterstellt. Neben dem Anteil der beigemischten Biokraftstoffe an den Kraftstoffen ist auch der tatsächliche Emissionsvorteil der beigemischten Biokraftstoffe gegenüber den konventionellen fossilen Kraftstoffen entscheidend für die Treibhausgasreduzierung des gemischten Diesels. Es wurde davon ausgegangen, dass die Treibhausgasreduzierung für die beigemischten Biokraftstoffe von 50 % im Jahr 2008 auf 60 % im Jahr 2018 steigt. Für den Zeitraum von 2018 bis 2030 wurde von einer konstanten Minderung ausgegangen [ifeu 2010].

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde für den Zeitraum bis 2050 angenommen, dass sich die Beimischungsquote leicht auf 20 % erhöht. Zusätzlich steigt auch die Treibhausgasreduzierung der Biokraftstoffe. Für das Jahr 2050 wird von einer Minderung von 90 % ausgegangen.

Gleichzeitig wird die Förderung von Rohöl zukünftig verstärkt unter größerem Aufwand erfolgen; es wird beispielsweise verstärkt Rohöl aus Ölschiefern und großen Tiefen gefördert werden. Dadurch werden die vorgelagerten Treibhausgas-Emissionen (Well-to-Tank-Emissionen) des fossilen Dieselmotors ansteigen. Der Anstieg dieser Emissionen wird für das Jahr 2050 mit 20 % veranschlagt.

Wie in Kapitel 7.1 ausgeführt, wird für den ÖPNV bis 2050 eine Umorientierung im Busverkehr auf Elektromobilität erwartet. Damit werden im ÖPNV der Zukunft geringere Mengen an Kraftstoffen verbraucht. Daher stellt sich auch nicht zentral die Frage, wie im Kraftstoffverbrauch der Anteil erneuerbarer Energie erhöht werden kann. Vielmehr ist die Frage, inwieweit die Stromversorgung des ÖPNV CO<sub>2</sub>-arm erfolgen kann. Grundsätzlich muss davon ausgegangen werden, dass sich bis zum Jahr 2050 die heute noch explizit angebotenen Ökostromprodukte nicht mehr auf dem Markt befinden werden. Vielmehr wird die gesamte Stromversorgung in Deutschland stark auf regenerativen Energien basieren. Zudem wird von vielen Gutachtern erwartet, dass ab 2025 Technologien zur Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> aus Kraftwerksabgasen (Carbon Dioxide Capture and Storage; kurz als CCS-Technologie bezeichnet) am Markt durchsetzen wird [Prognos et al. 2010; Prognos/Öko-Institut 2009].

In der Grundlagenstudie zum Energiekonzept der Bundesregierung wird aufgezeigt, dass 2050 in allen dort untersuchten Zielszenarien für Deutschland CO<sub>2</sub>-Minderungen pro kWh Strom von bis zu 75 % gegenüber 2008 technisch möglich sind. Der Anteil erneuerbarer Energien beträgt in diesen Szenarien 76 % und 85 % an der Bruttostromerzeugung. Lediglich im Referenzszenario, in dem keine ambitionierten Treibhausgasminderungsziele bis 2050 hinterlegt sind, werden lediglich Minderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen pro kWh Strom von 40 % bei einem Anteil erneuerbarer Energieträger von 54 % erwartet [Prognos et al. 2011]. Dies zeigt, dass der ÖPNV bis 2050 indirekt an der starken Minderung der Treibhausgasemissionen im deutschen Kraftwerkspark profitieren wird. Er ist damit – zukünftig auch im Busbereich – Profiteur an der Ausrichtung der deutschen Stromproduktion auf erneuerbare Energieträger.

Für den Strombezug durch die Verkehrsunternehmen im Jahr 2050 werden im Folgenden drei Fälle beschrieben, die sich im Anteil von Strom aus erneuerbaren Quellen unterscheiden.

- **Fall 1:** Für den Fahrstrom des elektrisch betriebenen ÖPNV – zukünftig neben den Straßen-/Stadt- und U-Bahnen auch Teile der Linienbusse - wird für das Jahr 2050 im Referenzszenario und im „Effizienzscenario hoch“ analog zu den Kraftstoffen davon ausgegangen, dass die ÖPNV-Unternehmen nicht aktiv Strom aus erneuerbaren Energiequellen einkaufen sondern lediglich von dem sich verbessernden Strommix in Deutschland profitieren. Die Emissionsfaktoren (siehe Tabelle 29) werden analog zum Kapitel 5.3.2 dem Referenzszenario der Studie „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ [Prognos et al. 2010] zugrunde gelegt. Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung beträgt demnach 54 %, zudem wird davon ausgegangen, dass CCS bei rund 61 % der Stromerzeugung durch Braun- und Steinkohle durchgeführt wird. Unter Berücksichtigung der durch die Verteilung von Strom entstandenen Verluste sowie Emissionen durch die Förderung, die Herstellung und den Transport der in den Kraftwerken verbrannten Energieträger führt dies zu Emissionen von 206 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro kWh elektrische Energie, denen die weiteren Berechnungen zu Grunde gelegt sind. Dies entspricht einer Minderung gegenüber 2030 um rund 52 %.
- **Fall 2:** Für das „Effizienzscenario hoch“ wird eine weitere Variante betrachtet, bei der die ÖPNV-Unternehmen bewusst mit dem Energieversorger ihre Stromversorgung auf erneuerbare Energie ausrichten und gezielt Anlagen zur Erzeugung erneuerbaren Stroms bauen (vgl. Fall 2 in Kapitel 6.3.2). Dadurch steigt der Anteil erneuerbarer Energie am Strommix für die ÖPNV-Unternehmen schneller als deren Anteil bei der bundesdeutschen Stromproduktion und damit sinken auch die Treibhausgasemissionen pro produzierter kWh Strom. Für das Jahr 2050 wird davon ausgegangen, dass der Anteil im Strommix der ÖPNV-Unternehmen dem Szenario IA der Studie „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ [Prognos et al. 2010] entspricht. Demnach stammt rund 80 % der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Quellen. Zudem wird mittels CCS in rund 94 % der verbleibenden Kohlekraftwerke das CO<sub>2</sub> abgeschieden. Pro kWh Strom werden in diesem Fall 86 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittiert (Tabelle 29). Dies entspricht einer Minderung bezogen auf das Jahr 2030 gegenüber dem Referenzszenario um 80 % und gegenüber dem Szenario „+ erneuerbare Energien“ um 61 %. Sind den Berechnungen der

Treibhausgasemissionen im „Effizienzzenario hoch“ diese Emissionsfaktoren zugrunde gelegt, werden sie durch das Kürzel „+ EE“ gekennzeichnet.

- **Fall 3:** Für das „Effizienzzenario hoch“ wird für den Vergleich der Linienbusse mit den Pkw eine weitere Variante dargestellt, in der sowohl die Pkw als auch die Linienbusse zu 100 % regenerativ erzeugten Strom beziehen. Dies liegt darin begründet, dass einige Pkw-Hersteller derzeit den Weg gehen, die von ihnen produzierten Elektro-Pkw mit Strom aus zusätzlich erzeugten erneuerbaren Energien zu betreiben. Diese Variante kann so verstanden werden, dass die Verkehrsunternehmen zusammen mit den angeschlossenen Stadtwerken dem Vorgehen der Automobilhersteller folgen und komplett auf erneuerbaren Strom umsteigen. In diesem Fall basieren die errechneten Emissionsfaktoren auf der Zusammensetzung der Kraftwerke zur Produktion von erneuerbarem Strom entsprechend ihrer Anteile an der Bruttostromerzeugung im Referenzzenario der Studie „Energie-szenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ [Prognos et al. 2010]. Die Treibhausgasemissionen pro kWh liegen den Berechnungen zufolge bei 48 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro kWh (siehe Tabelle 29).

Größe	Einheit	2050		
		Referenz-szenario Effizienz-szenario hoch (Fall 1) <sup>1)</sup>	Effizienz-szenario hoch + erneuerbare Energien (Fall 2) <sup>2)</sup>	Effizienz-szenario hoch + erneuerbare Energien (Fall 3) <sup>3)</sup>
Anteil erneuerbare Energien	%	54 %	80 %	100 %
CO <sub>2</sub> -Emissionen	g CO <sub>2</sub> /kWh	194	77	38
CO <sub>2</sub> -Äquivalent- Emissionen	g CO <sub>2</sub> e/kWh	206	86	48
<sup>1)</sup> Basiert auf dem Referenzszenario [Prognos et al. 2010]. – <sup>2)</sup> Basiert auf dem Szenario IA [Prognos et al. 2010]. – <sup>3)</sup> Basiert auf dem Referenzszenario (Strom aus erneuerbaren Quellen) [Prognos et al. 2010]. <b>Quellen:</b> [Prognos et al. 2010]; [GEMIS 4.7]; eigene Berechnungen.				

**Tabelle 29 CO<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionsfaktoren für Strom in den Jahren 2020 und 2030 einschließlich Verteilungsverluste in den Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien**

### 7.2.2 Energieeffizienz

In Kapitel 4.1.1 wurden eine Reihe von Effizienzmaßnahmen vorgestellt, welche den Energieverbrauch der Linienbusse mit konventionellen Verbrennungsmotoren reduzieren. Zudem hat ein Expertenworkshop mit Busherstellern [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011] im Rahmen des Forschungsvorhabens gezeigt, welche Energieeffizienzpotentiale bis 2030 zu erwarten sind (vgl. Abbildung 45).

Schlussbericht

Für den Zeitraum nach 2030 werden für die Diesel- und Dieselhybridbusse weitere Effizienzsteigerungen gegenüber 2010 erwartet. Gleichzeitig dürfte der größte Entwicklungsaufwand der Bushersteller jedoch in die Bereiche Hybridbusse und Elektrobusse fließen. Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass die maximal erschließbaren Energieeffizienzpotentiale (vgl. Kapitel 5.2.1 und 6.2.1) nach 2030 nicht weiter ansteigen, sich jedoch der realisierte Anteil dieser Maximalpotentiale weiter erhöht. Dies wird insbesondere dann der Fall sein, wenn die Maßnahmen unabhängig von der Antriebstechnologie sind oder aus Systemgründen bei den Hybrid- und Elektrobusen umgesetzt werden müssen. Als Beispiel für letztgenannten Fall kann die Elektrifizierung der Nebenaggregate genannt werden, die eine Voraussetzung dafür ist, dass Hybridbusse mit Start-Stopp-Automatik an den Haltestellen betriebsfähig sind. Tabelle 30 zeigt die Beiträge der einzelnen Maßnahmenbausteine sowie die prozentualen Anteile, die von den theoretischen Maximalpotentialen erschlossen werden.

Maßnahmenbereich	Realisierter Anteil des Maximalpotentials	Minderung bzw. Mehrverbrauch <sup>2)</sup>
<b>Maßnahmenwirkung „Referenzszenario“</b>		
Energetische Optimierung von Motor und Getriebe	50,0 %	-7,5 %
Techn. Maßnahmen zur Beeinflussung des Fahrerverhaltens	30,0 %	-4,5 %
Verbesserung der Energieeffizienz der Klimaanlage	37,5 %	-1,9 %
Energetische Optimierung der Nebenaggregate	75,0 %	-3,8 %
Mehrverbrauch durch gegenläufige Entwicklungen		+5,0 %
<b>Gesamtwirkung<sup>1)</sup></b>		<b>-12,4 %</b>
<b>Maßnahmenwirkung „Effizienzscenario hoch“</b>		
Energetische Optimierung von Motor und Getriebe	50,0 %	-7,5 %
Techn. Maßnahmen zur Beeinflussung des Fahrerverhaltens	60,0 %	-9,0 %
Verbesserung der Energieeffizienz der Klimaanlage	50,0 %	-2,5 %
Energetische Optimierung der Nebenaggregate	100,0 %	-5,0 %
Mehrverbrauch durch gegenläufige Entwicklungen		+2,5%
<b>Gesamtwirkung<sup>1)</sup></b>		<b>-20,1 %</b>
<sup>1)</sup> Die Gesamtwirkung der Einzelmaßnahmen ist nicht die Summe der Wirkungen der Einzelmaßnahmen. Die Gesamtwirkung ergibt sich durch Multiplikation der Einsparungen bzw. Mehrverbräuche. <sup>2)</sup> Die Verbrauchsminderung und der Mehrverbrauch beziehen sich auf den Gesamtverbrauch der Fahrzeuge in l/100 km. <b>Quellen:</b> [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]; eigene Berechnungen.		

**Tabelle 30 Kraftstoffeinsparungen bzw. Mehrverbrauch einzelner Maßnahmen für neu zugelassene Linienbusse im Jahr 2050 im Referenzszenario und im „Effizienzscenario hoch“ im Vergleich zu heutigen Dieselnissen (bezogen auf den Verbrauch in l/100 km) im Referenzszenario**

Tabelle 31 zeigt, dass im Referenzszenario im Jahr 2050 hinsichtlich der energetischen Optimierung der Nebenaggregate wesentlich höhere Anteile am Maximalpotential als in 2030 ausgeschöpft werden. Keine weitere Verbesserung wird hingegen für den Bereich Optimierung von Motor und Getriebe erwartet. Weiterhin wird von zusätzlichen Verbrauchern ausgegangen, die, wie auch im Jahr 2030, zu einem Mehrverbrauch von 5 % führen. Für das „Effizienzscenario hoch“ werden bereits hohe Anteile der Optimierung der Nebenaggregate in 2030 erschlossen. Weitere Einsparungen resultieren aus Maßnahmen, die den Busbetrieb so gestalten, dass der direkte Einfluss des Fahrers auf die Fahrweise minimiert wird. Die Teilnehmer des Expertenworkshops versprechen sich von dieser Maßnahme Minderungspotentiale von bis zu 15 %. Insgesamt führen diese Maßnahmenbündel bezogen auf heutige Fahrzeuge zu Minderungen des Kraftstoffverbrauches von rund 12 % im Referenzszenario und rund 20 % im „Effizienzscenario hoch“ (siehe Tabelle 31).

Für das Jahr 2050 werden allerdings die konventionellen Busse bei den Neuzulassungen nur noch eine geringe Rolle spielen. Im Vergleich zu 2030 werden die Hybridbusse nennenswerte Anteile im Bestand haben. Auch für die Hybridbusse wird für den Zeitraum von 2030 bis 2050 noch eine leichte Effizienzsteigerung gegenüber 2010 unterstellt, es wird sowohl im Referenzszenario als auch in „Effizienzscenario hoch“ von einer weiteren Minderung von 5 % gegenüber heutigen Bussen ausgegangen (siehe Tabelle 31).

Fahrzeugkonzept	Neuzulassungen 2050
	%
<b>Minderung gegenüber 2010 im Referenzszenario</b>	
Bus mit konventionellem Verbrennungsmotor	-12,4%
Diesel-Hybrid-Bus	-35,0%
<b>Minderung gegenüber 2010 im Effizienzscenario</b>	
Bus mit konventionellem Verbrennungsmotor	-20,1%
Diesel-Hybrid-Bus	-35,0%
<b>Quellen:</b> [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]; eigene Berechnungen.	

**Tabelle 31 Kraftstoffeinsparung der Neuzulassungen der konventionellen Busse und der Hybridbusse in Deutschland in den Jahren 2040 und 2050 im Referenzszenario und „Effizienzscenario hoch“ im Vergleich zu 2010**

Die Analyse der Energieeffizienz und damit der Treibhausgasemissionen von Wasserstoffbussen (Ottomotor und Brennstoffzelle) und elektrisch betriebenen Bussen war – wie bereits mehrfach erwähnt – nicht Gegenstand der vorliegenden Studie. Da sich bei voranschreitender Entwicklung und sinkenden Kosten der Energiespeicher zumindest bei elektrisch betriebenen Busse im Busbestand des Jahres 2050 wiederfinden dürften, wurde auf Basis des Energieverbrauchs der Oberleistungsbusse zumindest eine vereinfachte Abschätzung des Energieverbrauchs für Neufahrzeuge vorgenommen. Um einen genaueren Vergleich durchführen zu können, welcher sich entsprechend dem Vorgehen für 2030 in den

Kapiteln 5 und 6 auf den Fahrzeugbestand bezieht, müssten für die Elektro- und Wasserstoffbusse auch Energieverbräuche, Effizienzsteigerungen und die Marktdurchdringung bis 2050 erarbeitet werden. Die Abschätzungen in dieser Studie dürfen deshalb lediglich als orientierend verstanden werden und sollten zukünftig durch weitere Untersuchungen auf eine valide Datenbasis gestellt werden!

Für beide Fahrzeugarten wurde unterstellt, dass der spezifische Energieverbrauch pro Platz-km dem der Oberleitungsbusse entspricht. Für das Referenzszenario wurden keine Verbrauchsminderungen unterstellt, für das Szenario „Energieeffizienz“ wurde eine pauschale Verbrauchsreduktion von 10 % bis 2050 angenommen.

Diese vereinfachende Annahme berücksichtigt nicht, dass es zwischen den Antriebstechnologien Unterschiede hinsichtlich der Rückgewinnung der Bremsenergie geben wird. Während die Möglichkeit der Rückspeisung bei Oberleitungsbussen vom Netz und Linienplan abhängt, ist ein batterieelektrischer Bus davon unabhängig. Ein Wasserstoffbus bräuchte hingegen dafür einen zusätzlichen Energiespeicher. Ebenfalls bleibt bei dem gewählten Vorgehen unberücksichtigt, dass es sich bei den vorhandenen Energieverbrauchskennzahlen der Oberleitungsbusse um die Verbräuche handelt, die tatsächlich vom Unterwerk eingespeist werden. Verluste, die in den Oberleitungen der O-Busse auftreten, sind demnach in den Verbräuchen enthalten.

### 7.2.3 Energieverbrauch

Analog zu den Szenarien bis zum Jahr 2030 wird im Folgenden die Entwicklung der Einsparung des Energieverbrauchs auf Basis der spezifischen Werte pro Platz-Kilometer analysiert. Abweichend vom bisherigen Vorgehen ist bei den Linienbussen ein Vergleich der Energieeffizienz im Bestand nicht möglich, da das Bestandsmodell aufgrund der fehlenden Marktdurchdringungszahlen für Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten nicht fortgeführt werden konnte. Aus diesem Grund wird in der nachfolgenden Abbildung 79 bei den Linienbussen für den Zeitraum nach 2030 der Energieverbrauch der neu zugelassenen Busse dargestellt, welcher unter dem Durchschnittsverbrauch des Busbestandes liegt.

In der Abbildung 79 werden die Effizienzgewinne der Busse im Referenzszenario und im „Effizienzscenario hoch“ mit der Entwicklung des spezifischen Verbrauchs des Pkw-Verkehrs pro Platz-km verglichen. Die Darstellung erfolgt zur besseren Übersichtlichkeit auf das Jahr 2008 indiziert (Index: 2008 = 100).

Für den Vergleich mit den Pkw wurde bis zum Jahr 2030 entsprechend Kapitel 5.4.1 und 6.4.1 auf die Energieverbrauchswerte aus dem TREMOD-Modell (v. 5.25) zurückgegriffen. Dieses Vorgehen ist für den Zeitraum von 2030 bis 2050 nicht möglich, da das TREMOD-Modell lediglich einen Prognosehorizont bis 2030 besitzt. Als Datengrundlage für den Vergleich mit den Pkw nach 2030 wird auf Prognosewerte von Prograns/Prognos [2012] für das Jahr 2050 zurückgegriffen und von den Ausgangswerten im Jahr 2030 linear interpoliert (gestrichelte rote Linie). Die von Prograns/Prognos zur Verfügung gestellten Daten enthalten neben dem Fahrzeugbestand die durchschnittlichen Fahrleistungen und den spezifischen

Schlussbericht

Energieverbrauch differenziert nach Antriebstechnologie der Pkw. Für die darin enthaltenen elektrischen Fahrleistungsanteile der Plug-in-Hybrid-Pkw (80 % in 2050) und der Elektro-Pkw wurde von Ladungsverlusten von 10 % unterstellt. In geringem Umfang sind in den Prognosewerten bereits wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Pkw enthalten. Vereinfachend wurde für diese Fahrzeuge davon ausgegangen, dass der Wasserstoff zu 100 % per Elektrolyse bereitgestellt wird und für die Erzeugung von 1 kWh Wasserstoff 1,5 kWh elektrische Energie benötigt wird. Dieses stark vereinfachte Vorgehen ist angesichts der Tatsache, dass Brennstoffzellen-Pkw einen Anteil von <1 % an der Gesamtfahrleistung im Referenzszenario besitzen, vertretbar.

Abbildung 79 zeigt die auf 2008 bezogene Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km für Linienbusse. Im Vergleich zur Referenzentwicklung, bei der eine Minderung des spezifischen Endenergieverbrauchs bei den Neufahrzeugen von 17 % bis 2050 erreicht wurde, liegen die Einsparungen im „Energieeffizienzzenario hoch“, in dem ab 2030 Hybridbusse dargestellt sind, mit 35 % in 2050 deutlich höher. Der Vergleich zum Pkw-Verkehr zeigt jedoch, dass die Effizienzsteigerung der Linienbusse selbst bei unterstellter hoher Effizienz deutlich hinter dem Auto zurück bleiben, selbst wenn, wie in diesem Fall, die Neuzulassungen der Linienbusse mit dem Pkw-Bestand verglichen werden. Neben deutlichen Effizienzsteigerungen bei den Pkw mit konventionellen Antrieben liegt dies auch maßgeblich daran, dass bereits rund 23 % der Fahrleistung von besonders sparsamen Elektro-Pkw und Plug-in-Hybrid-Pkw erbracht werden, welche nach Prognostik/Prognos [2012] einen Anteil von rund 28 % am Pkw-Bestand des Jahres 2050 besitzen.

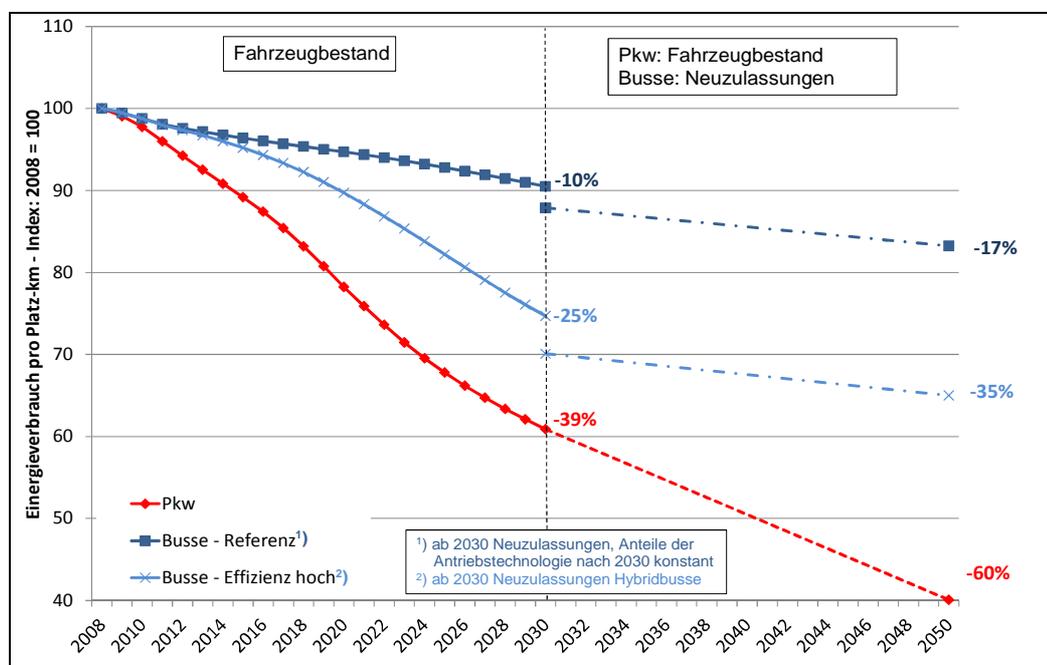


Abbildung 79 Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Platz-km von Linienbussen im Bestand (2008 bis 2030) im Referenzszenario sowie im „Effizienzzenario hoch“ und von neu zugelassenen Linienbussen (2030 bis 2050) im Vergleich zum Pkw-Bestand [eigene Berechnungen]

Schlussbericht

Die Ermittlung des absoluten Energieverbrauches der Linienbusse im Jahr 2050 setzt die Kenntnis über die Zusammensetzung des Busbestandes hinsichtlich Antriebstechnologie und Altersstruktur der Fahrzeuge voraus. Wie oben beschrieben, kann das Bestandmodell jedoch nach 2030 aufgrund des zu erwartenden Markteintritts von Elektro- und Plug-in-Hybridbussen, die nicht Gegenstand der vorliegenden Studie sind, nicht über 2030 hinaus fortgeführt werden. Um dennoch eine orientierende Aussage treffen zu können, wie hoch der Endenergieverbrauch der Linienbusse im Jahr 2050 ausfallen könnte, wurde untersucht, wie hoch der Energieverbrauch ausfallen würde, wenn die gesamte Verkehrsleistung von neu zugelassenen Bussen erbracht würde, deren Energieverbrauch in der Regel unter dem Durchschnittsverbrauch des Busbestands liegt.

