

Inhalt

Zielsetzung

Absichten dieses
Positionspapiers Seite 1

Status quo

Ausgangssituation der
Untersuchung Seite 2

Untersuchung

Details der Methodik Seite 3

Ergebnisse

Bewertung der Ergebnisse Seite 5

Fazit

Schlussfolgerungen aus
der Untersuchung Seite 10

Umfassend nachhaltige Kraftstoff- und Antriebskonzepte für den Linienbusverkehr

Darstellung und Bewertung der Resultate einer vom VDV durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchung

Zielsetzung

1. Absichten dieses Positionspapiers

Mit diesem Positionspapier will der VDV seinen Mitgliedsunternehmen Argumentationshilfen an die Hand geben, die in Gesprächen mit politisch Verantwortlichen, mit Medienvertretern sowie mit Entscheidungsträgern aus anderen Bereichen vor allem eines deutlich machen sollen: Der VDV und seine Mitglieder argumentieren in der aktuellen Umwelt- und Klimaschutzdebatte auf der Basis wissenschaftlich fundierter Erkenntnisse. Zu diesem Zweck stellt das Papier die Ergebnisse einer

vom VDV mit externer wissenschaftlicher Unterstützung¹⁾ durchgeführten Untersuchung dar und bewertet diese Resultate aus ökologischer wie auch aus ökonomischer Sicht.

Um eine möglichst umfassende, einem „ganzheitlichen“ Anspruch genügende Analyse zu ermöglichen, hat sich die Untersuchung mit verschiedenen auf den gesamten Lebensweg des Busverkehrssystems – von der Fertigung der Fahrzeuge bis zur Entsorgung – bezogenen Szenarien befasst. Gleichzeitig hat sie die unterschiedlichen in der öffentlichen Diskussion befindlichen Lösungs-



1) PE International, Leinfelden-Echterdingen



varianten künftiger Kraftstoff- und Antriebskonzepte objektiv unter die Lupe genommen. Beide Ansätze ermöglichen die Identifikation zukunftsweisender, gleichermaßen ökologisch wie ökonomisch zielführender Antriebslösungen, woraus sich für die VDV-Unternehmen wichtige strategische Hilfen, beispielsweise bei der Planung künftiger Fahrzeugbeschaffungen, ergeben.

Die aus der Untersuchung gewonnenen Ergebnisse, die ausschließlich bei den heute gesetzten Rahmenbedingungen gelten, sowie deren Darstellung und Bewertung im vorliegenden Positionspapier lassen klare Tendenzen erkennen und leisten fundierte Unterstützung bei der Meinungsbildung; nichtsdestotrotz muss natürlich jedes VDV-Mitgliedsunternehmen unter Berücksichtigung seiner individuellen Rahmenbedingungen eine eigene Betrachtung anstellen.

Status quo

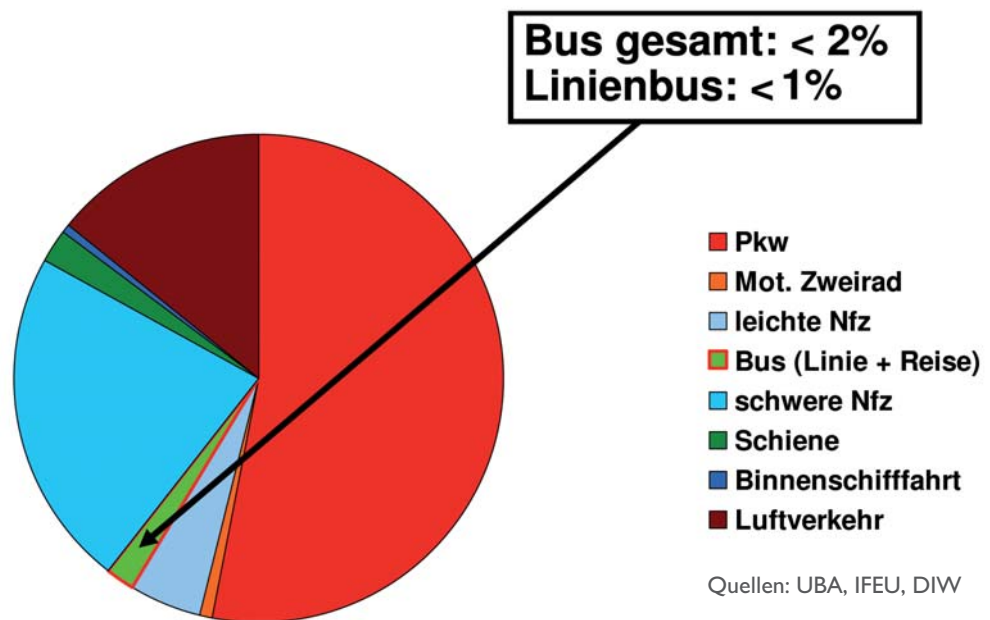
2. Ausgangssituation der Untersuchung

In den Medien und in politischen Diskussionen stehen Themen wie Klimawandel, Klimaschutz, CO₂-Einsparung sowie Feinstaub, Tempolimit und Umweltzonen in den Städten derzeit tagtäglich im Fokus. Leider wird in diesen Diskussionen der ÖPNV mit dieselbetriebenen Linienbussen immer wie-

energieverbrauchs des gesamten Verkehrssektors (siehe **Bild 1**).

Aufgrund ihres geringen spezifischen Energieverbrauchs (pro Fahrgast) und der unerreichbar niedrigen spezifischen Emissionen sind Linienbusse vielmehr die Problemlöser bei der signifikanten Verbesserung der Luftqualität, bei der Umsetzung einer anspruchsvollen Klimapolitik und bei der Ressourcen-Schonung.

Bild 1



Endenergieverbrauch des Verkehrssektors in Deutschland

der als „Verursacher“, z.B. von Feinstaub, an den Pranger gestellt. Dieses Anprangern ist definitiv falsch, denn die Linienbusflotte in Deutschland benötigt weniger als ein Prozent des End-