Für das Jahr 2050 sind in der Abbildung 80 neben einem Referenzszenario, bei dem die Anteile der Antriebstechnologien nach 2030 konstant gehalten wurden, drei Varianten für ein „Effizienzscenario hoch“ dargestellt. Konkret wurde betrachtet, wie hoch der Endenergieverbrauch ist, wenn

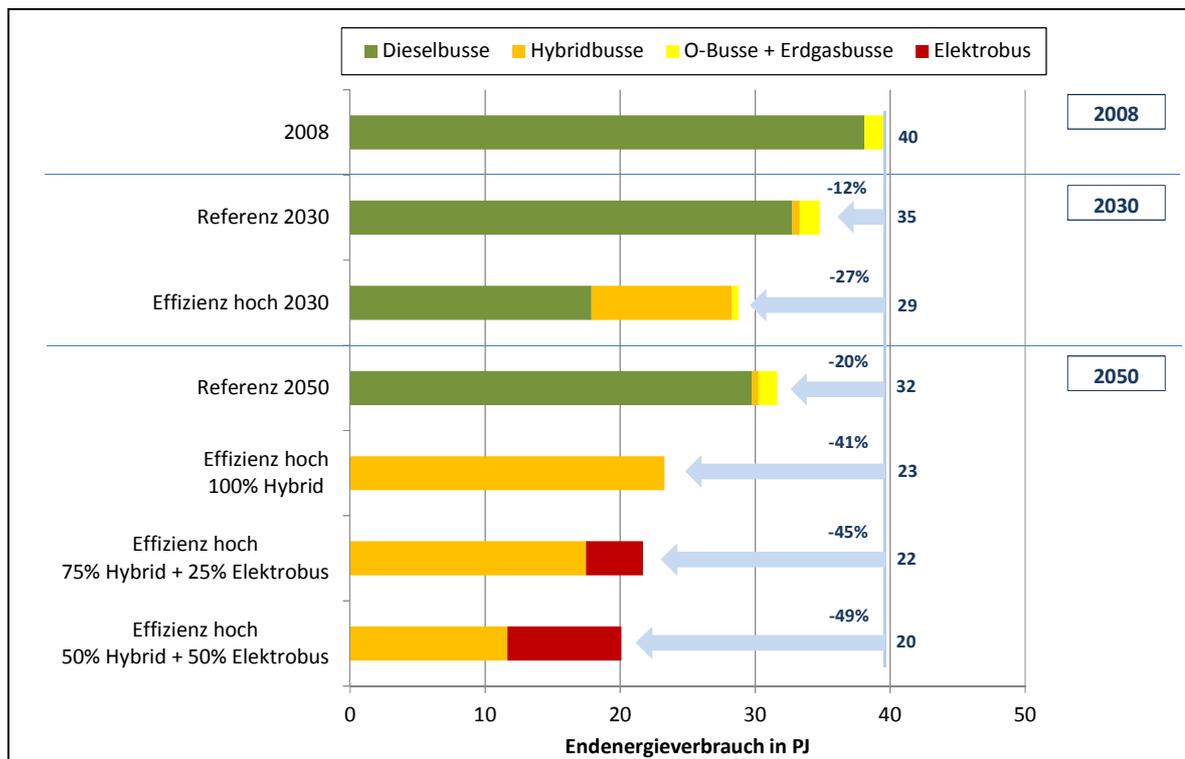
- 100 % Hybridbusse,
- 75 % Hybridbusse und 25 % Elektrobusse oder
- 50 % Hybridbusse und 50 % Elektrobusse

die Verkehrsleistung erbringen würden.

Dabei wurde für die Elektrobusse vereinfachend davon ausgegangen, dass der Energieverbrauch pro Platz-km dem der O-Busse entspricht.

Weiterhin zeigt Abbildung 80, dass der Endenergieverbrauch der Linienbusse im Referenzszenario im Jahr 2050 mit rund 31.600 TJ etwa 20 % unter dem von 2008 liegt, während er in 2030 noch bei rund 34.800 TJ gelegen hat. Im „Effizienzscenario hoch“ lag die Minderung des Endenergieverbrauches gegenüber 2008 bei etwa 27 % und erreichte einen Wert von 28.800 TJ. Mit den drei Varianten für das „Effizienzscenario hoch“ zeigt sich, dass deutlich stärkere Minderungen im Vergleich zum Referenzszenario möglich sind.

Würden im Jahr 2050 zu 100 % Hybridbusse eingesetzt, läge der Endenergieverbrauch mit rund 23.300 TJ 41 % unter dem Wert von 2008. Wenn im Jahr 2050 neben den Hybridbussen elektrisch betriebene Busse zum Einsatz kämen, ergäben sich Minderungen gegenüber 2008 von 45 % (25 % Elektrobusse) bzw. 49 % (50 % Elektrobusse). Der Energieverbrauch würde in diesen Fällen rund 21.700 TJ bzw. 20.100 TJ betragen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass es für einen hohen Rückgang des Endenergieverbrauches im Busbereich über 2030 hinaus zwingend erforderlich ist, dass durch geeignete Maßnahmen Hybridbusse verstärkt in den Markt kommen und weitere Minderungen durch elektrisch betriebene Linienbusse erschlossen werden.



**Abbildung 80 Endenergieverbrauch des Busbestands im Jahr 2008 sowie im Referenzszenario und im „EffizienzszENARIO hoch“ im Jahr 2030 im Vergleich zu neu zugelassenen Bussen in 2050 (Annahme: die gesamte Verkehrsleistung wird mit neu zugelassenen Bussen erbracht) [eigene Berechnungen]**

#### 7.2.4 Treibhausgasemissionen

Um verschiedene Verkehrsmittel in Hinblick auf deren Treibhausgasemissionen beurteilen zu können, bietet sich die Kenngröße „g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Personenkilometer“ an. Die spezifischen Treibhausgasemissionen (berechnet als CO<sub>2</sub>-Äquivalente) pro Personen-km für die Jahre 2008 und 2050 für das Referenzszenario und das Szenario „Effizienz hoch“ sind in Abbildung 81 dargestellt. Es werden die spezifischen Treibhausgasemissionen von Linienbussen mit konventionellem Dieselmotor, Hybridbussen und Oberleitungsbussen gezeigt. Darüber hinaus wurden in einer orientierenden Betrachtung die spezifischen Treibhausgasemissionen von Elektrobussen und von mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellenbussen ermittelt. Darüber hinaus zeigt Abbildung 81 die Mehr- bzw. Minderemissionen gegenüber einem Pkw, wobei der Vergleich zwischen den durchschnittlichen Emissionen des Pkw-Bestandes und neu zugelassenen Linienbussen dargestellt ist. Entsprechend dem Vorgehen in Kapitel 7.2.3 basieren die spezifischen Treibhausgasemissionen der Pkw im Jahr 2050 auf den Prognosewerten von Protrans [Protrans 2012] hinsichtlich des Fahrzeugbestands, der durchschnittlichen Fahrleistung und dem Energieverbrauch nach Antriebstechnologie.

Schlussbericht

Neben den Verbesserungen der Energieeffizienz fließen in die spezifischen Treibhausgasemissionen auch die Veränderungen bei den Energieträgern mit ein. Die eingesetzten Energieträger (Kraftstoffe und Strom) verursachen im Zeitverlauf weniger Treibhausgasemissionen durch die steigende Beimischung von Biokraftstoffen und den Ausbau der erneuerbaren Energien beim Strom (siehe Kapitel 7.2.1).

Im Referenzszenario liegen die spezifischen Treibhausgasemissionen der Dieselbusse im Jahr 2050 mit rund 59 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Pkm etwa 18 % über denen der Pkw. Neu zugelassene Hybridbusse und Oberleitungsbusse besitzen dagegen auch im Jahr 2050 noch etwa 13 % bzw. 55 % niedrigere Emissionen als die Bestands-Pkw (44 g bzw. 22 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Pkm).

Auch bei der steigenden Energieeffizienz im „Effizienzscenario hoch“ schneiden die Dieselbusse schlechter ab als die Pkw. Ihre Emissionen liegen mit 54 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Pkm 9 % über denen der Pkw. Im „Effizienzscenario hoch“ werden neben den Hybridbussen, für die keine Effizienzsteigerung gegenüber dem Referenzszenario unterstellt wurde, und den Oberleitungsbussen, welche in diesem Szenario mit 22 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Pkm rund 60 % unter den Pkw liegen, in einer orientierenden Betrachtung auch Elektrobusse und mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellenbusse einbezogen.

Bei den Elektrobussen wurde, ausgehend vom spezifischen Energieverbrauch pro Platz-km der Oberleitungsbusse unter Berücksichtigung der Ladeverluste, der Gesamtenergieverbrauch errechnet und mit den Emissionsfaktoren für den Strom verknüpft. Der Wirkungsgrad für die Ladevorgänge wurde mit 90 % angesetzt [Öko-Institut 2011]. Ihre spezifischen Treibhausgasemissionen pro Pkm liegen nach dieser orientierenden Abschätzung mit 28 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Pkm etwa 43 % unter denen der Pkw.

Bei den Brennstoffzellenbussen wurde vereinfachend unterstellt, dass der Wasserstoff zu 100 % per Elektrolyse erzeugt wird und dass pro kWh Wasserstoff 1,5 kWh elektrische Energie benötigt wird. Saxe et al. [2007] beziffern den Wirkungsgrad der Brennstoffzellensysteme von fünf Fahrzeugen (ermittelt aus dem Projekt „Clean Urban Transportation for Europe (CUTE)“) in verschiedenen Fahrzyklen auf rund 40 %. Für den nachfolgenden Vergleich wurde angenommen, dass sich dieser Wirkungsgrad bis 2050 auf 70 % erhöht. Anhand dieser Wirkungsgrade wurde der Strombedarf für die Elektrolyse abgeschätzt, Verluste durch Verflüssigung oder Komprimierung, Transport und Lagerung wurden in der vereinfachten Abschätzung nicht berücksichtigt. Mit diesen Annahmen verursacht der Brennstoffzellenbus mit 55 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Pkm rund 10 % mehr Emissionen als die Pkw.

Für das „Effizienzscenario hoch“ ist zudem dargestellt, welchen Effekt es hätte, wenn verstärkt Strom aus erneuerbaren Energien für den Linienbusbetrieb zum Einsatz kommt (Effizienzscenarien ergänzt um das Kürzel EE, orangefarbene Säulen). Abweichend von Kapitel 6.4.2 wird für das Jahr 2050 zusätzlich betrachtet, wie sich der Vergleich mit den Pkw darstellt, wenn sowohl für die Elektro-Pkw im Fahrzeugbestand als auch die elektrisch betriebenen Busse zu 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen verwendet wird (Effizienzscenario ergänzt um 100 % EE). Hintergrund ist das aktuelle Engagement einzelner

Schlussbericht

Pkw-Hersteller, die Stromerzeugung für die Fahrzeuge aus zusätzlichen erneuerbaren Energien sicherzustellen.

Es zeigt sich, dass elektrisch betriebene Linienbusse und Brennstoffzellenbusse bei verstärkter Verwendung von Strom aus erneuerbaren Quellen im „Effizienzzenario hoch + EE“ im Jahr 2050 deutlich unter denen der Pkw liegen. Die Oberleitungsbusse verursachen in diesem Fall lediglich 8 g, die Elektrobusse 12 g und die Brennstoffzellenbusse 23 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Pkm. Die Emissionen liegen demnach um 83 %, 76 % bzw. 55 % unter denen des Pkw-Bestandes.

Wird im „Effizienzzenario hoch + 100 % EE“ sowohl bei den Pkw als auch bei den Linienbussen 100 % regenerativ erzeugter Strom eingesetzt, erhöht sich diese Minderung im Vergleich zum Pkw auf 90 % (Oberleitungsbusse), 85 % (Elektrobusse) und 71 % (Wasserstoffbusse). Die spezifischen Treibhausgasemissionen würden dann mit 5 g, 7 g, und 13 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Pkm deutlich unter die 44 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Pkm beim Pkw-Bestand sinken.

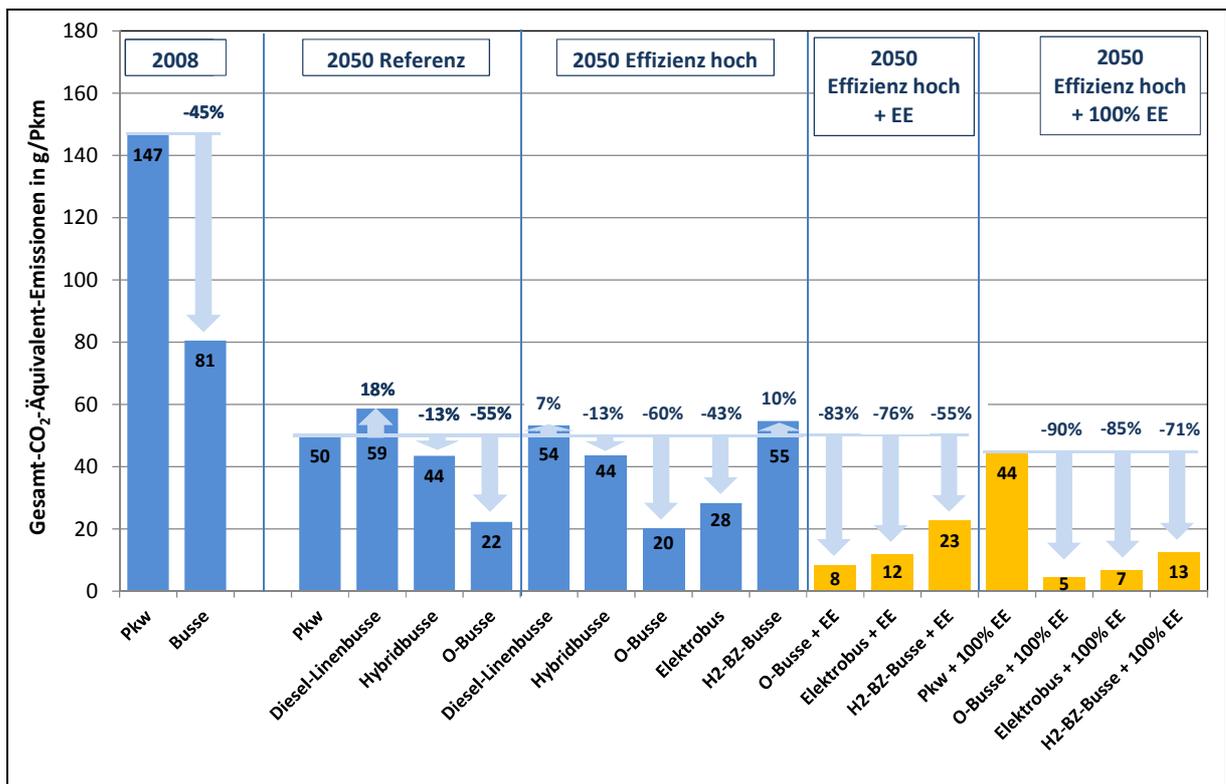


Abbildung 81 Spezifische Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Pkm von neu zugelassenen Bussen im Vergleich zum Bestands-Pkw 2050 im Referenzszenario und „Effizienzzenario hoch + EE“

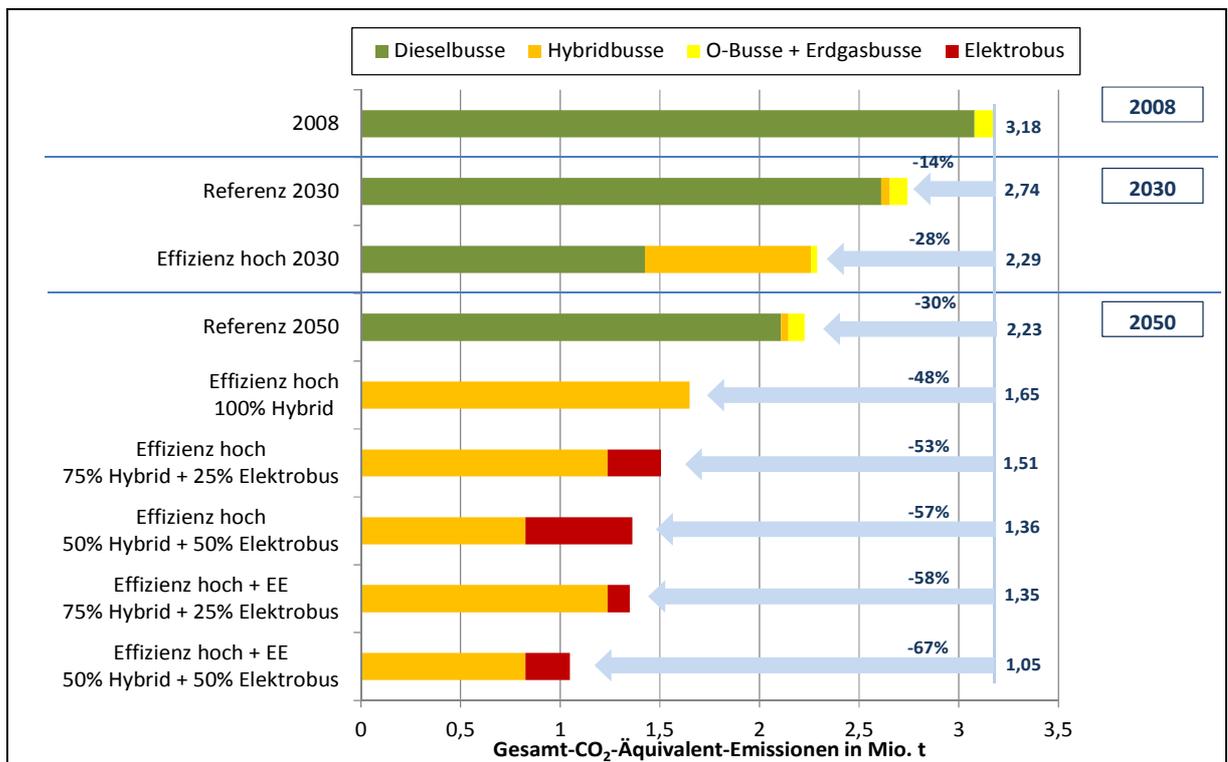
Schlussbericht

Für eine orientierende Abschätzung der gesamten Treibhausgasemissionen der Linienbusse im Jahr 2050 wurde ein dem Gesamtenergieverbrauch entsprechendes Vorgehen gewählt (siehe Kapitel 7.2.3): Für das Referenzszenario und das „Effizienzscenario hoch“ wurden die spezifischen Treibhausgasemissionen der neu zugelassenen Busse mit der Verkehrsleistung der Linienbusse multipliziert. Damit werden die Emissionen unterschätzt, da die durchschnittlichen spezifischen Emissionen des Busbestandes über denen der Neuzulassungen liegen. Entsprechend dem Kapitel 7.2.3 wurden wiederum drei Varianten für das „Effizienzscenario hoch“ mit unterschiedlich hohem Anteil von Elektrobussen betrachtet. Da der Einfluss der Strombereitstellung eine große Wirkung auf die Treibhausgasemissionen besitzt, wird zusätzlich analysiert, wie sich der verstärkte Bezug von regenerativ erzeugtem Strom durch die Verkehrsunternehmen im Verbund mit den Stadtwerken auswirkt (durch das Kürzel EE gekennzeichnet).

Abbildung 82 zeigt, dass die Reduktion der Treibhausgasemissionen bezogen auf 2008 durch den höheren Anteil von Biodiesel bei zusätzlich höherer Minderung gegenüber fossilem Diesel höher ausfällt als die Reduktion des Endenergieverbrauchs.

So liegen die Treibhausgasemissionen der Linienbusse im Referenzszenario, bei dem nach 2050 keine Veränderungen hinsichtlich der Anteile der Antriebstechnologie unterstellt wurden, mit rund 2,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten 30 % unter denen in 2008, wobei ein Teil der Emissionsminderung auch in der im Vergleich zu 2008 um 4 % niedrigeren Verkehrsleistung begründet liegt. Die Emissionen in den drei Varianten im „Effizienzscenario hoch“ liegen bei rund 1,65 Mio. t (100% Hybridbusse), 1,51 Mio. t (75 % Hybridbusse und 25 % Elektrobusse) und 1,36 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente (50 % Hybridbusse und 50 % Elektrobusse). Dies entspricht einer Minderung von 48 %, 53 % und 57 % gegenüber 2008.

In den Varianten, in denen die Verkehrsunternehmen verstärkt Strom aus regenerativen Quellen beziehen, steigt die Minderung der Treibhausgasemissionen in den Varianten mit Elektrobussen weiter an. Mit 1,35 Mio. t (75 % Hybridbusse und 25 % Elektrobusse) bzw. 1,05 Mio. t Treibhausgasen (50 % Hybridbusse und 50 % Elektrobusse) liegen die Emissionen um 58 % bzw. 65 % unter denen aus dem Jahr 2008.



**Abbildung 82 Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen des Busbestands im Jahr 2008 sowie im Referenzszenario und im „EffizienzszENARIO hoch“ im Jahr 2030 im Vergleich zu neu zugelassenen Bussen in 2050 (Annahme: die gesamte Verkehrsleistung wird mit neu zugelassenen Bussen erbracht) [eigene Berechnungen]**

Es zeigt sich, dass allein durch den vollständigen Einsatz von Hybridbussen in 2050 bereits große Emissionsminderungen erzielt werden können. Diese Minderung lässt sich durch den Einsatz von Elektrobusen erhöhen, wobei dies insbesondere in Kombination mit verstärktem Einsatz von erneuerbaren Energien zu hohen Minderungspotentialen führt.

## **7.3 Elektrisch betriebener ÖPNV**

Für den elektrisch betriebenen ÖPNV sind für den Zeitraum nach 2030 keine Technologiewechsel absehbar, die eine starke Modifikation der bisher verwendeten Modelle zur Prognose des Energiebedarfs notwendig machen würden. Demnach wird unter Berücksichtigung der oben genannten Rahmenbedingung der Bedarf an Neufahrzeugen und damit die zukünftige Fahrzeugflottenstruktur berechnet. Auch die Systematik zur Szenarioentwicklung wird beibehalten.

### **7.3.1 Erneuerbare Energien**

Wie in Kapitel 7.2.1 beschrieben, profitiert der ÖPNV bis 2050 indirekt von den starken Minderungen der Treibhausgasemissionen im deutschen Kraftwerkspark. Dadurch gewinnt auch der elektrisch betriebene ÖPNV von der Ausrichtung der deutschen Stromproduktion auf erneuerbare Energieträger. In Kapitel 7.2.1 werden für den Strombezug durch die Verkehrsunternehmen im Jahr 2050 drei Fälle näher beschrieben, die sich im Anteil von Strom aus erneuerbaren Quellen unterscheiden.

### **7.3.2 Energieeffizienz**

Wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben, wird im Szenario „Effizienz hoch“ nicht das technisch erreichbare Maximum betrachtet, sondern die Auswirkung einer Auswahl von Techniken unter wirtschaftlichen Aspekten. Das Referenzszenario beschreibt nach wie vor die Entwicklung des Energieverbrauchs ohne die verstärkte Nutzung effizienter Techniken.

Der Anteil der stationären Verbraucher am Effizienzgewinn nach dem Jahr 2030 steigt im Verhältnis zum Anteil der Verbraucher im Fahrzeug etwas stärker an. Bei den Stadt-/Straßenbahnen führt dann der annähernd flächendeckende Einsatz von u. a. energieeffizienten Weichenheizungen, Energiemanagement für Fahrzeuge in der Abstellung und Verbesserung der Rückspeisefähigkeit im „Energieeffizienzscenario hoch“ zu einem ähnlich hohen Effizienzgewinn wie im Bereich der U-Bahnen. Fahrzeugseitig führt der Einsatz effizienter Heizungs- und Klimatisierungstechnik zu steigenden Effizienzgewinnen. Auch die Optimierung der Fahr- bzw. Umlaufpläne nach Stabilität und Energieeffizienz tragen zu großen Teilen zu steigender Energieeffizienz bei.

Die größten Effizienzgewinne bei den U-Bahnen zwischen 2030 und 2050 werden durch die optimierte Rückspeisung erzielt. Der zweitgrößte Anteil entfällt auf die Optimierung der Gebäudetechnik der unterirdischen Haltestellen, bzw. der Nutzung von Abwärme und energieeffizienter Beleuchtung und Belüftung. Außerdem kann bei geschlossenen U-Bahnnetzen durch die Abwesenheit von Schnittstellen zum Straßenverkehr ein noch größeres Potential zur Energieeffizienzsteigerung im Betrieb erreicht werden als bei Stadt-/Straßenbahnen.

Die ermittelten Minderungen im Flottenverbrauch sind in der Tabelle 32 dargestellt.

Fahrzeugkonzept	Bestand 2040	Bestand 2050
	%	%
<b>Minderung gegenüber 2010 im Referenzszenario</b>		
Straßen- und Stadtbahnen	-12,4%	-20,0%
U-Bahnen	-11,3%	-20,7%
<b>Minderung gegenüber 2010 im Effizienzscenario</b>		
Straßen- und Stadtbahnen	-27,6%	-43,3%
U-Bahnen	-46,7%	-61,3%
<b>Quellen:</b> [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]; eigene Berechnungen.		

**Tabelle 32 Stromeinsparungen der gesamten Flotte an Straßen-, Stadt- und U-Bahnen in Deutschland in den Jahren 2040 und 2050 im Referenzszenario und „Effizienzscenario hoch“ im Vergleich zu 2010**

### 7.3.3 Energieverbrauch

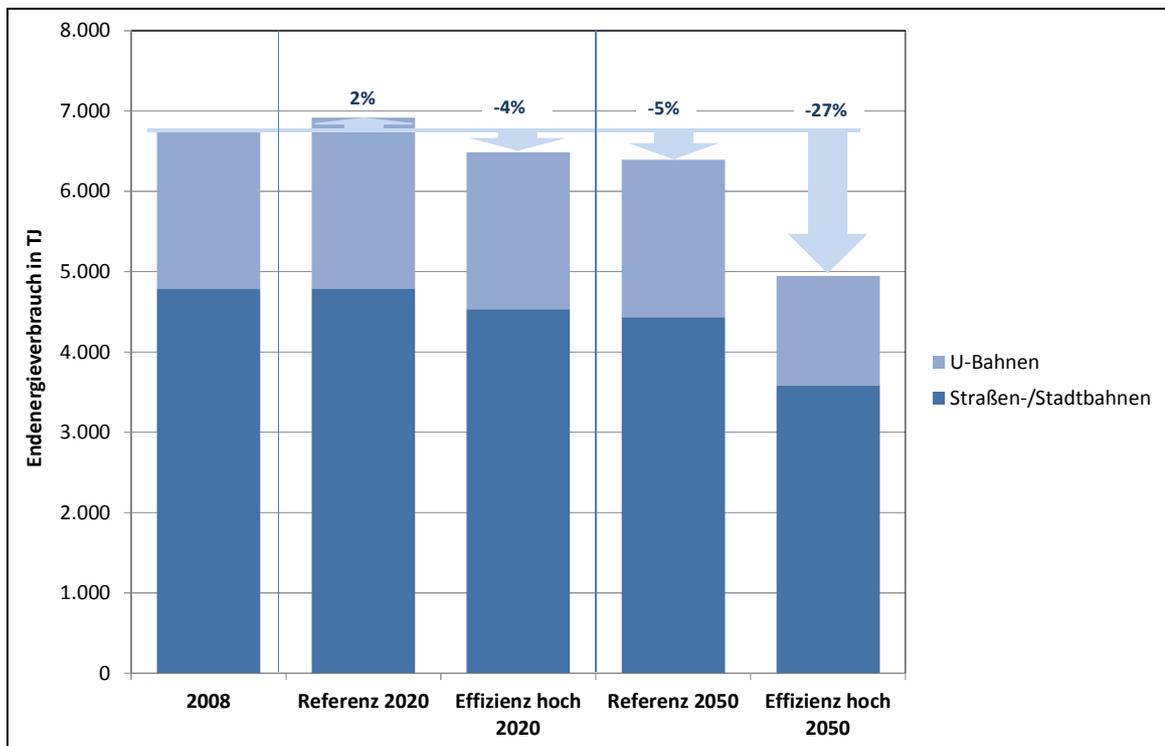
Mit den in den Kapiteln 4.1.2 bzw. 7.3.2 dargestellten Maßnahmen sinkt der Stromverbrauch des ÖPNV in Deutschland bis zum Jahr 2050. Im Referenzszenario steigt der absolute Stromverbrauch bis zum Jahr 2020 noch leicht an, kann dann aber durch die größeren Effizienzgewinne aus Infrastruktur und Neufahrzeugen bis zum Jahr 2050 um 5 % bezogen auf das Jahr 2008 gesenkt werden. Mit den Maßnahmen, die im „Effizienzscenario hoch“ kombiniert sind, ist eine Senkung des Stromverbrauchs bezogen auf das Jahr 2008 um 4 % im Jahr 2020 bzw. 27 % im Jahr 2050 möglich (siehe Tabelle 33 und Abbildung 83).

Größe	Einheit	2008	2020		2050	
		Basisjahr	Referenzszenario	Effizienzscenario hoch	Referenzszenario	Effizienzscenario hoch
Straßen-/Stadtbahnen	TJ	4782	4792	4533	4435	3579
U-Bahnen	TJ	1978	2128	1953	1958	1367
Minderung gesamt SSU gegenüber 2008	%	-	2 %	-4%	-5%	-27%

**Tabelle 33 Stromverbrauch der gesamten Flotte an Straßen-, Stadt- und U-Bahnen in Deutschland in den Jahren 2020 und 2050 im Referenzszenario und „Effizienzscenario hoch“ im Vergleich zu 2008**

Abbildung 83 zeigt die Ergebnisse aus der Tabelle 33 in Säulenform dargestellt. Hier zeigt sich deutlich wie sich die Anteile am Endenergieverbrauch zwischen Straßen-/Stadtbahnen und U-Bahnen verändern. Im Referenzszenario fällt der Effizienzgewinn bei Stadt-/Straßenbahnen und damit die Senkung des Energiebedarfs eher gering aus, was einem steigenden Anteil am Endenergieverbrauch des gesamten elektrisch betriebenen ÖPNV entspricht.

Der schwächere Effizienzgewinn bis zum Jahr 2020 auf Seiten der Straßen-/Stadtbahnen lässt sich durch die turnusmäßige Modernisierung der Infrastruktur und Haltestellen gut erklären. Die Erneuerung vieler unterirdischer Haltestellen findet zwischen 2010 und 2020 statt. Der Effizienzgewinn beruht dann auf dem Wechsel der bis dahin ca. 40 Jahre alten Gebäudetechnik auf aktuelle und sparsamere Technik. Auf Seiten der Fahrzeuge wird es durch den Einsatz von weiterer Elektronik wie z. B. zusätzliche Displays zur Fahrgastinformation und Kommunikationstechnik neben Effizienzgewinnen auch weitere Verbraucher geben. Dieser Mehrverbrauch wird erst bis zum Jahr 2050 wieder sinken.



**Abbildung 83 Endenergieverbrauch des elektrisch betriebenen ÖPNV in TJ**

Der Verlauf des Energieverbrauchs pro Platzkilometer ist im Bereich des elektrisch betriebenen ÖPNV als linear beschreibbar. Das geht am deutlichsten aus den prognostizierten Energieverbräuchen pro Platzkilometer der Referenzszenarien hervor. Im Falle der Darstellung der Energieverbrauchsverläufe im „Effizienzscenario hoch“ zeigt sich für den Zeitraum nach 2030 ein etwas schwächer sinkender Energieverbrauch pro Platzkilometer als im Zeitraum zwischen 2010 und 2030. Im gleichen Zeitfenster ist der Energieverbrauch pro Platzkilometer im Pkw-Bereich nicht linear geprägt. So gibt es zwei Gradientenwechsel im

Kurvenverlauf bis 2030. Der erste leitet eine Phase stark steigender Energieeffizienz zwischen 2016 und 2023 ein. Der zweite Gradientenwechsel führt wieder in eine Phase mit schwächer sinkendem Energieverbrauch pro Platzkilometer. Danach schließt sich eine Phase linear geprägtem Verlauf zwischen 2030 und 2050 an. Wie in Kapitel 7.2.3 beschrieben, liegt der deutlich größer ausfallende Effizienzgewinn des Pkw im Vergleich zum ÖPNV an der Annahme, dass zunehmend energieeffiziente Elektromobile den herkömmlichen Pkw ersetzen.

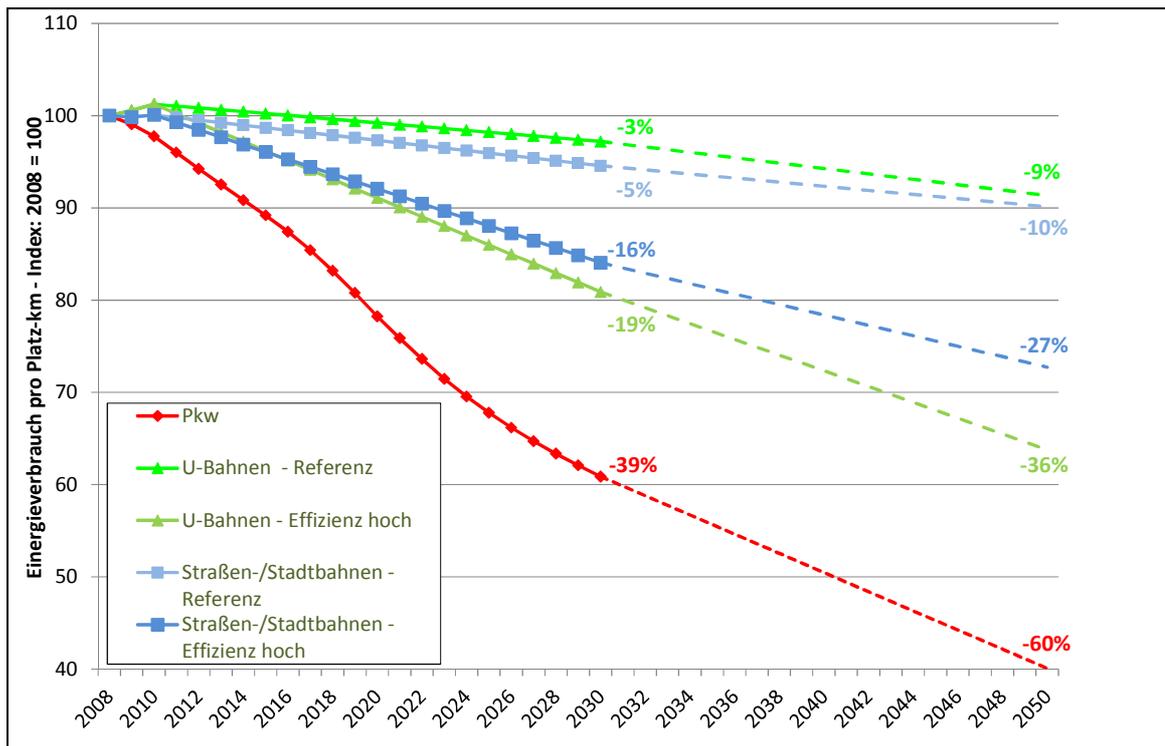
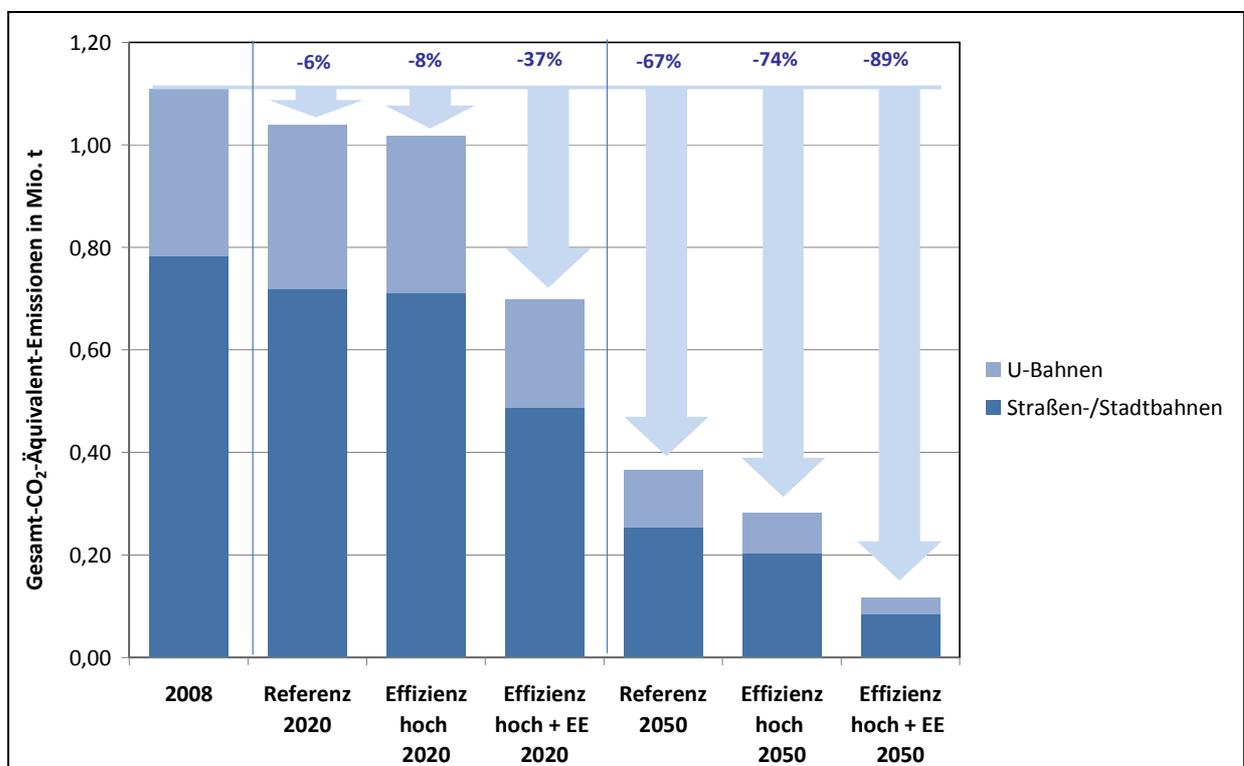


Abbildung 84 Energieverbrauch pro Platzkilometer im elektrisch betriebenen ÖPNV im Vergleich zum Pkw

### 7.3.4 Treibhausgasemissionen

In Abbildung 85 sind die gesamt CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen von Straßen-/Stadtbahnen und U-Bahnen normiert auf das Jahr 2008 dargestellt. Ausgehend von dieser Darstellung ließe sich bis zum Jahr 2020 bzw. 2050 der Ausstoß von Treibhausgasen um 37 % bzw. um 89 % bezogen auf das Jahr 2008 senken, würde man die Effizienz dieser Verkehrsträger erhöhen und gleichzeitig den Einsatz von Strom aus regenerativen Quellen verstärken. Im Referenzszenario ist von einem Rückgang der Treibhausgasemissionen bis 2020 bzw. bis 2050 um 6 % bzw. um 67 % auszugehen. Im Szenario „Effizienz hoch“ ohne den Einsatz zusätzlichem erneuerbaren Stroms liegen die Senkungen der Treibhausgasemissionen bezogen auf das Jahr 2008 im Jahr 2020 bzw. 2050 bei 8 % bzw. 74 %.



**Abbildung 85 Gesamt CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen des elektrisch betriebenen ÖPNV im Referenz-, Effizienzscenario und im „Effizienzscenario hoch + EE“**

Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen in g pro Personenkilometer für den elektrisch betriebenen ÖPNV im Vergleich zum Pkw sind in der Abbildung 86 dargestellt. Im Basisjahr 2008 liegen die Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer für Straßen-/Stadtbahnen bzw. U-Bahnen 51 % bzw. 58 % unter denen der Pkw. Dieser Abstand wächst im Referenzszenario bis zum Jahr 2050 von 51 % auf 59 % bei den Straßen-/Stadtbahnen bzw. von 58 % auf 64 % bei den U-Bahnen. Noch größer fallen die Unterschiede im Szenario „Effizienz hoch“ mit 67 % bzw. 75 % geringeren Treibhausgasemissionen bei Straßen-/Stadtbahnen bzw. U-Bahnen im Vergleich zu den Emissionen durch Pkw im selben Jahr. Durch den ausschließlichen Einsatz von Strom aus regenerativen Quellen liegen die

Treibhausgasemissionen der Straßen-/Stadtbahnen und U-Bahnen 86 % bzw. 90 % unterhalb der Pkw bedingten Emissionen.

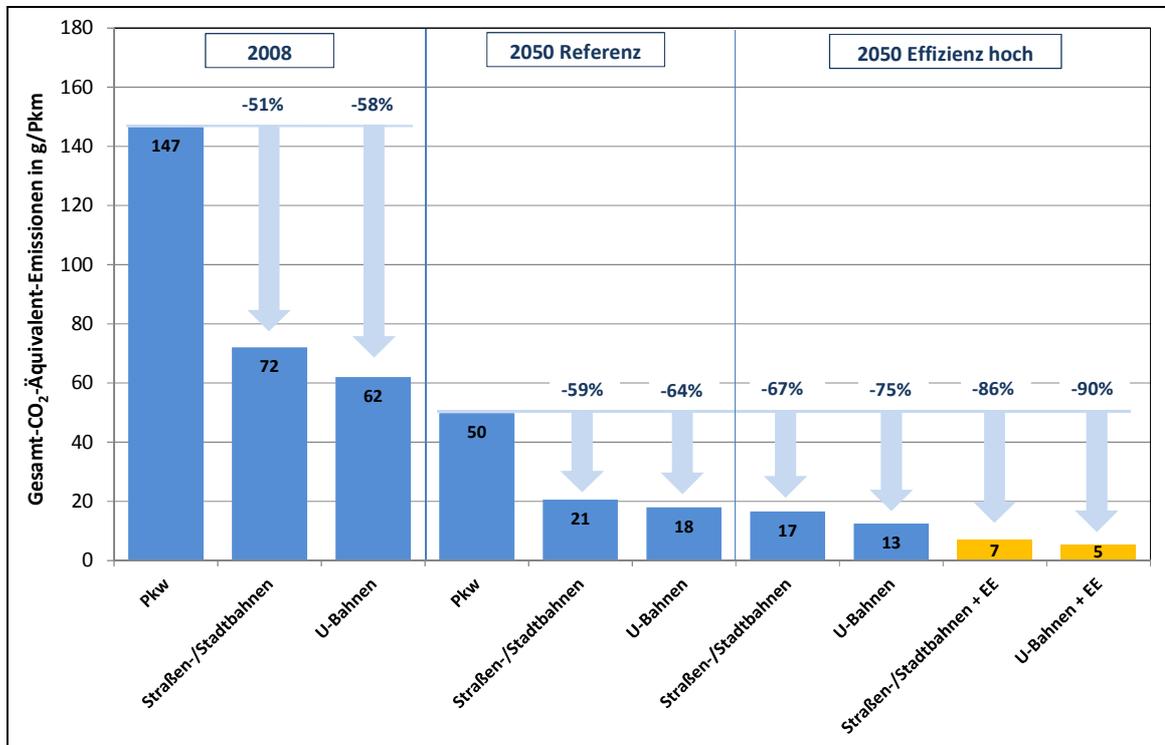


Abbildung 86 Spezifische Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer (einschließlich Herstellung des Fahrstroms und der Kraftstoffe) für den ÖPNV und den Pkw-Verkehr 2050 im Referenzszenario, im „Effizienzzenario hoch + erneuerbare Energien“ [eigene Berechnung]

## 7.4 Zusammenfassung

Die Abschätzung der Entwicklung des ÖPNV über den bisher betrachteten Zeitraum bis 2030 hinaus mit einem Zeithorizont bis zum Jahr 2050 erfordert:

- Annahmen zu den eingesetzten Technologien und Energieträgern
- Abschätzungen zum Umfang der Umsetzung dieser Technologien
- Prognosen zur Entwicklung der erbrachten Verkehrsleistung

Eine wesentliche Schlüsseltechnologie im betrachteten Zeitraum ist nach langläufiger Ansicht die Elektromobilität bei Kraftfahrzeugen. Obwohl sie, in Abgrenzung zu anderen laufenden Projekten des BMVBS, ausdrücklich nicht Gegenstand dieses Vorhabens war, wird sie hier zumindest in Form einer groben Abschätzung der Technologien und der Einsatztiefe berücksichtigt, um ein vollständiges Bild zu erhalten.

Mit der Berücksichtigung der Elektromobilität ergibt sich auch für den ÖPNV mit Bussen ein Effekt, der für den ÖPNV mit Straßen-, Stadt- und U-Bahnen bereits von Anfang an wirkte, nämlich dass die CO<sub>2</sub>- und Treibhausgas-Bilanz des Verkehrs wesentlich vom Strommix, konkret vom Anteil des aus erneuerbaren Energien gewonnenen Stromes, abhängt.

Bei der Vorstellung der **Rahmenbedingungen** wird eingeschätzt, dass verfügbare Biokraftstoffe mangels geeigneter Alternativen im Wesentlichen im Güterkraftverkehr eingesetzt werden, sodass für den ÖPNV die Elektromobilität oder der Einsatz von Brennstoffzellen-Bussen mit Wasserstoff als Energieträger die sinnvollen Optionen sind.

Kernfrage der Elektromobilität ist die Frage der Verfügbarkeit hinreichend leistungsfähiger Speicher, sowohl für Hybrid-Fahrzeuge als auch für reine Elektrobusse. Hier wird der ÖPNV als Nischenmarkt mit zeitlicher Verzögerung von den Entwicklungen beim Pkw partizipieren.

Wasserstoff, mit Strom aus Windkraftwerken erzeugt, kann als Energie-Zwischenspeicher dienen und damit ein lokal sinnvoller Energieträger in Regionen mit einem hohen Angebot an Windenergie sein. Hier bietet sich möglicherweise der Einsatz von Brennstoffzellen-Bussen an, unter der Voraussetzung, dass sich die eingesetzte Technologie auf anderen Gebieten des Verkehrs durchsetzt, sodass der Nischenmarkt der ÖPNV-Busse mit bedient werden kann.

Hinsichtlich der vom ÖPNV erbrachten Verkehrsleistung stehen über das Jahr 2030 hinaus nur Summendaten für die Entwicklung des gesamten ÖPNV zur Verfügung. Hier wird der differenzierte Aufteilungsschlüssel der Betrachtungen für den Zeitraum bis 2030 fortgeschrieben. Während für den ÖPNV mit Bussen eine Einbuße von knapp 5 % erwartet wird, wird bei den Straßen-, Stadt- und U-Bahnen eine Zunahme von mehr als 15 % erwartet.

Schlussbericht

Bei den **erneuerbaren Energien** wird eine nur noch beschränkte Nutzung von Biokraftstoffen für den ÖPNV angenommen. In diesem Bereich wird eine Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Minderungsquote bei Biokraftstoffen und eine Verbesserung durch eine erhöhte Beimischung dieser Kraftstoffe beim konventionellen Dieselmotorkraftstoff erwartet. Die Treibhausgasbilanz der konventionellen Kraftstoffe unter Einbezug der vorgelagerten Emissionen durch die Förderung von Rohöl und aufwändigere Herstellungsprozesse (Well-to-Tank) wird sich zudem zukünftig verschlechtern.

Wesentlich bedeutender für die Rolle erneuerbarer Energien bei Bussen erscheint dagegen die Frage, wie sich der Strommix entwickeln wird. Hier profitiert der ÖPNV von der Ausrichtung der deutschen Stromproduktion auf erneuerbare Energien. Im Rahmen dieser Studie wurden drei Fälle betrachtet:

1. *Mitnahmeeffekte* an der allgemeinen Verbesserung:  
206 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro kWh (52 % Minderung gegenüber 2030)
2. *aktive Ausrichtung* auf Strom aus erneuerbaren Energien:  
86 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro kWh
3. *Einsatz von 100 % erneuerbarer Energien* zur Stromerzeugung (entsprechend dem Konzept der Automobil-Hersteller für Pkw):  
48 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro kWh

Hinsichtlich der **Energieeffizienz** bei Bussen wird angenommen, dass sich die theoretisch verfügbaren Potentiale konventioneller Antriebe nicht weiter erhöhen, aber diese stärker ausgeschöpft werden. Ein zusätzlicher Effizienzgewinn bei konventionellen Bussen wird aus dem Einsatz elektrisch betriebener Nebenaggregate als „Abfallprodukt“ der Entwicklungen bei der Elektromobilität erwartet.

Für Hybridbusse wird eine leichte Erhöhung der Effizienz aufgrund der Weiterentwicklung der Technologie erwartet.

Elektrisch betriebene Busse werden, wie beschrieben, hinsichtlich der Effizienz nicht näher betrachtet sondern nur für ein vollständiges Bild mit einbezogen. Es werden die zur Verfügung stehenden Energieverbrauchsdaten für O-Busse abzüglich 10 % für Technologiefortschritte angesetzt.

Außerdem wird angenommen, dass die ganze Flotte aus neu zugelassenen Fahrzeugen besteht, weil eine Prognose zur Entwicklung der Anteile der einzelnen Antriebskonzepte in einer Bestandsflotte nach 2030 nicht verfügbar ist und die Entwicklung entsprechender Marktdurchdringungsszenarien nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens war. Für den Pkw dagegen gibt es derartige Angaben.

Beim elektrisch betriebenen ÖPNV verlagert sich der Schwerpunkt der Energieeffizienzgewinne zur Infrastruktur und in den Fahrzeugen zu den Nebenaggregaten. Dadurch sinkt der Stromverbrauch der Bahn-Systeme gegenüber 2008 um insgesamt 27 %. Besonders stark wirkt sich hier die Modernisierung der Infrastruktur aus. Hier sind insbesondere die

unterirdischen Haltestellen, vorwiegend in U-Bahnsystemen, mit erheblichem Optimierungspotential zu nennen.

Ein differenziertes Modell zum **Energieverbrauch** (TREMODO) existiert nur bis zum Jahr 2030, herangezogen werden daher Angaben von Protrans/Prognos für 2050. Für die Zwischenjahre erfolgt eine lineare Interpolation zwischen 2030 und 2050. Beim Vergleich einer Flotte neu zugelassener Busse mit dem prognostizierten PKW-Bestand im Jahr 2050 zeigt sich zwar ein deutlicher Effekt durch die Effizienzmaßnahmen, der Verbrauch sinkt um 35 % bezogen auf den Platzkilometer gegenüber 2008. Auch Straßen-/Stadtbahnen mit 10 % und besonders die U-Bahnen mit 36 % Abnahme weisen signifikante Energieeinsparungen auf. Beim Pkw liegt die Reduktion jedoch bei 60 % für den Bestand. Neben deutlichen Effizienzsteigerungen bei den Pkw mit konventionellen Antrieben liegt dies auch daran, dass dann bereits rund 23 % der Fahrleistung von besonders sparsamen Elektro-Pkw und Plug-in-Hybrid-Pkw erbracht werden.

Für eine orientierende Aussage zum absoluten Energieverbrauch werden bei den Bussen mangels zur Verfügung stehender Prognosen zum Antriebsmix drei Fälle angenommen und betrachtet (in Klammern angegeben ist jeweils die prozentuale Reduktion des Endenergieverbrauches gegenüber 2008):

- 100 % Hybridbusse (41 %)
- 75 % Hybridbusse / 25 % Elektrobusse (45 %)
- 50 % Hybridbusse / 50 % Elektrobusse (49 %)

Absolute Zahlen zur Reduktion sind in Abbildung 80 aufgelistet. Die Ergebnisse zeigen, dass es für einen hohen Rückgang des Endenergieverbrauches über 2030 hinaus notwendig ist, dass durch geeignete Maßnahmen Hybridbusse verstärkt in den Markt kommen und weitere Minderungen durch elektrisch betriebene Linienbusse erschlossen werden können.

Für die Reduktion der **Treibhausgasemissionen** ist neben Effizienzsteigerungen wesentlich der zugrunde gelegte Strommix („Teilnahme an der allgemeinen Verbesserung“, „aktive Ausrichtung auf Strom aus erneuerbaren Energien“ oder „100 % Nutzung erneuerbarer Energien“) maßgebend. Dies wirkt sich vor allem bei den Bussen aus, die gegenüber dem Pkw erst mit dem Einsteig in die Elektromobilität signifikante Verbesserungen erreichen.

Bei den Bahnen, noch verstärkt durch die Steigerung der Verkehrsleistung, führen die Effizienzgewinne auch ohne einen forcierten Einsatz erneuerbarer Energien zu signifikanten Reduktion der Emissionen um 67 % bei den Straßen-/Stadtbahnen und um 75 % bei den U-Bahnen gegenüber dem Pkw bezogen auf den Personenkilometer. Hier werden die Vorteile eines ausgereiften Systems der Elektromobilität sichtbar.

Werden unter den genannten Randbedingungen die Verbrauchswerte und Emissionen der Jahre 2008 und 2050 miteinander verglichen, ergeben sich in absoluten Zahlen folgende Minderungswerte für den ÖPNV mit Straßen-/Stadt- und U-Bahnen sowie mit Bussen:

	<b>2050 geg. 2008</b>
<b>Reduktion Endenergieverbrauch in PJ:</b>	
- Straßen-, Stadt- und U-Bahnen	<b>1,8</b>
- Busse	
- Busse: 100 % Hybrid	<b>16,2</b>
- Busse: 75 % Hybrid, 25 % Elektrobusse	<b>17,8</b>
- Busse: 50 % Hybrid, 50 % Elektrobusse	<b>19,4</b>
<b>Reduktion CO<sub>2</sub>-Emissionen in Mio. Tonnen:</b>	
- Straßen-, Stadt- und U-Bahnen	<b>1,0</b>
- Busse	
- Busse: 100 % Hybrid	<b>1,5</b>
- Busse: 75 % Hybrid, 25 % Elektrobusse	<b>1,8</b>
- Busse: 50 % Hybrid, 50 % Elektrobusse	<b>2,1</b>
<b>Quelle:</b> eigene Berechnungen	

**Tabelle 34 Jährliche Einsparpotentiale an Endenergieverbrauch und an CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen des öffentlichen Personennahverkehrs im „Effizienzscenario hoch + EE“ im Jahr 2050 gegenüber 2008**

Auch im Jahr 2050 können Straßen-/Stadt- und U-Bahnen als klassische Verkehrsmittel der Elektromobilität ihren Umweltvorteil ausspielen. Die Busse dagegen, sofern sie nicht im Rahmen der Elektromobilität denselben Energieträger nutzen wie die Bahnen, brauchen den, wenn schließlich technologisch ausgereift, effizienzsteigernden Hybridantrieb, der gleichzeitig als Brückentechnologie dient, um zumindest beim Klimavorteil gegenüber dem Pkw auch zukünftig punkten zu können.

Im Fokus der Elektromobilität bei den Pkw stehen als Schlüsseltechnologie leistungsfähige Speicher. Die Systeme des ÖPNV zeigen, dass der Nutzen des rein elektrischen Fahrens auch ohne das Risiko zu haben ist, auf eine Technologie zu setzen, für die bis heute noch keine alltagstauglichen Fahrzeuge, selbst im Prototypenstadium, angeboten werden.

## 8 Einflussmöglichkeiten von Politik, Aufgabenträgern und ÖPNV-Unternehmen

Im ersten Teil dieses Kapitels wird analysiert, welche Hemmnisse der Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung von Energieeffizienz und dem Ausbau erneuerbarer Energien entgegenstehen. Im zweiten Teil des Kapitels wird aufgezeigt, welche konkreten Handlungsmöglichkeiten es von Seiten der Politik, den Aufgabenträgern und den ÖPNV-Unternehmen gibt, die Hemmnisse abzubauen.

### 8.1 Umsetzungshemmnisse

Bei der Betrachtung der Hemmnisse bei der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen im ÖPNV muss unterschieden werden zwischen Energieeffizienzmaßnahmen und den Maßnahmen zum Einsatz erneuerbarer Energien.

#### **Energieeffizienz**

Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und damit zur Senkung des Energieverbrauchs sparen über kurz oder lang die Investitionskosten durch niedrigere Energiekosten ein. Trotzdem werden viele Maßnahmen in der Praxis nicht umgesetzt. Als wesentliche Gründe hierfür sind zu nennen:

- **Fehlende Informationen**

Viele Energieeffizienzmaßnahmen im ÖPNV werden nicht durchgeführt, weil das Wissen dazu fehlt. Bei diesen mangelnden Kenntnissen kann es sich beispielsweise um Wissen über die Wirksamkeit bestimmter Maßnahmen bei den Entscheidungsträgern handeln. Auch kommt es insbesondere im Bereich des Schienenverkehrs häufig vor, dass sich das unternehmerische Handeln an Maßnahmen orientiert, die zu dem entsprechenden Zeitpunkt eine Art Mode darstellen. Auch ist es aufgrund verschiedenster Gründe oftmals so, dass an entscheidenden Stellen in den Verkehrsunternehmen nicht bekannt ist, an welcher Stelle im Unternehmen die größten Energieverbraucher sitzen und durch welche Maßnahmen der Energieverbrauch überhaupt gesenkt werden könnte.

Im Rahmen der durchgeführten Interviews stellte sich auch heraus, dass es Informationsdefizite zu Techniken und Maßnahmen, deren Voraussetzungen und deren optimalem Einsatz gibt. Zum einen ist das der Tatsache geschuldet, dass mögliche Effizienzpotentiale seitens der Hersteller in möglichst großen Prozentzahlen angegeben werden, ohne darauf hinzuweisen, unter welchen Voraussetzungen diese erreicht wurden und worauf sich das Einsparpotential bezieht. Folglich ist es für Verkehrsunternehmen nicht immer direkt ersichtlich, wie groß die Ersparnis beim Fahrstromverbrauch oder Dieselverbrauch durch die Umsetzung einzelner Maßnahmen innerhalb ihres Netzes ist.

Neben dem Informationsdefizit existiert auch in einigen Verkehrsbetrieben noch ein lückenhaftes Erfassen der Stromverbräuche. Zum Teil gibt es keine klaren Trennungen beim Stromverbrauch für Fahrzeuge innerhalb der Abstellung und den Verbräuchen für

Werkstätten und Service. Außerdem werden zum Teil Fahrtreppen, Beleuchtungsanlagen von unterirdischen Stationen und die Fahrstromleitung vom selben Unterwerk versorgt, so dass bei der Abrechnung der einzelnen Verbraucher keine Trennung möglich ist. Das führt dann zu Problemen beim Energiecontrolling und damit zu Problemen beim Nachweis von erhöhten bzw. gesenkten Verbräuchen und der Rechtfertigung von Investitionen in den jeweiligen Bereichen.

- **Beschränkter finanzieller Handlungsspielraum**

Ein weiteres Problem einiger Verkehrsunternehmen resultiert aus der Tatsache, dass die Bestellerentgelte zum Teil mit Hilfe von Ausschreibungen gesenkt wurden. Dem stehen steigende Betriebskosten durch alternde Fahrzeuge und steigende Energiepreise entgegen. Dazu kommt, dass durch Verkehrsverbünde eine Anhebung des Fahrpreises nicht immer möglich ist. Daher ist es auch für viele Verkehrsunternehmen schwierig, finanzielle Mittel für weitere Innovationen frei zu machen. Daher konkurriert die Verwendung des etwas teureren „grünen Stroms“ mit der Investition in effizienzsteigernde Techniken.

- **Investitionskosten**

Die Investitionskosten zur Umsetzung von Effizienzmaßnahmen sind hoch und halten ÖPNV-Unternehmen davon ab, Maßnahmen umzusetzen. Insbesondere die Beschaffung energieeffizienter neuer Fahrzeuge aber auch die Energieoptimierung der Infrastruktur ist mit hohen Investitionskosten verbunden. Sind die Anfangsinvestitionen hoch und die jährlichen Einsparungen demgegenüber verhältnismäßig gering, ergibt sich erst sehr spät eine Amortisation der Anfangsinvestitionen. Handelt es sich um innovative, neue Technologien (z. B. Hybridbusse, Energiespeicher) kann der Investitionszeitpunkt nicht in der Nutzungs- bzw. Lebensdauer des Produktes liegen. Ohne zusätzliche Förderungen von staatlicher Seite werden sich diese innovativen Technologien am Markt nicht durchsetzen.

Neben den hohen Kosten kommt erschwerend hinzu, dass eine Finanzierung mittels Krediten den Kauf weiter verteuert bzw. aufgrund sehr hoher Zinsen einschränkt. Neben den steigenden Kosten bei der Finanzierung bzw. ungeeigneten Finanzierungsbedingungen bereitet das Auslaufen der Förderung durch das Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) Probleme. Auch das Auslaufen spezieller Förderprogramme (Modellregionen Elektromobilität, Förderung der Anschaffung von Hybridbussen im öffentlichen Nahverkehr), die im Rahmen des Konjunkturpaketes II initiiert werden, erschwert insbesondere die Einführung neuer Fahrzeugtechnologien wie Hybridfahrzeuge.

Hinzu kommen sehr lange Lebensdauern. Diese lange Lebensdauer erschwert den Einsatz neuer Techniken. Zwar sind Fahrzeugüberholungen üblich, aber dort werden nicht alle Komponenten und Bauteile ausgetauscht.

- **Technologieentwicklung**

Derzeit werden viele Effizienztechnologien im Bereich der Grundlagenforschung entwickelt, die sich aber bisher noch nicht in der Praxis bewährt haben (z. B. rückspeisefähige Unterwerke). Der Test dieser Technologien in der Praxis stellt für die ÖPNV-Unternehmen ein ökonomisches Risiko dar. Auch für die Fahrzeughersteller stellt es z. B. bei den Bussen einen sehr hohen Aufwand dar, innovative Effizienztechnologien und Konzepte von der Grundlagenforschung auf die Fahrzeugebene zu überführen und im Praxiseinsatz zu testen. Den geringen Stückzahlen der abgesetzten Busse im Vergleich zum Lkw-/Pkw-Bereich steht hoher Aufwand gegenüber, der oftmals nicht alleine getragen werden kann. Letztlich benötigen auch Technologien, bei denen die Praxistauglichkeit demonstriert worden ist, eine höhere Marktdurchdringung, um die Herstellungskosten durch Skaleneffekte zu reduzieren.

- **Konkurrierende Ziele und Vorgaben**

Weiterhin fehlen in verschiedensten Bereichen des ÖPNV konkrete Vorgaben. Diese Vorgaben können sich z. B. auf die Ausschreibungsverfahren beziehen und dort den Einbezug von ambitionierten Energieeffizienzkriterien und Bewertungsverfahren, die sich an den gesamten Lebenszykluskosten orientieren, verpflichtend vorschreiben. Ein Beispiel für bereits umgesetzte Vorgaben stellen die Anforderungen an die Schadstoffemissionen der Linienbusse in den vergangenen Jahrzehnten dar. So wurden die gesetzlichen Anforderungen an die Emissionen von Luftschadstoffen kontinuierlich erhöht, was zu einer deutlich verbesserten Abgasaufbereitungstechnik führte. Dementsprechend wurden bei den Fahrzeugkomponentenherstellern entsprechend hohe Kapazitäten in der Entwicklung gebunden. Bezüglich der Energieeffizienz hingegen gibt es derzeit keine (gesetzlichen) Vorgaben für die Busse, weshalb sie nicht im Fokus der Motoren- und Komponentenhersteller standen.

- **Fehlende Standards**

Gesetzliche Vorgaben an die Energieeffizienz würden auch einheitliche verbindliche Standards zur Erfassung vergleichbarer Energieverbrauchswerte voraussetzen, wie es sie im Pkw-Bereich mit dem NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) gibt. Diese müssten sich dem Vorgehen bei den SORT-Fahrzyklen entsprechend an den verschiedenen Einsatzmöglichkeiten der Busse mit unterschiedlichen Fahrprofilen orientieren.

- **Wünsche und Anforderungen der Kunden und Zahlungsbereitschaft**

Die Wünsche der Kunden im Rahmen der Beförderung lauten: Komfort und Behaglichkeit sind sehr wichtig. Dann folgen Pünktlichkeit und gute Anschlussrelationen. Die Umweltfreundlichkeit spielt bei der Wahl des Verkehrsmittels nicht die entscheidende Rolle. Viele Kunden nehmen Busse und Bahnen des ÖPNV noch automatisch als umweltschonend wahr. Daher ist der Wunsch der Kunden nach noch umweltfreundlicheren ÖPNV-Unternehmen in seiner Bedeutung geringer als die Bedeutung des Fahrpreises. Demnach stehen aus Kundensicht auf den ersten Blick effizienzsteigernde Maßnahmen der

Attraktivität des ÖPNV entgegen. Dabei ist aber stets zu berücksichtigen, dass die Energieeffizienz des Transportsystems gerade auch mit steigender Auslastung wächst.

### **Erneuerbare Energie**

Der zusätzliche Bezug von erneuerbaren Energien (Biokraftstoffe und Ökostrom) führt ohne steuerliche Vergünstigungen in der Regel zu Mehrkosten. In diesen Mehrkosten liegt das wesentliche Hemmnis begründet, welches einen größeren Einsatz von erneuerbaren Energien im ÖPNV entgegensteht (siehe Kapitel 4.2). Viele Verkehrsunternehmen stehen unter hohem Kostendruck durch die Aufgabenträger und Kommunen, so dass nicht die Möglichkeit besteht, jährlich anfallende zusätzliche Kosten für erneuerbare Energien zu tragen. Als ein weiteres Hemmnis wurde von ÖPNV-Unternehmen allerdings auch die Verfügbarkeit von geeigneten Kraftstoffen (insbesondere Biokraftstoffe der 2. Generation) für den Testeinsatz genannt [HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011]. Es kann ebenfalls davon ausgegangen werden, dass die kritische Diskussion zur Konkurrenz von „Teller und Tank“ in den letzten Jahren zudem einem vermehrten Einsatz von Biokraftstoffen der 1. Generation entgegenwirkt.

## **8.2 Konkrete Handlungsmöglichkeiten**

### **8.2.1 Politik**

Die Politik ist gefordert, einerseits die ÖPNV-Unternehmen dort finanziell zu unterstützen, wo aus Klimaschutzgründen sinnvolle Technologien sich nicht am Markt durchsetzen bzw. noch in der Entwicklungsphase sind, so dass das Risiko der beteiligten Unternehmen sehr groß ist. Zum andern kann die Politik durch klare, auch ordnungspolitische Vorgaben die Rahmenbedingungen definieren, innerhalb derer der ÖPNV sich in Richtung mehr Klimaschutz entwickeln kann. Konkret wären von Seiten der Politik folgende Aktivitäten wünschenswert:

- **Initiierung von Forschungs- und Demonstrationsprojekten**

Um die Einführung innovativer und Energieeffizienz steigernder Maßnahmen und Techniken zu verbessern und zu ermöglichen, werden Fördermaßnahmen und Anschubfinanzierungen benötigt. Mit Hilfe der Anwendungsförderung können auch Synergieeffekte entstehen bzw. genutzt werden. Ein Beispiel wäre der Einsatz von rückspeisefähigen Unterwerken als Teil eines „Smart Grids“ zur Energieversorgung.

Anschubfinanzierungen dienen der Einführung wünschenswerter Techniken, die dann durch steigende Verkaufszahlen pro verkaufte Einheit günstiger werden können und so schneller zum Einsatz kommen. Ein Beispiel wäre der Einsatz von Energiespeichern an Knotenstellen im Netz, so dass bei der Einführung des integralen Taktfahrplans die Effizienz der Netzspeisung nicht sinkt. Gegebenenfalls können so die Stückkosten für Akkumulatoren gesenkt werden. Möglich wird das durch die Schaffung eines möglichen zweiten Lebenszyklus für gebrauchte Akkumulatoren in Unterwerken.

- **Förder- bzw. Anreizprogramme zum Schließen von Lücken zwischen Demonstrationsvorhaben und Marktreife**

Während Pilot- und Demonstrationsvorhaben von Seiten der Politik noch eher gefördert werden, stehen meist keine Gelder zur Verfügung, um Anreizprogramme zu initiieren, um die Lücke zwischen Demonstrationsvorhaben und Marktreife zu schließen. Ein gutes Beispiel ist die Förderung der Hybridbusse. Die aktuellen Förderprogramme („Elektromobilität in Modellregionen“ des BMVBS; „Förderung der Anschaffung von Hybridbussen im öffentlichen Nahverkehr“ des BMU) laufen derzeit aus. Es ist noch nicht klar, ob Hybridbusse weiter gefördert werden. Die aktuellen Entwürfe der Förderprogramme sehen nach Auskunft der Fahrzeughersteller ausschließlich die Förderung elektrischer Busse vor. Aus Sicht der ÖPNV-Unternehmen und Bushersteller wäre es aber zielführender, Anschlussprogramme zur Förderung von Hybridbussen zu initiieren, um diese von Pilot- und Demonstrationsfahrzeugen hin zu marktreifen Fahrzeugen weiter zu entwickeln und damit deren Mehrkosten deutlich zu reduzieren. Da die Mehrkosten von Hybridbussen bei bis zu 100 % des Kaufpreises liegen, ist ein wirtschaftlicher Betrieb, auch unter Berücksichtigung der vollen Lebenszykluskosten, nicht möglich. Ohne spezielle Förder- bzw. Anreizprogramme dürften sich Hybridbusse, trotz der vorhandenen Energieeffizienz, erst sehr spät im Markt durchsetzen. Nach Abschätzungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes wäre in den Anfangsjahren ein Fördervolumen von 25-30 Mio. Euro notwendig (siehe Kapitel 6.1). Grundsätzlich – das gilt auch für andere Technologien – besteht dringender Handlungsbedarf der Politik, gezielte Förderprogramme zu entwickeln, um die Weiterentwicklung von Pilot- und Demonstrationsvorhaben hin zu marktreifen, wirtschaftlichen Produkten zu unterstützen.

- **Standards setzen**

Für schwere Nutzfahrzeuge und damit für Busse existieren bis heute noch keine Normverbräuche, die den ÖPNV-Unternehmen einen qualifizierten Vergleich verschiedener Bustypen in Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch ermöglicht. Derzeit wird eine Methode zur Messung des Normverbrauchs auf EU-Ebene entwickelt. Die Deutsche Regierung sollte sich einsetzen, dass dieser Normierungsschritt schnell von statten gehen kann. Weiterhin sollte dann auch von Seiten der Politik geprüft werden, ob die Energieeffizienz im Busbereich nicht durch Vorgaben zu Flottengrenzwerten, entsprechend den Flottengrenzwerten im Pkw-Bereich, schneller vorangetrieben werden kann.

Um den Problemen beim Energiecontrolling begegnen zu können, sollten klare Richtlinien und Standards angestrebt werden. Wünschenswert wären Lösungen in Form von EU-weiten Normen oder Empfehlungen wie zum Beispiel der TECREC 100-001 der UIC zur Berechnung des Energiebedarfs von Schienenfahrzeugen. Mit dieser Empfehlung ist es zum Beispiel möglich, den Fahrstromverbrauch von verschiedenen Fahrzeugen zu vergleichen, ähnlich den Testzyklen zur Angabe des Kraftstoffverbrauchs aus dem Pkw-Bereich.

Sinnvolle Standards können auch Anforderungen an Ausschreibungen sein. So wäre eine verpflichtende Ausschreibung auf Basis standardisierter LCC-Kosten anstelle des reinen Anschaffungspreises ein wichtiger Schritt, um energieeffizienten Fahrzeugkonzepten Marktchancen zu geben.

- **Richtungsentscheidungen treffen**

Neben der Festlegung von verbindlichen Klimazielen für Kommunen ist auch eine klare politische Richtungsvorgabe notwendig. Aus dieser Vorgabe sollte für jeden Verkehrsträger hervorgehen, wie diese Ziele erreicht werden sollen. Im Bereich des elektrisch betriebenen ÖPNV ist es wichtig eine Entscheidung zu treffen, ob schnellstmöglich in CO<sub>2</sub>-armen bzw. freien Strom oder in Effizienzsteigerung des Verkehrssystems investiert werden soll. Für den ÖPNV mit Bussen müsste dann entsprechend entschieden werden, ob in Biokraftstoffe oder in Energieeffizienz investiert werden soll. Die Aufteilung der vorhandenen Investitionsmittel auf beide Bereiche ist nicht zielführend. Im Moment erscheint es am sinnvollsten, in Energieeffizienz zu investieren, da die steigenden Preise für Energie auf diese Weise am ehesten kompensiert werden können.

### 8.2.2 Aufgabenträger

- **Energieeffizienz stärker in Ausschreibungen verankern**

Bei der Ausschreibung von Verkehrsleistungen im ÖPNV muss zukünftig auch bedacht werden, dass eine Ausschreibung nicht nur dazu genutzt werden kann, um das günstigste Angebot zu finden, sondern auch Nachhaltigkeit zu fördern. Daher muss bei der Gewichtung der Kriterien zur Bewertung der Angebote auf eine Ausschreibung darauf geachtet werden, dass Energieeffizienz nicht nur ein Nebenthema ist. Außerdem ist zu beachten, dass die Vergabe in vielen kleinen Losen zu mehr Leerkilometern führt und beispielsweise die Bereitschaft senkt, in Abstellanlagen im Netzschwerpunkt zu investieren, um möglichst kurze Wege zur Abstellung zu realisieren. Insgesamt führt steigender Kostendruck auf Seiten der Verkehrsunternehmen zu einer geringen Bereitschaft in Effizienzsteigerung zu investieren. Ein weiterer Punkt, der bei Ausschreibungen zu berücksichtigen ist, ist die Laufzeit der Konzessionen. Zu kurze Laufzeiten erschweren die Amortisation der Investition und schaffen bezogen auf die Lebenszykluskosten einen Schwerpunkt bei den Investitionskosten an Stelle der Betriebskosten.

- **Anreizsysteme zur Energieeffizienz etablieren**

Im Rahmen des EU-Projekts ECORailS wurden Anreizsysteme beschrieben, die in Ausschreibungen eingesetzt werden können, um die Energieeffizienz im Schienenpersonenverkehr zu erhöhen. Die Anreize werden dabei über Gewährung von Boni oder durch Verwendung von Malussen geschaffen. Die Systematik dazu wurde mit Aufgabenträgern, Verkehrsunternehmen und Fahrzeugherstellern diskutiert und abgestimmt. So konnte sichergestellt werden, dass sie konform zu EU-Recht sind, langfristige Planungen

unterstützen aber gleichzeitig den Einsatz effizienter Technologien fördern aber auch auf andere Themen wie z.B. Lärminderung im Schienenverkehr übertragbar sind.

- **Rahmenbedingungen verbessern**

Der Punkt Attraktivität muss auch seitens der Aufgabenträger weiter bearbeitet werden. Neben den Komfortansprüchen der Fahrgäste, kann auch die Bequemlichkeit beim Ticket positiv beeinflusst werden. Neben den Möglichkeiten, die die Verkehrsunternehmen haben, sollten die Aufgabenträger weiter Umwelt- bzw. Verkehrsverbünde als Mittel zur Attraktivitätssteigerung verwenden. Einheitliche Ticketsysteme, abgestimmte Fahrpläne, intermodale Angebote sind Mittel die genutzt werden sollten um die Auslastung der Fahrzeuge im ÖPNV zu erhöhen.

### 8.2.3 Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) und ÖPNV-Unternehmen

Die Möglichkeiten des Verbandes Deutscher Verkehrsbetriebe (VDV) liegt insbesondere darin seinen Mitgliedsunternehmen Hilfestellungen zu geben, welche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und der erneuerbare Energie zielführend sind. Konkret kann der VDV dazu beitragen, durch weitere Unterstützung durch Informationen mögliche Defizite für mehr Klimaschutz im ÖPNV abzubauen. Konkret sind folgende Handlungen möglich:

- **Aufbau eines internetbasierten Leitfadens „Klimaschutz im ÖPNV“:**

Viele Unternehmen haben bereits in der Vergangenheit erfolgreich Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs ergriffen. Von diesen Beispielen lernen, muss die Devise sein. Daher sollte der VDV einen internetbasierten Leitfaden anbieten, der den Unternehmen Hilfestellung bei der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen gibt. Insbesondere sollten auch betriebswirtschaftliche Bewertungen der Maßnahmen mit Hilfe der Lebenszykluskostenanalyse mit angeboten werden. Zentraler Punkt des Leitfadens ist aber, dass Best-Practice-Beispiele, die ÖPNV-Unternehmen bereits erfolgreich durchgeführt haben, vorgestellt werden. Die Unternehmen können so untereinander lernen.

- **Austausch zu Klimaschutz befördern**

Um dem Informationsdefizit zu Techniken und Maßnahmen auf Seiten der Aufgabenträger und zum Teil auf Seiten der Verkehrsunternehmen entgegen zu wirken, müssen auch weiterhin Workshops und Seminare angeboten werden. Diese Informationsveranstaltungen sollten aber nicht als Werbung einzelner Hersteller für bestimmte Produkte missverstanden werden, sondern sollten durch den VDV als neutrale Plattform angeboten werden

- **Klimaschutzziel für den VDV**

Seit 2009 berichten die ÖPNV-Unternehmen an den VDV ihre jährlichen Energieverbräuche. Auf Basis dieser Zahlen könnte der VDV eine jährliche Klimabilanz des ÖPNV in Deutschland erstellen und auch publizieren. Der nächste Schritt müsste dann

sein, dass entsprechend dem Vorgehen anderer Branchen (z.B. Deutscher Hotel- und Gaststättenverband DEHOGA) sich der VDV auf ein eigenes, verbindliches Klimaschutzziel verständigt. Im Rahmen der jährlichen Klimaschutzberichterstattung sollte dann der Stand der Zielerreichung dokumentiert werden.

Die **ÖPNV-Unternehmen** selbst können aber auch noch einiges tun:

- **Lebenszykluskostenanalysen von Effizienzmaßnahmen**

Zwar geben die meisten Unternehmen an, dass sie bei größeren Neubeschaffungen ein Lebenszykluskostenbetrachtung (Life Cycle Costing – LCC) durchführen, bei der Kosteneinsparungen im Betrieb den Anfangsinvestitionen gegenüber gestellt werden. Die Praxis zeigt aber, dass diese Bewertungen doch nicht bei jeder Investitionsentscheidung durchgeführt werden. Für jedes ÖPNV-Unternehmen muss es verpflichtend werden, dass Investitionsentscheidungen auf Basis von LCC-Analysen geprüft werden müssen.

- **Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen auf Fahrscheinen**

Derzeit wird die CEN-Norm “Methodology for calculation and declaration on energy consumptions and GHG emissions in transport services (goods and passengers transport)” (CEN 16258) entwickelt und im nächsten Jahr veröffentlicht. Diese Norm bietet eine einheitliche Methodik, wie Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen von Transporten – auch Fahrten im ÖPNV – berechnet werden können und bietet auch die Möglichkeit, diese Berechnungsergebnisse zum Beispiel über Fahrkarten ergänzt um vertiefenden Informationen auf einer Internetseite zu veröffentlichen. Um gerade Kunden für das Thema Klimaschutz zu sensibilisieren und damit die Bereitschaft zu erhöhen, die ÖPNV-Unternehmen in ihren Klimaschutzanstrengungen zu unterstützen, sollten die ÖPNV-Unternehmen dazu überzugehen, die Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen von Fahrten im ÖPNV auf den Tickets auszuweisen.

- **Grüne Produkte entwickeln**

Insbesondere die stärkere Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom führt zu erheblichen Mehrkosten, die die ÖPNV-Unternehmen nicht ohne weiteres selbst tragen können. Zwar geht der Kunde davon aus, dass der ÖPNV an sich schon ein umweltfreundliches Produkt ist; dennoch sollten auch die ÖPNV-Unternehmen prüfen, ob sie nicht analog zu Umwelt-Plus der Deutschen Bahn AG ein grünes Produkt einführen, das zwar mehr kostet, dafür aber höher Umweltentlastungen mit sich bringt. Es würde sich anbieten, wie die DB AG, ein Produkt anzubieten, bei dem sichergestellt wird, dass der Fahrstrom aus regenerativen Quellen stammt. Dies setzt aber voraus, dass ein zertifiziertes Ökostromprodukt eingesetzt wird, dass zum Ausbau von nicht durch das EEG geförderte Neuanlagen zur regenerativen Stromerzeugung führen. Nur Strom aus diesen Neuanlagen ist auch emissionsmindernd und sollte dem Kunden auch erst dann als solcher verkauft werden.

### 8.3 Zusammenfassung

Klimaschutz im ÖPNV ist eine Herausforderung, die die ÖPNV-Unternehmen nicht allein lösen können. Sie sind einerseits in einer Finanzierungsfalle gefangen, andererseits sind sie mit steigenden Kundenanforderungen konfrontiert, die eher zu einem Anstieg des Energieverbrauchs (z. B. durch Klimatisierung, Board-Entertainment) als zu einer Senkung beitragen. Der Unsicherheiten bei den zukünftig zur Verfügung stehenden Mitteln durch den Wegfall der Förderung nach dem Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) und die gleichzeitig steigenden Investitionsbedarfe für die Finanzierung der bestehenden Infrastruktur (insbesondere bei Straßen-, Stadt- und U-Bahnen) schränkt den Handlungsspielraum der ÖPNV-Unternehmen in Investitionen in energieeffiziente Technologien und erneuerbare Energien ein.

Gleichzeitig, das zeigen die Ergebnisse dieser Studie, werden selbst beim Verzicht auf eine aktive Klimaschutzpolitik der ÖPNV-Unternehmen auch in Zukunft gegenüber dem Pkw beim Thema Klimaschutz die Nase vorn haben. Aus Umweltsicht besteht somit kein Handlungsbedarf. Andererseits zeigt diese Studie aber auch, dass die ÖPNV-Unternehmen aufgrund steigender Energiepreise bis 2020 mit 0,42 Mrd. Euro und bis 2030 insgesamt mit rund 1,3 Mrd. Euro mehr belastet sein werden (berechnet zu Preisen von 2008), wenn sie keine energieeffizienten Fahrzeuge und Technologien verstärkt einführen. Setzen die ÖPNV-Unternehmen auf eine aktive Klimaschutzpolitik und führen konsequent energiesparende Technologien ein, können die Mehrkosten vollständig kompensiert werden. Es können gar Kosten gegenüber heute gespart werden, trotz steigender Energiepreise.

Gerade Investitionen in energiesparende Technologien rechnen sich, dennoch werden sie nicht umgesetzt. Als Hemmnisse wurden identifiziert:

- *Fehlende Informationen:* Immer noch ist vielen Unternehmen nicht bewusst, mit welchen Maßnahmen wie viel Energie eingespart werden kann. Oft ist in den Unternehmen auch gar nicht bekannt, wo die Hauptenergieverbraucher sind. Auf dieser Basis können nur bedingt Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchgeführt werden.
- *Beschränkter finanzieller Handlungsspielraum:* Trotz Rentabilität der Maßnahme fehlen die Budgets für die notwendigen Anfangsinvestitionen. Die Investitionen stehen in Konkurrenz zu anderen Investitionen (z. B. in Infrastruktur). Hier fehlen Investitionshilfen.
- *Keine Amortisation innerhalb der Nutzungsdauer:* Gerade innovative Fahrzeugkonzepte (z. B. Hybridbusse) rechnen sich aus heutiger Sicht aufgrund der hohen Investitionskosten nicht ökonomisch innerhalb der Nutzungsdauer. Ohne entsprechende Investitionszuschüssen werden die ÖPNV-Unternehmen diese Technologien nicht anschaffen. Amortisation der Investitionen kann auch dann nicht erreicht werden, wenn die Verkehrsverträge zu kurz gewählt sind.
- *Technologieentwicklung:* Aktuell sind Technologien in der Entwicklung, die zukünftig zur Steigerung der Energieeffizienz im ÖPNV beitragen können (z. B.

Schlussbericht

rückspeisefähigen Unterwerken als Teil eines „Smart Grid“). Ohne gezielte Förderung durch Pilot- und Demonstrationsvorhaben finden diese Technologien nicht den Weg in die Praxis.

- *Konkurrierende Ziele:* In der Vergangenheit haben konkurrierende Ziele dazu geführt, dass Effizienzpotentiale nicht vollständig ausgenutzt werden konnten (z. B. Abgasstandards versus Energieeffizienz). Auch die Parallelität der zukünftig möglichen Antriebskonzepte (Erdgas- bzw. Biogasbus, Diesel-Hybridbus, vollelektrischer Bus, Brennstoffzellenbus etc.) erschwert die Konzentration der Forschungsaktivitäten auf die Optimierung eines Bussystems.
- *Fehlende Standards:* Normverbrauchsangaben für Busse und Schienenfahrzeuge gibt es bisher nicht. Die Auswahl der Fahrzeuge anhand normierter Verbrauchsangaben, wie es beim Pkw bereits möglich ist, gibt es nicht. Dies erschwert die Beschaffung neuer effizienter Busse erheblich.
- *Zahlungsbereitschaft der Kunden:* Für Kunden ist der ÖPNV bereits heute klimafreundlich und umweltfreundlich. Daher besteht für ÖPNV-Kunden derzeit keine Zahlungsbereitschaft, für ein mehr an Klimaschutz zu bezahlen. Wie bereits beschrieben gehen die Anforderungen der Kunden eher in die Richtung, dass der Energieverbrauch des ÖPNV weiter ansteigt.

Anders als Energieeffizienzmaßnahmen führt ein verstärkter Einsatz erneuerbarer Energien zu Mehrkosten für das ÖPNV-Unternehmen. Kosteneinsparungen durch den Umstieg im Strombereich machen sich erst nach 2030 bemerkbar. Aufgrund der fehlenden Zahlungsbereitschaft der Kunden und den begrenzten Budgets der ÖPNV-Unternehmen sind Optionen für den schnellen Umstieg (z. B. der Kauf von zertifiziertem Ökostrom) kaum realisierbar.

Gleichzeitig zeigen die aufgeführten Hemmnisse, dass diese zum Teil durchaus überwunden werden können. Informationsdefizite in Bezug auf ökonomische und ökologische Effizienz der Energiesparmaßnahmen könnten beispielsweise bereits kurzfristig umgesetzt werden. Grundsätzlich setzt der erfolgreiche Abbau der Hemmnisse voraus, dass die einzelnen Akteure – Politik, Aufgabenträger sowie die Unternehmen selbst – zusammen versuchen Lösungen zu finden. Auch Klimaschutzpolitik ist Teamarbeit. Welche konkreten Schritte die einzelnen Akteure unternehmen können, sind in der Tabelle 35 aufgeführt.

<b>Akteur</b>	<b>Konkreter Handlungsmöglichkeit</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>	<b>Umsetzungszeitraum</b>
<b>Politik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Finanzielle Förderung von Effizienztechnologien</li> <li>• Standards setzen</li> <li>• Richtungsentscheidungen treffen</li> </ul>	<p>Verbesserung der Einführung von Energieeffizienztechniken durch Förderung von Forschungs- und Demonstrationsprojekten</p> <p>In Demonstrationsvorhaben erfolgreiche Effizienztechnologien mit Anreizprogrammen unterstützen und zur Marktreife bringen</p> <p>Entwicklung von vergleichbaren Normverbrauchswerten voranbringen; Flottengrenzwerte für den Busbereich etablieren</p> <p>Investitionen durch klarere politische Richtungsvorgaben hinsichtlich der Bereiche Energieeffizienz und Biokraftstoffe kanalisieren</p>	<p>kurz- bis mittelfristig</p> <p>kurz- bis mittelfristig</p> <p>kurz- bis mittelfristig; mittelfristig</p> <p>kurzfristig</p>
<b>Aufgabenträger</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energieeffizienz stärker in Ausschreibungen verankern</li> <li>• Anreizsysteme zur Energieeffizienz etablieren</li> <li>• Rahmenbedingungen verbessern</li> </ul>	<p>Stärkere Gewichtung der Nachhaltigkeitsaspekten bei Ausschreibungen</p> <p>Ausschreibungen hinsichtlich Vermeidung von Leerfahrten optimieren</p> <p>Förderung der Energieeffizienz durch Bonus- bzw. Maluszahlungen</p> <p>Steigerung der Attraktivität des ÖPNV durch besser abgestimmte Fahrpläne und bequemeres Ticketing</p>	<p>kurzfristig</p> <p>kurzfristig</p> <p>kurzfristig</p> <p>mittel- bis langfristig</p>
<b>VDV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Austausch zu Klimaschutz befördern</li> <li>• Klimaschutzziel für den VDV</li> </ul>	<p>Aufbau eines internetbasierten Leitfadens mit Best-Practice-Beispiel</p> <p>Workshops und Seminare für Ausgabenträger und Verkehrsunternehmen durchführen</p> <p>Publikation einer Klimabilanz und Entwicklung von verbindlichen Klimaschutzzielen für den gesamten ÖPNV</p>	<p>kurzfristig</p> <p>kurzfristig</p> <p>kurzfristig</p>
<b>ÖPNV-Unternehmen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lebenszykluskostenanalysen von Effizienzmaßnahmen</li> <li>• Sensibilisierung der Fahrgäste</li> <li>• Grüne Produkte entwickeln</li> </ul>	<p>Grundsätzliche Betrachtung der gesamten Lebenszykluskosten bei allen Investitionsentscheidungen</p> <p>Angabe der spezifischen THG-Emissionen pro Fahrt auf dem Ticket und Bereitstellung von Hintergrundinformationen zur Berechnung</p> <p>Umweltbewussten ÖPNV-Kunden ein hochwertiges Klimaschutzticket anbieten</p>	<p>kurzfristig</p> <p>kurzfristig</p> <p>Kurz- bis mittelfristig</p>
<b>Quelle:</b> eigene Zusammenstellung.			

**Tabelle 35 Überblick über die konkreten Handlungsmöglichkeiten der verschiedenen Akteure für mehr Klimaschutz im ÖPNV**

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2020 um 40 % gegenüber dem Stand von 1990 zu verringern. Der „Verkehr“ soll hierzu einen angemessenen Beitrag liefern, ohne dass jedoch ein konkretes sektorspezifisches Ziel formuliert ist. Unabhängig von der Höhe des zukünftigen Minderungsbeitrags des Verkehrs, spielt der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele im Verkehr eine wichtige Rolle. Er ist derzeit eine klimafreundliche Alternative zum Pkw-Verkehr, weshalb eine Verlagerung auf den ÖPNV einen Beitrag zum Klimaschutz liefern kann.

Aber wie sieht der Klimavergleich in Zukunft aus? Wird der ÖPNV möglicherweise seinen Umweltvorteil gegenüber dem Pkw verlieren? Mit welchen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz oder dem Einsatz erneuerbarer Energien kann der derzeitige Klimavorteil gesichert oder gar ausgebaut werden? Welche Erfolge bei der Reduktion des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen konnte der ÖPNV in der Vergangenheit verbuchen? Diesen Fragen ging das Forschungsprojekt „Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie und Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Personennahverkehr“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) nach, das von Hamburg-Consult und Öko-Institut e.V. zusammen mit dem Unterauftragnehmer TU Berlin und in Kooperation mit dem Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) durchgeführt wurde.

Unter ÖPNV im Sinne dieses Gutachtens werden dabei einerseits Verkehre mit Straßen-, Stadt- und U-Bahnen, andererseits mit Bussen im Linienverkehr verstanden. Im Jahr 2008 entfielen auf diese Verkehre rund 5 % der Verkehrsleistung in Deutschland. Geprägt wird derzeit das Bild des ÖPNV noch von Bussen mit konventionellem Verbrennungsmotoren (z. B. Diesel- und Erdgasbusse) sowie elektrisch betriebenen Fahrzeugen (z. B. Straßen-, Stadt- und U-Bahnen sowie O-/Trolley-Bussen). Bis zum Jahr 2030 werden zusätzlich Hybridbusse an Bedeutung gewinnen, weshalb sie ebenfalls im Rahmen dieses Gutachtens mitbetrachtet werden. Wasserstoffbusse wie auch rein batterieelektrisch betriebene Busse hingegen werden bis 2030 eine nachgeordnete Rolle spielen. Sie bleiben daher vom Forschungsvorhaben ausgeklammert, da diese zudem in anderen Studien des BMVBS detailliert untersucht werden.

### ***Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen 1990 bis 2008***

Datengrundlage für die Analysen des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV in der Vergangenheit waren offiziell verfügbare Statistiken, Erhebungen des VDV zum Energieverbrauch seiner Mitgliedsunternehmen sowie Daten des Verkehrsemissionsmodells TREMOD. Die vorliegenden Daten greifen aber zu kurz, um speziell für den ÖPNV Analysen zur Energieeffizienz und zum Einsatz erneuerbarer Energien durchzuführen. Daher wurden zusätzlich 13 Verkehrsunternehmen befragt, wie sich deren Energieverbrauch seit 1990 entwickelt hat und welche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und erneuerbarer Energien sie bereits umgesetzt haben.

Das Ergebnis dieser Analyse ist eindeutig. Der ÖPNV konnte seine Energieeffizienz deutlich verbessern. Die spezifischen Verbräuche der Linienbusse (einschließlich Erdgas- und O-

Busse) pro Platz-Kilometer sind von 1990 bis 2008 um 15 % gesunken, die der Straßen-, Stadt- und U-Bahnen um 16 %. Zum Vergleich: Der Pkw-Verkehr konnte im gleichen Zeitraum seine Energieeffizienz um 13 % verbessern. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass erneuerbare Energien bei ÖPNV-Unternehmen derzeit kaum eine Rolle spielen. Es werden weder nennenswert Biokraftstoffe in Reinform getankt, noch wird bewusst regenerativ erzeugter Strom eingesetzt. Der ÖPNV hat lediglich davon profitiert, dass die Herstellung der Kraftstoffe und insbesondere des Stroms in den letzten 20 Jahren deutlich umweltfreundlicher wurde.

Höhere Energieeffizienz und sinkende Emissionen bei der Herstellung der Energieträger bescheren dem ÖPNV im Jahr 2008 einen klaren Klimavorteil gegenüber dem Pkw. Die spezifischen Treibhausgasemissionen pro Personen-Kilometer (Pkm) sind beim Busverkehr mit 81 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten rund 45 %, bei Straßen-, Stadt- und U-Bahnen mit 69 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten rund 53 % niedriger als die der Pkw (147 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/Pkm).

### **Effizienzmaßnahmen und Maßnahmen zum Ausbau erneuerbare Energien bis 2030**

Um zu untersuchen, welche Maßnahmen geeignet sind, bis 2030 die Energieeffizienz und den Einsatz erneuerbarer Energien im ÖPNV zu erhöhen, wurden umfangreiche Recherchen durchgeführt und zahlreiche Expertengespräche geführt. Welche Minderungspotentiale diese Maßnahmen letztendlich in der Praxis besitzen werden, wurde zudem in einem Experten-Workshop mit Fahrzeugherstellern und ÖPNV-Unternehmern erörtert.

Bei Bussen mit konventionellen Verbrennungsmotoren – so die Expertenmeinung – werden die größten Potentiale durch die Optimierung von Motor und Getriebe (2030: maximal 15 % gegenüber heutigen Dieselnbussen), durch technische Maßnahmen zur Beeinflussung des Fahrerverhaltens (15 %), durch Optimierung der Nebenaggregate (5 %) sowie durch die Verbesserung der Energieeffizienz der Klimaanlage (5 %) erwartet. Das maximale Gesamtpotential dieser Maßnahmen ist allerdings deutlich geringer als die Summe der Einzelmaßnahmen. Mit Diesel-Hybridbussen werden gegenüber heutigen Dieselnbussen bereits bis zu 20 % Kraftstoff eingespart; bis 2030 wird die Einsparung auf 30 % ansteigen.

Beim elektrisch betriebenen ÖPNV kann die Energieeffizienz durch fahrzeugseitige Maßnahmen (z. B. Ertüchtigung des Antriebsstranges; Einsatz von Energiespeichern auf den Fahrzeugen zur Nutzung der Bremsenergie; Optimierungen bei Komfortfunktionen wie Klimaanlage) sowie durch die Optimierung der Infrastruktur (Bahnstrom-Unterwerke, Leitungen, unterirdische Haltestellen, Abstellanlagen) gesteigert werden. Die größten Potentiale, zwischen 35 % und 40 % gegenüber heute, entfallen auf rückspeisefähige Unterwerke und Energiespeicher. Potentiale zur Fahrstromverbrauchsreduzierung liegen zwischen 20 % und 35 %. Wie beim Busverkehr sind die Potentiale aber nicht additiv.

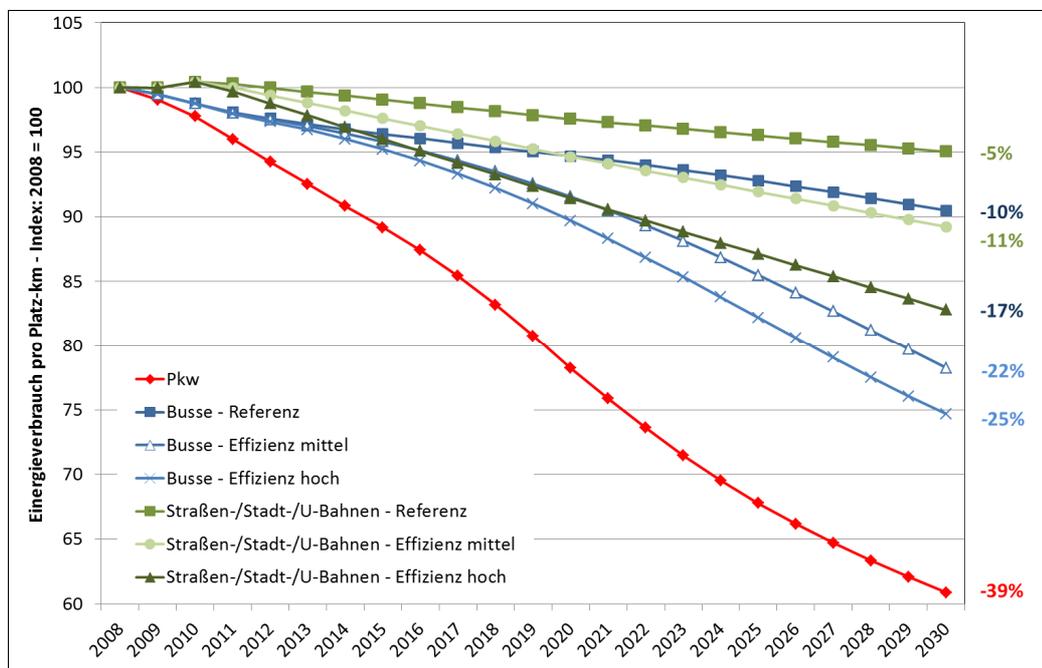
Neben der Steigerung der Energieeffizienz senkt auch der Einsatz erneuerbarer Energien die Treibhausgasemissionen des ÖPNV. Aufgrund der hohen Mehrkosten von reinen Biokraftstoffen gegenüber konventionellem Diesel mit Biokraftstoffbeimischungen (2020: 50 %; 2030: 35 %) werden ÖPNV-Unternehmen diese Option nicht nutzen, auch wenn diese eine zusätzliche 60%ige Minderung der Treibhausgasemissionen ermöglichen würde. Realistischer

ist der verstärkte Einsatz von regenerativem Strom. Ein über dem bundesdeutschen Schnitt liegender Anteil regenerativen Stroms wird bis 2020 aber zu deutlichen Mehrkosten führen (rund 2 €-Cent pro kWh), langfristig fallen die Kosten aber wieder. Die zusätzliche Treibhausgasemission dieses Stroms würde bei 50 % im Jahr 2030 liegen.

### **Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Energiekosten 2008 bis 2030**

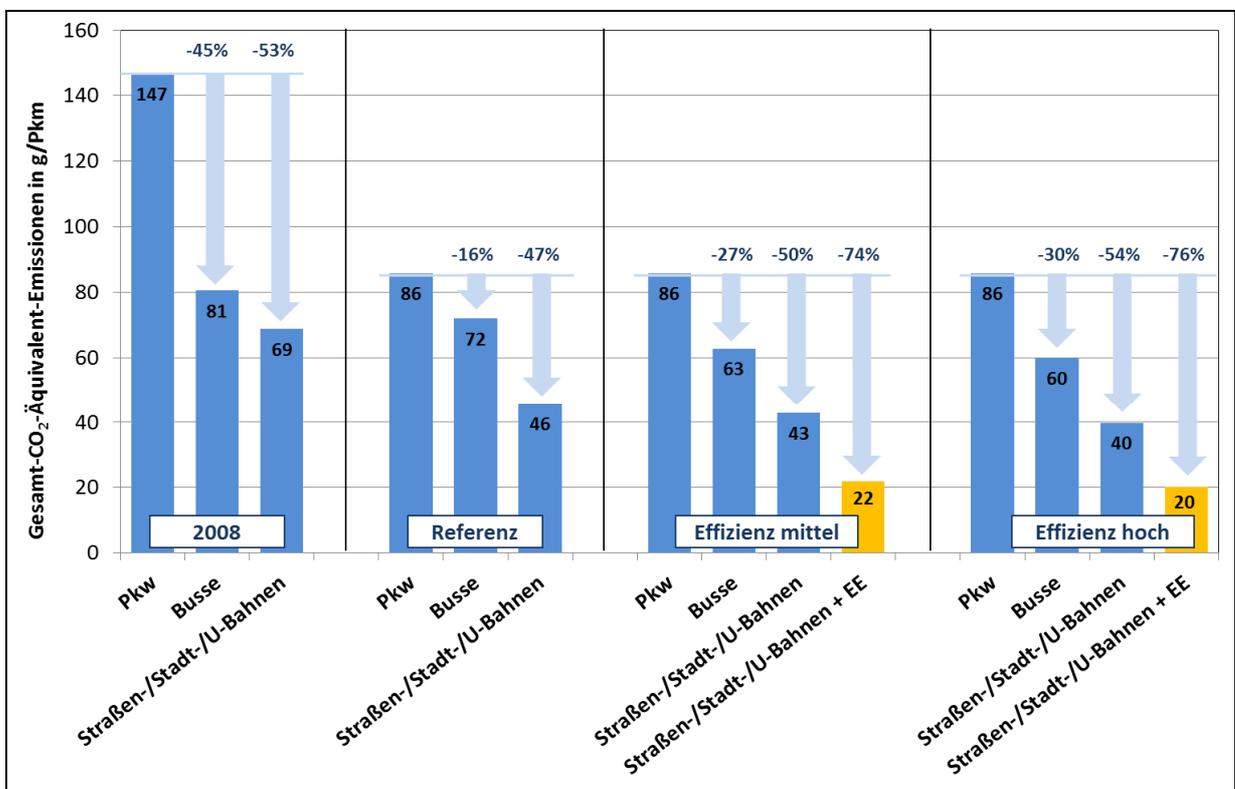
Wie sich Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen des ÖPNV bis 2030 entwickeln, hängt zum einen davon ab, wie schnell sich neue Technologien im Fahrzeugbestand durchsetzen. Zur Modellierung der Marktdurchdringung wurden für diese Forschungsvorhaben spezielle Bestandsmodelle für Busse sowie Straßen, Stadt- und U-Bahnen entwickelt. Zum anderen hängt die zukünftige Entwicklung aber auch davon ab, welche Maßnahmen umgesetzt und inwieweit die maximal erreichbaren Minderungspotentiale ausgereizt werden. Im Rahmen dieser Studie wurden hierzu drei Fälle untersucht:

- **Referenzszenario:** Die ÖPNV-Unternehmen ergreifen nicht aktiv Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz.
- **Effizienzscenario mittel:** Die ÖPNV-Unternehmen setzen alle Effizienzmaßnahmen um, die sich ökonomisch innerhalb der Nutzungs- bzw. Lebensdauer rechnen.
- **Effizienzscenario hoch:** Zusätzlich zum „Effizienzscenario mittel“ werden Effizienzmaßnahmen umgesetzt, die sich gerade noch bzw. mit Hilfe von staatlichen Förderprogramme rechnen (z. B. verstärkter Einsatz von Hybridbussen).



**Abbildung 87 Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs pro Platz-km für Verkehrsmittel des ÖPNV und Pkw-Verkehrs (Index: 2008 = 100) [eigene Berechnungen]**

Abbildung 87 zeigt die Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs pro Platz-Kilometer bis 2030 für diese drei Szenarien – getrennt nach Bussen sowie Straßen-, Stadt- und U-Bahnen (Index: 2008 = 100). Die Abbildung zeigt, dass deutliche Energieeinsparungen im ÖPNV erst erreicht werden, wenn die ÖPNV-Unternehmen aktiv Effizienzmaßnahmen ergreifen („Effizienzscenario mittel“). Straßen-, Stadt- und U-Bahnen sind 2030 in diesem Szenario rund 11 %, Busse um 22 % effizienter als noch im Jahr 1990. Der Busverkehr schneidet dabei besser ab, da die Neubeschaffungszyklen kürzer als beim schienengebundenen ÖPNV sind. Im „Effizienzscenario hoch“ können nochmals deutliche Effizienzverbesserungen erreicht werden. Insbesondere beim Schienenverkehr steigt die Effizienz nochmals deutlich an (17 %). Der Vergleich zum Pkw zeigt aber auch, dass selbst bei großen Effizienzverbesserungen im ÖPNV das Auto in den nächsten 20 Jahren größere Fortschritte erzielen wird.

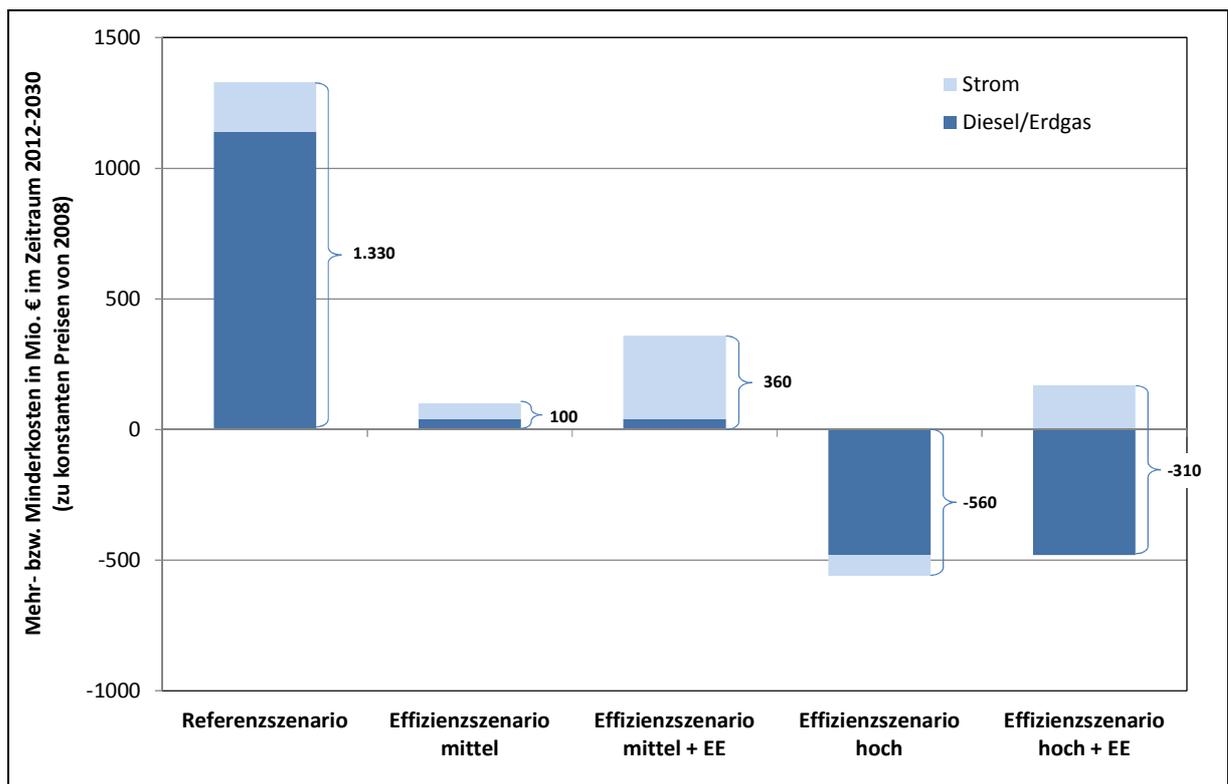


**Abbildung 88 Spezifische Gesamt-CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personenkilometer des ÖPNV- und Pkw-Verkehrs 2008 und im Referenzszenario und den Effizienz-szenarien 2030 [eigene Berechnungen]**

Trotz der im Vergleich zum Pkw geringeren Effizienzverbesserungen bis 2030 bleiben aber die Verkehrsmittel des ÖPNV die klimafreundlichsten Verkehrsmittel (siehe Abbildung 88). Selbst im Referenzszenario, bei dem ÖPNV-Unternehmen nicht aktiv Klimapolitik betreiben, sondern nur an den generell in Deutschland stattfindenden Verbesserungen partizipieren, schneidet der ÖPNV unter Klimagesichtspunkten günstiger ab als der Pkw. Allerdings zeigt Abbildung 88 auch, dass im Referenzszenario bis 2030 insbesondere bei den Bussen der Abstand der spezifischen Treibhausgasemissionen pro Pkm (berechnet als CO<sub>2</sub>-Äquivalente) gegenüber

dem Pkw deutlich geringer ausfällt als noch im Jahr 2008. In den Effizienzscenarien kann der Umweltvorteil des Busverkehrs aber wieder auf 27 % bzw. 30 % ausgebaut werden.

Die Wirkung der Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien (EE) am Fahrstrom von 45 % im Referenzfall auf 67 % in den Energieeffizienzscenarien ist ebenfalls in Abbildung 88 dargestellt (orange dargestellt). Die Treibhausgasemissionen der Straßen-, Stadt- und U-Bahnen pro Personenkilometer könnten so im Vergleich zu den beiden Effizienzvarianten ohne hohen EE-Anteil nochmals fast halbiert werden.



**Abbildung 89 Mehr- bzw. Minderkosten im Zeitraum 2012 bis 2030 aufgrund gestiegener Energiepreise und gesteigerter Energieeffizienz im Referenzszenario sowie in den Szenarien Energieeffizienz und erneuerbare Energien [eigene Berechnungen]**

Zusammenfassend kann also festgestellt werden: Der Klimavorteil des ÖPNV bleibt auch in Zukunft bestehen. Gleichzeitig zeigen die Auswertungen aber auch, dass die ÖPNV-Unternehmen für den Fall, dass sie sich nicht aktiv fürs Energie sparen entscheiden, zukünftig mehr für Energie bezahlen müssen als heute. Im Referenzszenario summieren sich die Mehrausgaben für die ÖPNV-Unternehmen im Zeitraum 2012 bis 2030 auf insgesamt 1,3 Mrd. Euro (berechnet zu konstanten Preisen von 2008; siehe Abbildung 89). Die erreichten Energiesparmaßnahmen reichen im Referenzszenario also nicht aus, die steigenden Energiepreise auszugleichen. In den Effizienzscenarien ergibt sich ein anders Bild. Im Szenario „Energieeffizienz mittel“ können bereits die steigenden Energiepreise durch Effizienzmaßnahmen nahezu ausgeglichen werden. Im Szenario „Energieeffizienz hoch“ sparen die ÖPNV-Unternehmen bereits 0,5 Mrd. Euro im Zeitraum 2012 bis 2030 ein.

## Schlussbericht

Die Mehrkosten durch den Einsatz von zusätzlichem regenerativ erzeugtem Strom können die ÖPNV-Unternehmen jedoch auch im Falle der Umsetzung aller Effizienzmaßnahmen nicht einsparen. Allerdings wird sich der Umstieg auf regenerativ erzeugtem Strom langfristig für die ÖPNV-Unternehmen rechnen. Die Analysen zeigen, dass die Mehrkosten dieses Stroms bis 2030 sinken und sich den Strompreisen des Referenzfalles angleichen.

Energieeffizienz rechnet sich damit für die ÖPNV-Unternehmen bereits mittelfristig, der Umstieg auf regenerativ erzeugten Strom langfristig. Grund genug, dass ÖPNV-Unternehmen entsprechende Maßnahmen umsetzen sollten. Es gibt aber auch noch weitere Gründe: Eine starke Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien an der Energieversorgung in Deutschland ist nur möglich, wenn der Energieverbrauch deutlich reduziert wird. Die ÖPNV-Unternehmen können sich also nicht verlassen, dass sie ohne aktives Handeln von einer Verbesserung der Umweltsituation – wie sie im Referenzszenario unterstellt wurde – profitieren können. Auch die ÖPNV-Unternehmen müssen ihren Beitrag zur Reduktion des Energieverbrauchs in Deutschland liefern.

### **Einflussmöglichkeiten von Politik, Aufgabenträgern und ÖPNV-Unternehmen**

Gerade Investitionen in energiesparende Technologien rechnen sich in der Regel für die ÖPNV-Unternehmen, dennoch werden sie nicht umgesetzt. Als Hemmnisse wurden identifiziert: Mangelnde Informationen über Effizienztechnologien, beschränkter finanzieller Handlungsspielraum der Unternehmen, zu lange Amortisationszeiten der Maßnahmen, aufwendige Technologieentwicklungen, konkurrierende Ziele, fehlende Standards sowie eine geringe Bereitschaft der Kunden Mehrpreise zu akzeptieren.

Sollen diese Hemmnisse abgebaut werden, müssen alle Akteure – Politik, Aufgabenträger, VDV und ÖPNV-Unternehmen – zusammenarbeiten. Die Politik muss sicherstellen, dass neue Technologien nicht nur über Pilot- und Demonstrationsvorhaben gefördert werden, sondern auch den Weg in den Markt finden. Ein gutes Beispiel hierfür sind Hybridbusse. Die derzeit auslaufenden Förderungen gefährden die weitere Markteinführung dieser Busse. Helfen kann die Politik aber auch dadurch, dass sie Standards setzt (z. B. Ermittlung für Normverbräuche von Bussen) und klare Zielvorgaben setzt. Aufgabenträger müssen Energieeffizienz und erneuerbare Energien stärker in Ausschreibungen berücksichtigen; Ausschreibungskriterien dürfen nicht ökologisch kontraproduktiv sein. Der VDV muss mithelfen, dass Informationsdefizite in Bezug auf Energieeffizienzmaßnahmen und erneuerbare Energien abgebaut werden. Und die ÖPNV-Unternehmen selbst müssen konsequenter als bisher, Maßnahmen unter Einbezug der gesamten Lebenszykluskosten bewerten.

### **Der Blick in die ferne Zukunft**

Für den Zeitraum nach 2030 wird im Busverkehr eine Entwicklung hin zu rein elektrisch betriebenen Bussen erwartet. Hybridbusse stellen dabei einen wichtigen Zwischenschritt in diese Richtung dar. Im Gegensatz zum Busverkehr wird bei Straßen-, Stadt- und U-Bahnen kein Systemwechsel in der Antriebstechnologie erwartet. Der heute elektrisch betriebene ÖPNV wird auch im Jahr 2050 elektrisch betrieben sein. Allerdings wird der Energieverbrauch weiter reduziert. Der ÖPNV der Zukunft ist somit elektrisch. Mit dem weiteren Ausbau des

*Schlussbericht*

Anteils erneuerbarer Energien an der Stromversorgung werden die Treibhausgasemissionen des ÖPNV nochmals deutlich sinken. Auch wenn Elektromobilität für den ÖPNV nicht Gegenstand dieser Studie war, ist davon auszugehen, dass der Umweltvorteil des ÖPNV langfristig gesichert werden kann. Dies setzt voraus, dass die Steigerung der Energieeffizienz und der erneuerbaren Energien von den Unternehmen auch nach 2030 aktiv vorangetrieben werden.

**Die nächsten Schritte**

Die Gespräche und Interviews im Rahmen dieser Studie haben gezeigt, dass enorme Informationsdefizite darüber bestehen, wie verlässliche Klimabilanzen für den ÖPNV erstellt werden und welche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und erneuerbare Energien sich für Umwelt und Geldbeutel rechnen. Gleichzeitig gibt es bereits zahlreiche Unternehmen, die innovative Ideen umgesetzt haben.

Aus diesen Gründen wird im Auftrag des BMVBS als Fortführung dieser wissenschaftlichen Studie zum einen ein Leitfaden erstellt, der ÖPNV-Unternehmen aufzeigt, wie Treibhausgasemissionen bilanziert werden sollten. Dabei wird auf die derzeit in der Entwicklung befindlichen Norm EN 16258 „Methode zur Berechnung und Deklaration von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen von Transportdienstleistungen“ eingegangen. Zum anderen wird ebenfalls im Auftrag des BMVBS eine Broschüre erstellt, in der einerseits die zentralen Erkenntnisse dieser Studie vorgestellt werden. Andererseits werden, was im Rahmen dieses Berichtes nicht möglich war, einzelne Best-Practice-Beispiele von ÖPNV-Unternehmen im Bereiche Energieeffizienz und erneuerbare Energien vorgestellt. Neben den ökologischen werden dort auch die ökonomischen Vorteile dieser Maßnahmen beschrieben.

**Fazit**

Der ÖPNV hat in den letzten 20 Jahren die Energieeffizienz deutlich gesteigert und die Treibhausgasemissionen reduziert. Auch in den nächsten 20 Jahren wird sich diese Entwicklung – wenn auch verlangsamt – fortsetzen. Der Klimavorteil des ÖPNV bleibt – selbst ohne aktives Handeln der ÖPNV-Unternehmen – auch im Jahr 2030 erhalten; allerdings holt der Pkw-Verkehr deutlich auf. Passivität wird aber die Unternehmen viel Geld kosten. 1,3 Mrd. Euro werden die ÖPNV-Unternehmen von 2012 bis 2030 mehr bezahlen, wenn sie sich nicht aktiv für Energieeffizienz und erneuerbare Energien einsetzen. Die steigenden Energiekosten können mit geringen Effizienzsteigerungen nicht ausgeglichen werden. Eine aktive Klimapolitik der ÖPNV-Unternehmen wird sich hingegen für die Unternehmen rechnen. Trotz gestiegener Energiekosten können dann 0,5 Mrd. Euro von 2012 bis 2030 eingespart werden.

## 10 Literaturverzeichnis

- 2007** 2007. Texte über unseren Schwungradspeicher. [Online] Januar 2007. [Zitat vom: 28. Februar 2011.] [www.rosseta.de](http://www.rosseta.de)
- Andersson 2004** Andersson, C.: „On auxiliary systems in commercial vehicles“; Dissertation Lund, Schweden; 2004 <http://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1039.pdf> abgerufen Juni 2011
- Berlitz, Tielkes, 2011** Klimatisierung von Schienenfahrzeugen – Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit. Karlsruhe, 12. Karlsruher Fahrzeugklima-Symposium, 2011
- Biokraft-NachV** Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung - Biokraft-NachV)
- BMU 2009** Richtlinie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zur Förderung der Anschaffung von Hybridbussen im öffentlichen Nahverkehr im Rahmen des Konjunkturprogramms II der Bundesregierung; Vom 08. Dezember 2009
- BMVBS 2011** Umsetzungsbericht zum Förderprogramm „Elektromobilität in Modellregionen“ des BMVBS, Stand Mai 2011
- BMW/BMU 2010** Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Herausgeber): „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“; Berlin 2010
- Bodach 2006** M. Bodach, H. Mehlich. 2006. Zuverlässigkeitsaspekte bei der Anwendung von Supercaps. Chemnitz : s.n., 2006
- Bombardier Transportation 2009** Bombardier Transportation. 2009. Mitrac Energy Saver. Zürich : s.n., 2009
- BVG 2010a** Berliner Verkehrsbetriebe (BVG): BVG fährt mit umweltschonenden Klimaanlage. Pressemitteilung vom 2.7.2010
- BVG 2010b** Berliner Verkehrsbetriebe (BVG): Wer, wenn nicht wir. Bericht der nachhaltigen Unternehmensentwicklung 2009. Berlin: 2010
- Dena 2010** Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): „Erdgas und Biomethan im künftigen Kraftstoffmix. Handlungsbedarf und Lösungsansätze für eine beschleunigte Etablierung im Verkehr.“; Berlin 2010
- DIW 2005** Kalinowska, D.; Kloas, J.; Kuhfeld, H.; Kunert, U. (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung): „Fahrleistungsberechnung Aktualisierung und Weiterentwicklung der Berechnungsmodelle für die Fahrleistungen von Kraftfahrzeugen und für das Aufkommen und für die Verkehrsleistung im Personenverkehr (MIV)“; Endbericht, Berlin 2005
- DLR et al. 2010** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart Institut für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Kassel Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Teltow: „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global „Leitstudie 2010““; Dezember 2010
- DVZ 2007** Deutsche Verkehrs-Zeitung: „Gründen wir den Club 30 Prozent“. Nummer 142. 2007

Schlussbericht

- Dziambor 2011** Dziambor, U. (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen): Detaildaten zu den Sonderauswertungen 2010 zum Fahrzeugbestand und zum Energieverbrauch der VDV-Mitgliedsunternehmen. Persönliche Mitteilung vom 03.11.2011; 04.11.2011 und 10.11.2011
- Eberwein 2011** Eberwein; B. (BVG): "Zukunftsfähige Busklimatisierung"; Fachgespräch Berlin 15.03.2011
- EESI 2008** Environmental and Energy Study Institute: Hybrid buses – costs and benefits. Washington 2008. [http://www.eesi.org/publications/Fact %20Sheets/Clean %20Bus %20and %20Health %20Fact %20Sheets/Hybridbusfactsheet\\_final.PDF..](http://www.eesi.org/publications/Fact%20Sheets/Clean%20Bus%20and%20Health%20Fact%20Sheets/Hybridbusfactsheet_final.PDF..)
- EN 14750-1, 2006** 14750-1, DIN EN. 2006. Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs – Teil 1: Behaglichkeitsparameter. 2006
- EPA 2010** United States Environmental Protection Agency: Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends : 1975 Through 2010. 2010
- EU-Richtlinien 2009/30/EG** RICHTLINIE 2009/30/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Spezifikationen für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe und die Einführung eines Systems zur Überwachung und Verringerung der Treibhausgasemissionen sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/32/EG des Rates im Hinblick auf die Spezifikationen für von Binnenschiffen gebrauchte Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 93/12/EWG
- Eurotransport 2011** Zeizen, F.: „Abgaslader – Druck muss sein“; 28.07.2011 <http://www.Eurotransport.de/news/abgasturbolader-druck-muss-sein-447876.html> abgerufen am 26.10.2011
- Friedrich 2002** Friedrich, A.: Fuel savings potential from low rolling resistance tires. Workshop on fuel efficient tires. Sacramento 2002
- Geyer 2005** Dr. Karl-Eberhard Geyer, Siemens AG Krefeld, Der Nutzen aus RAMS/LCC-Analysen - eine Bilanz nach 10 Jahren, 7. Internationale Schienenfahrzeugtagung 23. - 25. Februar 2005
- Guibert 2009** Guibert, Anne de. 2009. Batteries and supercapacitors cells for the fully electric vehicle. 2009
- HBEFA 2010** Infrac; Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) Version 3.1 (Jan. 2010)
- HC/Öko-Institut/TU Berlin 2011** Expertenworkshop mit im Forschungsprojekt "Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie und Steigerung der Energieeffizienz im ÖPNV" 16.09.2011 im BMVBS
- HUCHO 2005** Hucho, W.-H. (Hrsg.): Aerodynamik des Automobils. Vieweg Verlag 2005
- HYBRID 2008** Hybridcenter: Hybrid Watchdog: Hybrid transit buses – are they really green? <http://www.hybridcenter.org/hybrid-transit-buses.html>
- ifeu 2001** Udo Lambrecht, Harald Diaz-Bone, Ulrich Höpfner: „Bus, Bahn und Pkw auf dem Umweltprüfstand - Vergleich von Umweltbelastungen verschiedener Stadtverkehrsmittel“; Studie des ifeu-Instituts gefördert durch den VCD; Heidelberg 2001

Schlussbericht

- ifeu 2005** Knörr, Wolfram; Dünnebeil, Frank; Helms, Hinrich; Höpfner, Ulrich; Lambrecht, Udo; Patyk, Andreas; Reuter, Christian: Fortschreibung „Daten- und Rechenmodell“: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030. Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg: 2005
- ifeu 2010** Knörr, Wolfram: Fortschreibung und Erweiterung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMODO, Version 5). Endbericht des ifeu-Institutes im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg: 2005
- Infras 2006 und 2007** Infrast: Diesel-, Gas- oder Trolley-Bus? Gutachten für die Baseler Verkehrsbetriebe. Bern: 2006  
Infrast: Zukunft des Trolleybusbetriebs; Schlussbericht für die Verkehrsbetriebe Schaffhausen VBSH. Zürich: 2007
- InnoZ 2010** InnoZ, SCI/Verkehr, TU Berlin, DLR, FH Brandenburg. 2010. Eco Rail Innovation - Herausforderungen für das System Bahn 2020. Berlin : s.n., 2010
- Intraplan 2008a** Intraplan Consult GmbH (Hrsg.): Perspektive ÖPNV in Schleswig-Holstein: Verkehrsprognosen unter besonderer Berücksichtigung des demographischen Wandels. Abschlussbericht im Auftrag der LVS und der HVV. München: Mai 2008.
- Intraplan 2008b** Intraplan Consult GmbH (Hrsg.): Perspektive ÖPNV in Schleswig-Holstein: Verkehrsprognosen für unterschiedliche Angebotskonzepte des SPNV in Schleswig-Holstein. Bericht im Auftrag der LVS. München: Juni 2008.
- IPCC 2007** Intergovernmental panel on climate change (IPCC), Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Chapter 2: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. 2007 <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>
- IVT 2004** Hautzinger, H.; Stock, W.; Mayer, K.; Schmidt, J.; Heidemann, D. (Institut für angewandte Verkehrs und Tourismusforschung e.V.): „Fahrleistungserhebung 2002 - Teil: Begleitung und Auswertung; Band 1: Inländerfahrleistung 2002“; Untersuchung im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen; Heilbronn/Mannheim; November 2004
- IWES et al. 2011** Norman Gerhardt, Dr. Boris Valov, Tobias Trost, Dr. Thomas Degner (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES));, Dr. Wieland Lehnert (BBH); Anke Rostankowski (IKEM): „Bahnstrom Regenerativ - Analyse und Konzepte zur Erhöhung des Anteils der Regenerativen Energie des Bahnstroms“; Endbericht; Kassel/ Berlin 2011
- Kalinowska 2011** Kalinowska, D. (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung): Daten der Fahrleistungsberechnung des DIW für den Zeitraum 1993 bis 2008. Persönliche Mitteilung vom 17.2.2011
- Kämpfer 2008** Kämpfer, Björn, et al.: Verschleiß- und Schädigungserscheinungen an Schienenfahrzeugen. März 2008, Graz, Wien : Georg Siemens Verlag, 2008, Bd. ZEVrail Glasers Annalen 132. ISSN 1618-8330.
- Krömer & Heywood 2007** M. A. Kromer; J. B. Heywood: Electric Powertrains : Opportunities and Challenges in theU. S. Light-Duty Vehicle Fleet. Massachusetts Institute of Technology, 2007
- MAN 2010** Döbereiner, R. (MAN Nutzfahrzeuge AG, München; Division Research): „Hybridfahrzeuge bei der MAN Nutzfahrzeuge AG – Fahrzeug- und Motortechnisches Seminar TU Berlin“; Berlin 2010 abgerufen am 30.11.2011 [http://lexikon.kfz.tu-berlin.de/kfz-seminar/downloads-/vortrag\\_tu\\_berlin\\_28012010.pdf](http://lexikon.kfz.tu-berlin.de/kfz-seminar/downloads-/vortrag_tu_berlin_28012010.pdf)

Schlussbericht

- Muraleedharakurup et al. 2010** G. Muraleedharakurup; A. McGordon; J. Poxon; P. Jennings: Building a better business case: the use of non-linear growth models for predicting the market for hybrid vehicles in the UK. University of Warwick, 2010
- NachNA 2010** Nachhaltiger Nahverkehr, Beiträge des ÖPNV zum Umwelt- und Klimaschutz, Band 1: Ausführungsbeispiele, Hrsg. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV)/VDV-Förderkreis e.V., Düsseldorf 2010
- NAP 2010** The National Academies Press, Transportation Research Board: “Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium- and Heavy-Duty Vehicles”; National Academy of Sciences; Washington 2010
- NPE 2011** Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität; Anhang, Mai 2011 <http://www.bmu.de/verkehr/downloads/doc/47370.php>
- NOW 2011** Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie: „Ein Portfolio von Antriebssystemen für Europa: Eine faktenbasierte Analyse – Die Rolle von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen, Plug-in Hybridfahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen“; <http://www.zeroemissionvehicles.eu/> abgerufen am 27.09.2012
- OMNIBUS 2006** Omnibusrevue; Winterflood, B.: Schwere Leichtgewichte. München 2006
- Öko-Institut 2009** Renewbility – Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. Teil 1: Methodik und Datenbasis. Öko-Institut; DLR, Endbericht, Berlin 2009
- Öko-Institut 2011** Hacker, F., Harthan, R., Kasten, P., Loreck, C., Zimmer, W.: “Marktpotenziale und CO<sub>2</sub>-Bilanz von Elektromobilität“; Arbeitspakete 2 bis 5 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen; Anhang zum Schlussbericht; Berlin 2011
- Öko-Institut et al 2009** Seebach, D. (Öko-Institut); Pehnt, M. (IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg); Irrek, W. (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie); Seifried, D. (Büro Ö-Quadrat): Umweltnutzen von Ökostrom: Vorschlag zur Berücksichtigung in Klimaschutzkonzepten. Diskussionspapier. Freiburg, Heidelberg, Wuppertal: 2009
- Öko-Institut et al. 2011** Zimmer, W.; Hacker, F.; Fritsche, L.; Rausch, L.; in Zusammenarbeit mit: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Fraunhofer ISI, Karlsruhe: Weiterentwicklung des Analyseinstruments Renewbility Auftraggeber: Umweltbundesamt, Dessau (in Bearbeitung)
- Öko-Institut/IFEU 2011** Schmied, M. Knörr, W.: „Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik – Begriffe, Methoden, Beispiele“; Leitfaden des Deutschen Spediions und Logistikverband e.V.; Bonn 2011
- Pfeiffer 2010** Pfeiffer, U. (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen): Detaildaten zu den Sonderauswertungen 2006 und 2009 zum Fahrzeugbestand und zum Energieverbrauch der VDV-Mitgliedsunternehmen. Persönliche Mitteilung vom 23.11.2010
- Prognos et al. 2010** Dr. Michael Schlesinger (Prognos AG); PD Dr. Dietmar Lindenberger (EWI); Dr. Christian Lutz (GWS): „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“; Studie für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Basel/Köln/Osnabrück 2010
- Prognos/Öko-Institut 2009** Dr. Almut Kirchner (Prognos AG) ,Dr. Felix Chr. Matthes (Öko-Institut) et al.: „Modell Deutschland - Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken“; Basel/Berlin

Schlussbericht

	2009
<b>Prognos/Progt rans 2011</b>	Prognos AG, Progtans: Verkehrsdaten (Entwurf), auszug aus dem Projekt „THG-Referenzszenario“ des BMVBS, derzeit unveröffentlicht
<b>Progtans/Pro gnos 2012</b>	Progtans, Prognos AG: Kraftstoffverbrauch, Bestand und durchschnittliche Fahrleistung der Pkw in 2050 , Auszug aus dem Projekt „Entwicklung eines Referenzszenarios für die Einsparpotenziale der Treibhausgas(THG)-Emissionen und des Endenergieverbrauchs im Verkehrsbereich für die Zeithorizonte 2020 und 2050“ des BMVBS, vorläufige Ergebnisse, derzeit unveröffentlicht
<b>Pütz 2010</b>	Pütz, Ralph: Strategische Optimierung von Linienbusflotten, Alba Fachverlag GmbH + Co KG, Düsseldorf 2010
<b>Radgen 2007</b>	Radgen, Peter. 2007. Zukunftsmarkt elektrische Energiespeicherung. Berlin : Umweltbundesamt, 2007
<b>Railenergy 2007</b>	Railenergy. 2010. LCC Basisdaten. 2010
<b>Ricci 2011</b>	Ricci, Prof. Stefano. 2011. ECORails D8 Final technical overview. Rom : s.n., 2011
<b>Richter 2011a</b>	Richter, Nadja (Umweltbundesamt): Fahr- und Verkehrsleistungen sowie Emissionen des öffentlichen Verkehrs auf Basis der TREMOD-Version 5.24: Persönliche Mitteilungen vom 04.11.2011; 24.11.2011; und 29.11.2011
<b>Richter 2011b</b>	RICHTER, Wolfgang-D. 2011. Niederflurkonzepte und ihre Eigenschaften. Berlin : Siemens AG, 2011
<b>Sauer 2007</b>	Sauer, Dirk Uwe. 2007. Life needs Power - Energiespeicher in Fahrzeugen. Hannover : Hannovermesse, 2007
<b>Schirra 2011</b>	Schirra, P. (Saar-Pfalz-Bus): "Einsatz einer Klimaanlage mit CO2 als Kältemittel in einem Linienbus der Saar-Pfalz-Bus GmbH"; Vortrag DUH 15.03.2011; Berlin
<b>Sonnekalb 2006</b>	Sonnekalb, M.: „Messen und Messtechnik in Bus-Klimaanlagen“; 8. Karlsruher Fahrzeugklima-Symposium am 11. Mai 2006; Messen und Messtechnik bei Kfz-Klimaanlagen und deren Komponenten – im Labor und auf der Straße
<b>Steimel 2006</b>	Steimel, Anreas. 2006. Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung. München : s.n., 2006. ISBN: 978-3-8356-3090-1
<b>TNO 2007</b>	TNO Science and Industry: „VDL Ambassador diesel EEV bus: emission measurements and comparison with other buses“; Eindhoven 2007
<b>UBA 2010a</b>	Schwarz, W.: Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2008: Inventarermittlung der F-Gase 2008 Daten von HFKW, FKW und SF6 für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für das Berichtsjahr 2008. Gutachten von Öko-Recherche Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes. Erschienen in UBA-Text Nr. 41/2010. Dessau: 2010
<b>UBA 2010b</b>	Umweltbundesamt: „CO2-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland – Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotentiale - Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes“; Dessau-Roßlau, März 2010
<b>VCDB 2010</b>	VCDB VerkehrsConsult Berlin Dresden GmbH: „SAXHYBRID - schnellladefähige Hybridbusse im Linienbetrieb“; Fachforum Sachsen- Modellregion Elektromobilität;

Schlussbericht

Februar 2010

**VDV  
Statistiken  
2000 - 2010**

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): VDV Statistik. Köln

**ViZ 2011**

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW): „Verkehr in Zahlen – Verkehrsstatistische Daten“; Eurailpress; Berlin 2011

**Vossloh KIEPE  
2010**

Schmitz, M. (Vossloh Kiepe GmbH): "Energiesparende elektrische Antriebe – Effizienzmaßnahmen im ÖPNV – Kosten und Potentiale der Antriebstechnik – Vossloh Kiepe Hybridtechnologie“; Düsseldorf 2010

**VTT 2006**

VTT Technical Research Centre of Finland; Nylund, N.-O.: Fuel savings for heavy-duty vehicles „HDEnergy“, Summary report 2003-2005. Espoo 2006

**Wietschel et al.  
2010**

Wietschel, M. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI); Bünger, U.; Weindorf, W. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST): „VERGLEICH VON STROM UND WASSERSTOFF ALS CO<sub>2</sub>-FREIE ENDENERGIETRÄGER“; Studie im Auftrag der RWE AG; Karlsruhe, Mai 2010

## 11 Abkürzungsverzeichnis

<b>AB</b>	Autobahn
<b>AG</b>	Arbeitsgemeinschaft
<b>AO</b>	außerorts
<b>AP</b>	Arbeitspaket
<b>ASG</b>	automatisierte Schaltgetriebe
<b>BioKraftFändG</b>	Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen
<b>Biokraft-NachV</b>	Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung
<b>BKrQG</b>	Berufskraftfahrer-Qualifikations-Gesetz
<b>BTL</b>	Biomass to liquid
<b>BMU</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
<b>BMVBS</b>	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
<b>BOStrab</b>	Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung
<b>BVG</b>	Berliner Verkehrsbetriebe
<b>bzw.</b>	beziehungsweise
<b>CCS</b>	Carbon Dioxide Capture and Storage
<b>CH<sub>4</sub></b>	Methan
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>CVT</b>	Continuously Variable Transmission (stufenloser Getriebe)
<b>DB AG</b>	Deutsche Bahn Aktiengesellschaft
<b>DDR</b>	Deutsche Demokratische Republik
<b>DEHOGA</b>	Deutscher Hotel- und Gaststättenverband
<b>Dena</b>	Deutsche Energieagentur
<b>DIW</b>	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
<b>EE</b>	Erneuerbare Energien
<b>EEG</b>	Erneuerbare-Energien-Gesetz
<b>Etc.</b>	Et cetera
<b>ETCS</b>	European train control system
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>e.V.</b>	Eingetragener Verein
<b>EVU</b>	Energieversorgungsunternehmen
<b>EWI</b>	Energiewirtschaftlichem Institut an der Universität zu Köln
<b>FKW</b>	perfluorierte Kohlenwasserstoffe
<b>g</b>	Gramm
<b>GVFG</b>	Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz

Schlussbericht

<b>GWP</b>	Global Warming Potential: Faktor, der die Wirkung einer Emission auf die globale Erwärmung im Vergleich auf Kohlendioxid beschreibt. Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ) wird mit Faktor 1 angesetzt.
<b>GWS</b>	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung
<b>HBEFA</b>	Handbuch der Emissionsfaktoren
<b>H-FKW</b>	teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
<b>HKL</b>	Heizung, Klima, Lüftung
<b>IEKP</b>	Integriertes Energie- und Klimaprogramm
<b>ifeu</b>	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
<b>IGBT</b>	Insulated Gate Bipolar Transistors
<b>IKT</b>	Informations- und Kommunikationstechnik
<b>IO</b>	innerorts
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>J, MJ, PJ, TJ</b>	Joule, Megajoule, Petajoule, Terajoule: Einheit der Energie, der Arbeit oder der Wärmemenge 1 Joule = 1 Wattsekunde; 1 MJ = 10 <sup>6</sup> J = 0,278 kWh 1 PJ = 10 <sup>9</sup> MJ = 10 <sup>15</sup> J = 278.000.000 kWh
<b>K</b>	Kelvin
<b>Kfz</b>	Kraftfahrzeug
<b>kg</b>	Kilogramm
<b>km</b>	Kilometer
<b>kV</b>	Kilovolt
<b>kWh</b>	Kilowattstunde: Einheit der Energie (siehe J / Joule), auch Abrechnungseinheit für Energieverbrauch 1 kWh = 3,6*10 <sup>6</sup> J = 3,6 MJ
<b>l</b>	Liter
<b>LC</b>	liquid crystal
<b>LCC</b>	Life Cycle Costing
<b>LED</b>	light emitting diodes
<b>Lkw</b>	Lastkraftwagen
<b>LPG</b>	Liquefied Petroleum Gas (Flüssiggas)
<b>LZB</b>	Linienzugbeeinflussung
<b>m</b>	Meter
<b>Mio.</b>	Millionen
<b>MIV</b>	Motorisierter Individualverkehr
<b>Mrd.</b>	Milliarden
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Distickstoffoxid / Lachgas
<b>NEFZ</b>	Neuer Europäischer Fahrzyklus

Schlussbericht

<b>NFC</b>	Near Field Communication
<b>NM<sup>3</sup></b>	Normkubikmeter
<b>NREL</b>	National Renewable Energy Laboratory: Facility of the U.S. Department of Energy (DOE) for <i>renewable energy</i> and <i>energy efficiency</i> research, development and deployment, under the management of the Alliance for Sustainable Energy, LLC
<b>O-Busse</b>	Oberleitungsbusse
<b>OPTUM</b>	Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen
<b>ÖPNV</b>	Öffentlicher Personennahverkehr
<b>ÖSPV</b>	Öffentlicher Straßenpersonenerkehr
<b>Pkm</b>	Personenkilometer
<b>Pkw</b>	Personenkraftwagen
<b>PME</b>	Pflanzenölmethylester
<b>RECS</b>	Renewable Energy Certificate System
<b>RFID</b>	radio-frequency identification
<b>SORT</b>	Standardised On Road Testcycles
<b>SPNV</b>	Schienenpersonennahverkehr
<b>t</b>	Tonne
<b>TecReg</b>	Technical Recommendation
<b>THG</b>	Treibhausgas
<b>TREMOD</b>	Transport Emission Model: Rechenmodell zur Ermittlung der durch Verkehr verursachten Emissionen
<b>u. a.</b>	Unter anderem
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt
<b>UIC</b>	International Union of Railways
<b>V</b>	Volt
<b>VAG</b>	
<b>VDV</b>	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V.
<b>Wh</b>	Watt pro Stunde
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>z. B.</b>	Zum Beispiel
<b>zGG</b>	zulässiges Gesamtgewicht (für Fahrzeuge)

## **12 Anhang**

## Anhang 1 Methodisches Vorgehen zur Erstellung der Rechenmodelle

Die in Kapitel 2.1.1 dargestellten Datengrundlagen ergaben ca. 160 Einzelmaßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz aus den Bereichen Anlagen, Gebäude, Schienenfahrzeuge und Busse. Diese Maßnahmen wurden zunächst gefiltert, sodass noch die ca. 80 Einzelmaßnahmen verblieben, die die Bereiche Fahrstrom und Kraftstoffe betreffen.

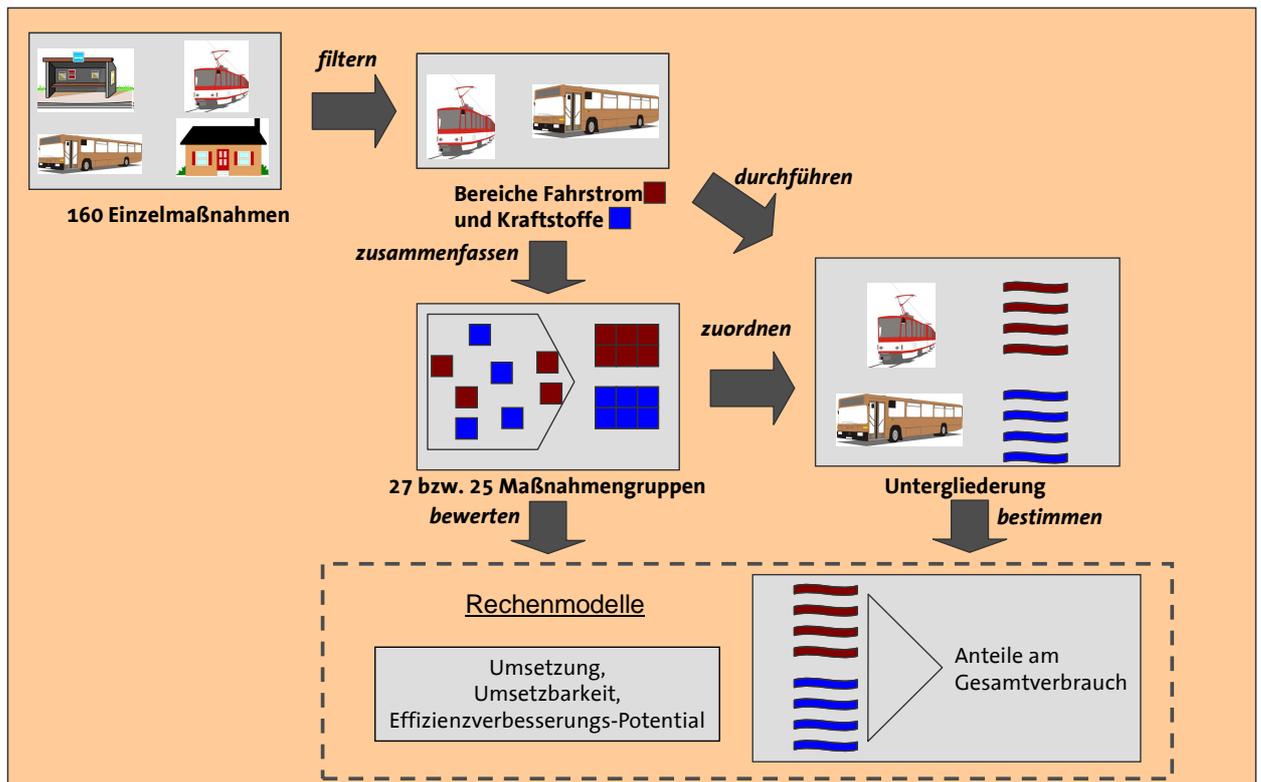


Abbildung 1 Vorgehensweise zur Erstellung der Rechenmodelle [eigene Darstellung]

Anschließend wurden für diese beiden Bereiche „Fahrstrom“ und „Kraftstoff“ die zu den Maßnahmen gehörenden Energiewandler (Verbraucher) identifiziert. In einem weiteren Schritt wurden die verbliebenen Einzelmaßnahmen in jeweils 25 Maßnahmengruppen zusammengefasst, . Jeder Maßnahmengruppe wurde zugeordnet:

- ein zugehöriger Verbrauchsanteil,
- ein Einsparpotential und
- ein Erfüllungsgrad bezogen auf das betrachtete Verkehrsunternehmen.

### Verbrauchsanteil

Angaben zum Einspareffekt werden nicht durchgehend auf den Gesamt-Fahrstromverbrauch (Stufe 1 des Fahrstrommodells) bezogen, sondern auch auf das Fahrzeug (Stufe 2) oder auf die Traktion (Stufe 3). Beispielsweise gibt es für die Wirkung der Rückspeisung unterschiedliche Quellen bezogen auf jede der drei Ebenen. Physikalisch müsste die Rückspeisung allein auf den Verbrauch des Bremswiderstandes bezogen werden.

### **Einsparpotential**

Das angesetzte Einsparpotential basiert zunächst auf Schätzungen und Erfahrungen der Verkehrsunternehmen. Wo belastbarere Informationen verfügbar sind, werden diese eingesetzt. In diesem Sinne wird das Modell kontinuierlich verfeinert.

### **Erfüllungsgrad**

Die vorläufige Datenbasis für den Erfüllungsgrad sind die Angaben in einer Matrix der Spurwerk-Kooperation zu bereits realisierten oder geplanten Maßnahmen. Der Erfüllungsgrad bezieht sich sowohl auf den Anteil der entsprechend ausgerüsteten Fahrzeuge als auch auf den in diesem Unternehmen erreichten Anteil an der Höhe des maximal erreichbaren Optimierungspotentials.

Diese Maßnahmengruppen wurden anschließend hinsichtlich ihres Erfüllungsgrads und ihrer Potentiale anhand der Recherchen, Interviews und des Workshops nochmals verifiziert und bewertet. Für die Energiewandler (Verbraucher) wurden die Anteile am Gesamtverbrauch anhand von Literaturquellen und Erfahrungswerten bestimmt, um die Auswirkungen der Einsparungen auf den Gesamtverbrauch abschätzen zu können.

## Anhang 2 Technische Erläuterungen

### Ergänzungen zum Thema Spannungserhöhung

Die Leitungsverluste in Gleichstromnetzen lassen sich nach folgender Gleichung abschätzen:

$$P_{VI} = \frac{1}{n} \cdot R' \cdot l \cdot \left( \frac{S}{U} \right)^2$$

Wobei  $P_{VI}$  die Leitungsverluste,  $n$  die Anzahl paralleler Leitungspaare,  $R'$  die Widerstandsbelegung pro km Leitung,  $S$  die eingespeiste Leistung und  $U$  die zugehörige Spannung sind. Setzt man voraus, dass weder die Infrastruktur und damit die zugehörigen Parameter noch der Leistungsbedarf der Fahrzeuge innerhalb der Betrachtung geändert wird, ist die Betriebsspannung die einzige Variable in der Gleichung. Folglich betragen die ohmschen Verluste bei 900 V Betriebsspannung nur 70 % im Vergleich zu 750 V Nennspannung.

### Ergänzungen zum Thema Fahrwerke

Da in diesen Bereichen der Städte kaum eine Optimierung der Streckenführung umsetzbar ist, müssen die Fahrwerke von Neufahrzeugen diesen Gegebenheiten angepasst werden. Vollbahndrehgestelle mit radial einstellbaren Radsätzen haben in Versuchen den Fahrwiderstand aus dem Rad-Schiene-Kontakt nachweislich um bis zu 30 % reduziert. Typischerweise gibt es bei Vollbahnen aber keine Bögen mit einem Radius unter 300 m, die im Normalbetrieb befahren werden. Die folgende Abbildung 1 zeigt die Reibleistung verschiedener Radsätze über dem Bogenradius. Der für den Fahrwiderstand von Straßenbahnen relevante Bereich liegt zwischen 25 m und 135 m Radius.

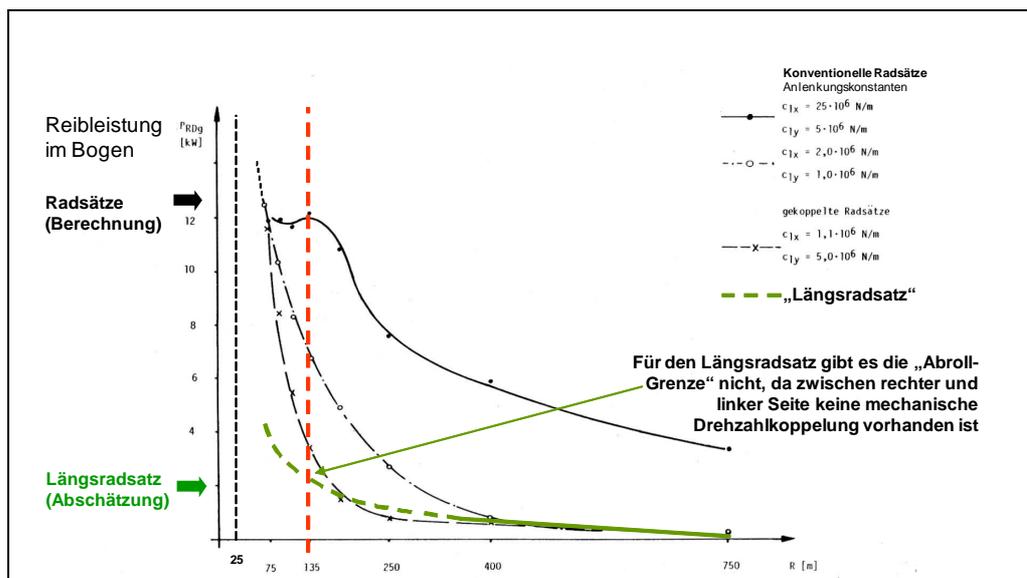
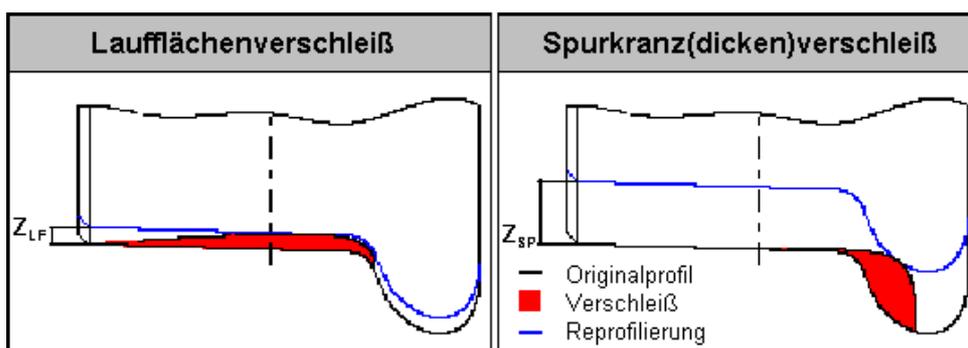


Abbildung 1 Reibleistungen verschiedener Fahrwerke bei Bogenfahrten [Richter 2011b]

Folgende Radsatztypen sind in der Abbildung 1 dargestellt: Die durchgezogene schwarze Linie repräsentiert die Reibleistung bei Bogenfahrt eines längssteifen Drehgestells mit Radsatzwellen. Die schwarze Linie mit den nicht ausgefüllten Kreisen zeigt die Reibleistung eines längsweichen Drehgestells mit Radsatzwellen. Die schwarze, gestrichelte Linie mit den Kreuzen zeigt den Reibleistungsverlauf eines längsweichen Drehgestells mit Radsatzwellen und Kreuzankern. Die grüne, gestrichelte Linie stellt den Reibleistungsverlauf eines längsweichen Losradsatzes mit Längskopplung dar. Für die Drehgestelle mit Radsatzwellen zeigt sich ein beinahe asymptotischer Verlauf der Reibleistung mit enger werdenden Bogenradien. Bei einem Bogenradius von 25 m kann man für den Längsradsatz von einer Reibleistung pro Drehgestell von 7 kW ausgehen. Die Drehgestelle mit Radsatzwellen zeigen dann eine Reibleistung von mehr als 20 kW.

Für Verkehrsunternehmen, die über eigene Infrastruktur verfügen, sollte aus Gründen von Verschleißminimierung und Erhöhung der Energieeffizienz bei Neubaumaßnahmen der Radius von Bögen so groß wie möglich gewählt werden. Liegt eine Trennung zwischen Netz- und Fahrzeugbetreiber vor, sollte der Fahrzeugbetreiber bei Neubeschaffungen von Fahrzeugen bei einem Netz mit sehr engen Bögen aus Gründen der Energieeffizienz Fahrzeuge mit Losradsätzen anschaffen, die in Verbindung mit dem Fahrzeugaufbau sich selbst zentrieren können. Das oben gezeigte Beispiel der längsgekoppelten Losräder weist dieses Zentrierverhalten auf. Mit Hilfe dieser Konstruktion kann auch bei Losradsätzen Laufflächen anstelle von Spurkranzdickenverschleiß erreicht werden.

Bei Losradsätzen ohne Zentrierunterstützung verschleißt der Spurkranz stärker. Abbildung 2 zeigt die beiden Verschleißmuster schematisch. Der Flächeninhalt der rot markierten Flächen innerhalb der Abbildung 2 ist identisch und führt bei Spurkranzverschleiß dazu, dass beim Reprofilieren bis zu dreimal mehr Material abgedreht werden muss.



**Abbildung 2 Verschleißverhalten ohne (links) und mit sehr starkem (rechts) Spurkranzanlauf [Kämpfer 2008]**

### Ergänzungen zum Thema Antriebsaggregate

#### **Permanentmagnetmotor**

Bei heutigen Permanentmagnetmotoren (PMM) wird das magnetische Feld des Rotors durch Permanentmagnete gebildet, diese werden entweder durch Einlaminiere in Öffnungen auf

Schlussbericht

der Rotorwelle oder durch Aufkleben auf dieser befestigt. Als Werkstoff für die Magnete kommt meist eine Legierung von Neodym, Eisen und Bor zum Einsatz.

Vergleicht man den Wirkungsgrad von herkömmlichen 3-Phasen-Asynchronmotoren mit Permanentmagnetmotoren so kann man über 80 % des Kennfelds einen Effizienzvorteil von 1 - 3 % zugunsten des Permanentmagnetmotors feststellen. Die spezifische Leistung eines Permanentmagnetmotors ist zwischen 25 % und 30 % größer als die einer 3-Phasen-Asynchronmaschine. Ein weiterer Vorteil von PMM ist der geringere Kühlbedarf.

Die Drehzahlbegrenzung durch die gegenelektromotorische Kraft wird durch Feldschwächung kompensiert. Das reduziert aber den Wirkungsgrad der Maschine. Um die Feldschwächung zum Steuern der Maschine nutzen zu können, muss die Position des Rotors zu jedem Zeitpunkt mit einer Auflösung von 1 -2° um den Umfang genau ermittelt werden. Das führt auch dazu, dass jeder Motor sein eigenes Steuergerät braucht. Da die magnetische Feldstärke der Permanentmagnete temperaturabhängig ist, muss die Temperatur des Rotors im Regelalgorithmus berücksichtigt werden. Auf Grund der thermischen und mechanischen Eigenschaften der Magnete besteht ein erhöhter Konstruktionsaufwand für den Rotor [The rise of the permanent-magnet traktion motor, 2011].

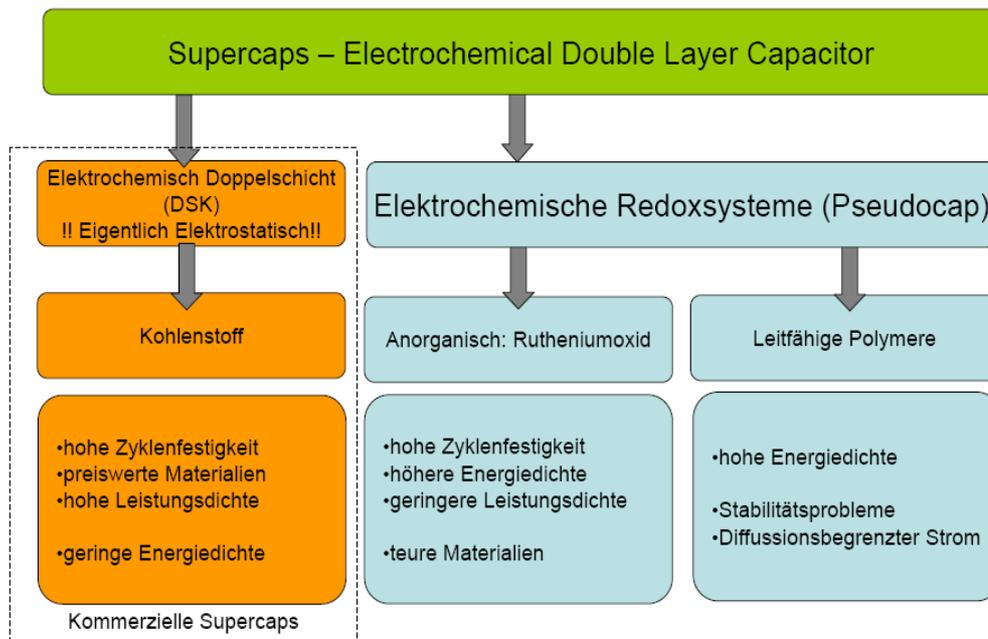
### **Radnabenmotor**

Der Einsatz von Radnabenmotoren dient der Gewichtsreduzierung, da auf Getriebe verzichtet werden kann. Auch die Wirkungsgrad behaftete Momentenwandlung in Getrieben entfällt. Durch die Verwendung von Radnabenmotoren ist es teilweise möglich, den Radstand innerhalb eines Drehgestells zu verringern, was sich durch Verringerung des Bogenwiderstands positiv auf die Energieeffizienz auswirkt. Die Erhöhung der ungefederten Massen an den Rädern kann sich ungünstig auf den Verschleiß im Rad-Schiene-Kontakt auswirken. Auch ist darauf zu achten, dass die Belastungen an den Motoren durch den ungefilterten Einfluss äußerer Belastungen steigen.

Da die Fahrzeugbetreiber meist keinen direkten Einfluss auf die Konstruktion der Laufwerkwerke haben, muss sich an dieser Stelle auf die Aussagen von Fahrzeugherstellern verlassen werden. Innerhalb einer Ausschreibung zur Fahrzeugbeschaffung sollte daher der Fahrzeugbetreiber möglichst detaillierte Streckendaten einer Referenzlinie oder des Netzes an den Hersteller mit der Forderung nach einer Berechnung des Energiebedarfs der neu zu beschaffenden Fahrzeuge zur Verfügung stellen. Neben den Streckendaten sollten in der Ausschreibung auch Messfahrten zur Verifizierung beschrieben werden. Je nach Qualität der Infrastrukturdaten kann der Hersteller mittels Simulation zum Teil sehr genaue Prognosen zum Energiebedarf der Fahrzeuge machen. Die Ergebnisse dieser Simulationen sollten im Rahmen der Inbetriebnahme der Fahrzeuge durch Messung überprüft werden. Gegebenenfalls lassen sich durch vertragliche Regelungen Kompensationen bei Nicht-Erfüllung garantierter Energieverbräuche erzielen.

## Ergänzungen zum Thema Energiespeicher

### Doppelschichtkondensator



**Abbildung 3 Klassifizierung von Doppelschichtkondensatoren [Bodach 2006]**

Die Vorteile von Doppelschichtkondensatoren (DSK) liegen in den großen Strömen in kurzer Zeit, die sie aufnehmen und abgeben können und der hohen Zyklusfestigkeit in Verbindung mit einem geringen Gewicht. Der Nachteil der verhältnismäßig großen Selbstentladung tritt vorwiegend bei stationären Energiespeichern in selten befahrenen Streckenabschnitten auf. Bei fahrzeugseitig eingesetzten Doppelschichtkondensatoren vergeht in den meisten Fällen sehr wenig Zeit zwischen dem Aufladen beim Bremsen und dem Entladen beim erneuten Anfahren. Dementsprechend gering fällt hier die Selbstentladung ins Gewicht. Die Recyclingfähigkeit der Kondensatoren ist eher gering bzw. der Aufwand der betrieben werden muss, um die Salze aus den Elektrolyten wieder aufzubereiten ist hoch.

	POTENTIALE	
	Metro	Tram
Energieeinsparpotential	bis zu 25%	bis zu 30%
<b>Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit (LCC-Betrachtung):</b>		
Anschaffungskosten (IC)	10 €/kW bzw. 20000 €/kWh zzgl. Leistungselektronik[Sauer 2007]	
Betriebskosten (OC)	Bis zu 8% Minderung der Energiekosten ab Unterwerk	
Unterhaltskosten (MC)	Bisherige Studien zeigen die Kondensatoren als wartungsfrei [Bombardier Transportation, 2009]	
Entsorgungskosten (DC)	Auf Grund organischer Lösungsmittel steigen die Entsorgungskosten leicht an.	

**Tabelle 1 Energieeinsparpotential und Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Doppelschichtkondensatoren [Ricci 2011]**

### Akkumulatoren

Akkumulatoren an Bord von Fahrzeugen bieten den Vorteil gegenüber Doppelschichtkondensatoren, dass sie zum Teil eine höhere Energiedichte besitzen. Negativ wirken sich die begrenzte Zyklenfestigkeit, der geringere Wirkungsgrad (80 % zum Vergleich: DSK 90 - 95 %), der höhere innere Widerstand und die im Vergleich zu DSK-Systemen höheren Recyclingkosten aus.

	POTENTIALE
Energieeinsparpotential	bis zu 30%
<b>Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit (LCC-Betrachtung):</b>	
Anschaffungskosten (IC)	15 €/kW bzw. 600€/kWh zzgl. Leistungselektronik [Sauer, 2007]
Betriebskosten (OC)	Bis zu 8% Minderung der Energiekosten ab Unterwerk
Unterhaltskosten (MC)	Bisher keine Praxiserprobung
Entsorgungskosten (DC)	Aufwendiges Recycling der Akkumulatoren steigert die Entsorgungskosten.

**Tabelle 2 Energieeinsparpotential und Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Akkumulatoren [Ricci 2011]**

## **Schwungradspeicher**

In Schwungradspeichern wird die Bewegungsenergie aus der Translation des Fahrzeugs in Form von Rotationsenergie gespeichert. Dazu wird elektrische Energie vom generatorischen Bremsen genutzt, um mit Hilfe eines Elektromotors die Schwungradmasse zu beschleunigen. Die Nutzung der Rotationsenergie zum Beschleunigen des Fahrzeugs funktioniert in entgegengesetzter Reihenfolge

Der Rotor befindet sich, um die Speicherverluste zu minimieren, bei einer Drehzahl zwischen 20.000 bis 50.000 pro Minute im geladenen Zustand in einem evakuierten Gehäuse. Moderne Schwungradspeicher bestehen entweder aus Stahl oder Kohlefaser-Verbundwerkstoff.

Bisherige bahntechnische Anwendungen wie zum Beispiel im Lirex (DB-Baureihe 618) zeigten Probleme bei der Dauerfestigkeit des Rotors und einen hohen Lagerverschleiß aufgrund im Fahrbetrieb auftretenden Beschleunigungen des Gehäuses. Dazu kommen Vorbehalte in Bezug auf die Sicherheit eines solchen Energiespeichers im Falle einer Kollision. Demnach wird für Energiespeicher dieser Bauart eher der stationäre Einsatz empfohlen.

## **Ergänzungen zum Thema Komfortfunktionen**

Der Aufwand, der für Fahrzeuge nach Eisenbahnbetriebsordnung (EBO) betrieben werden muss, um die Behaglichkeit für Fahrgäste und Betriebspersonal im Fahrzeug zu gewährleisten, wird in den Normen EN 13129-1:2003, EN 14750-1:2006 und 14813-1:2006 beschrieben. Die zugehörigen Typprüfungen sind den Normen EN 13129-2:2004, EN 14750-2:2006 und 14813-2:2006 zu entnehmen.

### **Optimierung der Klimaanlage (Frischlufthmenge regulieren)**

Neben dem Anpassen der Lufttemperatur im Fahrzeuginnenraum gehört die Zuführung von Frischluft zu den wichtigen Aufgaben der HKL-Komponenten. Die Luftzuführung kann durch die sogenannte freie Kühlung, also das Einlassen von Luft während der Fahrt erfolgen, als auch durch aktives Belüften mittels Gebläse. Je nach Fahrzeugausstattung und Außentemperatur müssen die Gebläse nach EN 13129-1 in der Lage sein, zum Teil mehr als 20 m<sup>3</sup> Luft pro Stunde und Sitzplatz zu fördern. Diese Anforderung beschreibt die Maximallast. Demnach kann die Luftzufuhr an die Auslastung angepasst werden. Die Auslastung des Fahrzeugs kann entweder über CO<sub>2</sub>-Sensoren oder ggf. den Luftdruck in der Sekundärfederung des Fahrzeugs ermittelt werden. Das Einsparpotential der bedarfsgerechten Belüftung des Fahrgastraumes beträgt ca. 8 % der Arbeitsaufnahme der gesamten HKL-Anlage. Bezogen auf den Fahrstromverbrauch am Unterwerk beträgt das ca. 0,8 %.

### **Optimierung der Klimaanlage (Wärmerückgewinnung aus Abluft)**

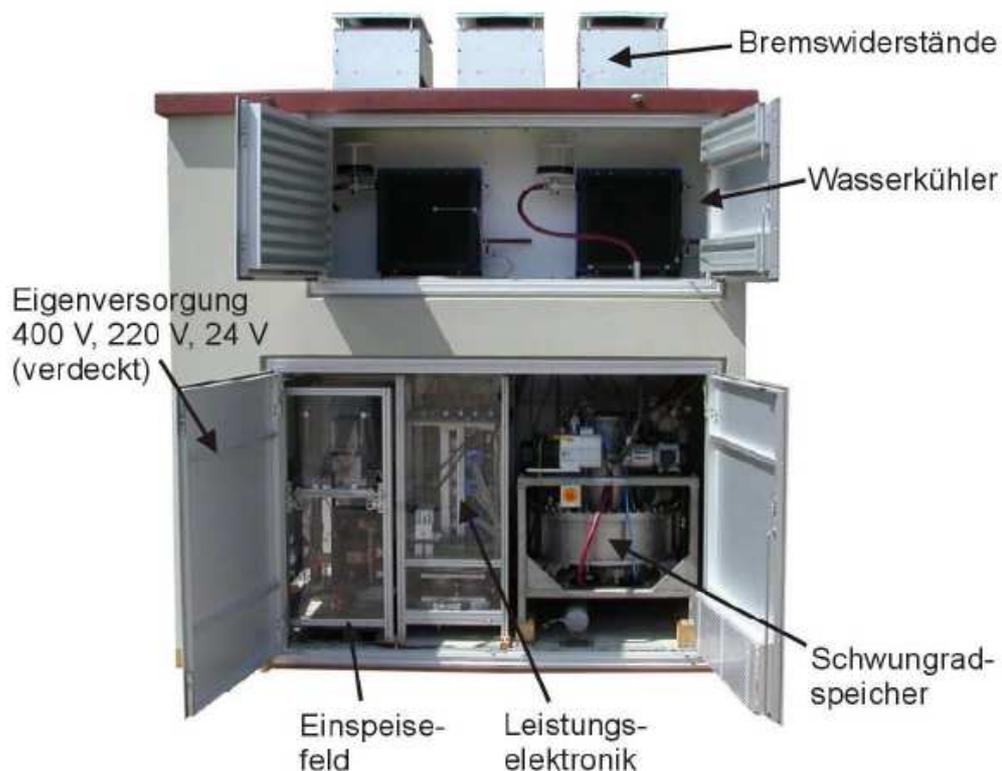
Die Nutzung der Wärme der Abluft erfolgt mittels Luft-Luftwärmetauschern. Dabei gibt es Wärmetauscher, deren Trennwände aus Aluminium oder aus Kunststoffen bestehen. Bei der Auswahl geeigneter Konstruktionen ist dabei darauf zu achten, dass in den modernen Fahrzeugen der zur Verfügung stehende Bauraum und die maximale Dachlast begrenzt sind.

Als vorteilhaft gelten also Konstruktionen, die große Wärmemengen bei geringen Bauraum und Gewicht transportieren können. Das Energieeinsparpotential dieser Technik bezogen auf den Energiebedarf der HKL-Anlage liegt zwischen 14 – 20 % [Energie-Verbrauchsanalyse und Einsparpotentiale bei Klimaanlage , 2007]. Bezogen auf den Fahrstromverbrauch am Unterwerk beträgt das Einsparpotential 1,5 – 2 %.

### Ergänzungen zum Thema Energiespeicher

#### **Schwungmassenspeicher**

Schwungradspeicher eignen sich vorwiegend für den stationären Einsatz. Die Abbildung 4 zeigt den Aufbau eines stationären Schwungradspeichers im Netz der Zwickauer Straßenbahn. Der prinzipielle Aufbau des Schwungradspeichers entspricht der Beschreibung im Abschnitt 0.



**Abbildung 4 Schwungradspeicher der Firma Rosseta Technik GmbH [2007]**

Entscheidend für die Energieeinsparung unter Verwendung des Speichers ist die richtige Dimensionierung. Die maximale, kurzzeitige Stromaufnahmefähigkeit des Speichers sollte dabei etwas höher sein, als der Strom, der im gewählten Netzabschnitt beim Bremsen der Fahrzeuge auftritt. Sollte die beim Bremsen im Abschnitt rückgespeiste Energie die Energieaufnahmefähigkeit eines Speicherrades übersteigen, kann das Speichersystem auch mehrere Schwunräder nebeneinander enthalten. Exemplarisch sind in der Tabelle 3 die technischen Daten des oben abgebildeten Speichersystems dargestellt.

Parameter	
Spannung	450 .. 1000 V
maximale Ströme	- 1000 A .. + 1000 A
Drehzahlbereich	15000 .. 25000 /min
nutzbarer Speicherinhalt	4 kWh
Leerlaufverlustleistung bei unterer Drehzahl	2,0 kW
Hilfsenergiebedarf	2,5 kW
Gesamtwirkungsgrad	80 %
Abmessungen des Betoncontainers (Länge x Breite x Höhe)	3,0 x 1,8 x 3,15 m
Dauer bis zur ersten Hauptuntersuchung	20 Jahre

**Tabelle 3 Technische Daten der Anlage der Firma Rosseta im Zwickauer Straßenbahnnetz [2007]**

	POTENTIALE	
	Metro	Tram
Energieeinsparpotential	bis zu 20%	bis zu 20%
<b>Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit (LCC-Betrachtung):</b>		
Anschaffungskosten (IC)	250.000 – 300.000€	
Betriebskosten (OC)	Auf Grund geringerer Energiekosten günstiger	
Unterhaltskosten (MC) /a	3500€	
Entsorgungskosten (DC)	Keine Angaben	

**Tabelle 4 Energieeinsparpotential und Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Schwungradspeichers [2007]**

### Akkumulatoren

Der Begriff Akkumulator umfasst elektrochemische Speicher unter Ausschluss von Primärzellen. Dazu gehören wiederaufladbare Speicher auf Lithium- oder Bleibasis oder Redoxflow-Speicher.

Praktisch werden derzeit bei Li-Ionen-Akkus spezifische Energiedichten von 90 – 160 Wh/kg (200 - 300 Wh/l) erreicht. Die Selbstentladung beträgt ca. 5 - 10 % pro Monat. Die Anzahl der möglichen Zyklen ist derzeit noch begrenzt und beträgt ca. 500 bis 1200, ein relativ niedriger Wert für die Integration dieser Speicher in die Stromnetze. Der energetische Wirkungsgrad beträgt ca. 70 - 90 %. Wegen des hohen Energieinhaltes können innere und äußere Kurzschlüsse zu Bränden oder Explosionen führen. Aufgrund von Zwischenfällen werden

Schlussbericht

heutige Zellen mehrfach abgesichert. Üblich sind Stromunterbrechung bei Überdruck, Sicherheits-Ausblasöffnung, Thermoschalter, elektronische Kontrolle (Überlast, Temperatur, Ladespannung, Unterspannung) und zusätzliche mechanische Strom-Sicherung. Die Vorteile der Li-Ionen-Akkus sind ihre hohe spezifische Energie und gute Lagerfähigkeit. Der Li-Ionen-Akku kennt keinen "Memory-Effekt", er kann in 2 bis 4 Stunden wieder aufgeladen werden. Nachteilig sind die im Vergleich mit wässrigen Systemen geringe Lade-Entladeströme [Radgen 2007].

Bleiakkumulatoren sind die am weitesten verbreitete Speichertechnologie. Die heutige Energiedichte beträgt ca. 40 kg/kWh bzw. 20 l/kWh. Der Speicherwirkungsgrad liegt typischerweise zwischen 80 und 90 % bei einer Lebensdauer von 3 bis 12 Jahren, je nach Betriebsbedingungen. Die Zyklenlebensdauer liegt meist zwischen 50 und 2.000. Die Kosten dieser weitverbreiteten und etablierten Stromspeichertechnologie betragen ca. 25 bis 250 Euro/kWh. Aufgrund der großen Stückzahlen und gesetzlicher Vorgaben bezüglich der Rücknahme, wird ein großer Teil der Bleiakkumulatoren am Ende ihrer Lebensdauer recycelt [Radgen, 2007].

Redoxflow-Speicher bestehen aus Tanks, in denen die Elektrolyte gespeichert werden, einer Reaktionskammer, die durch eine Membran aufgeteilt wird, und den Pumpen zum Erzeugen der notwendigen Strömung.

Die großen Vorteile von Redox-Flow-Batterien sind hohe Wirkungsgrade, einfacher und modularer Aufbau sowie die separate Skalierbarkeit von Leistung und Energiemenge [Lastausgleich durch Redox-Flow-Batterien, 2009].

	POTENTIALE
Energieeinsparpotential	bis zu 20%
<b>Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit (LCC-Betrachtung):</b>	.
Anschaffungskosten (IC)	15 €/kW bzw. 600€/kWh zzgl. Leistungselektronik [Sauer, 2007]
Betriebskosten (OC)	Auf Grund geringerer Energiekosten günstiger
Unterhaltskosten (MC)	Keine Angaben
Entsorgungskosten (DC)	Keine Angaben

**Tabelle 5 Energieeinsparpotential und Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Akkumulatoren [Ricci 2011]**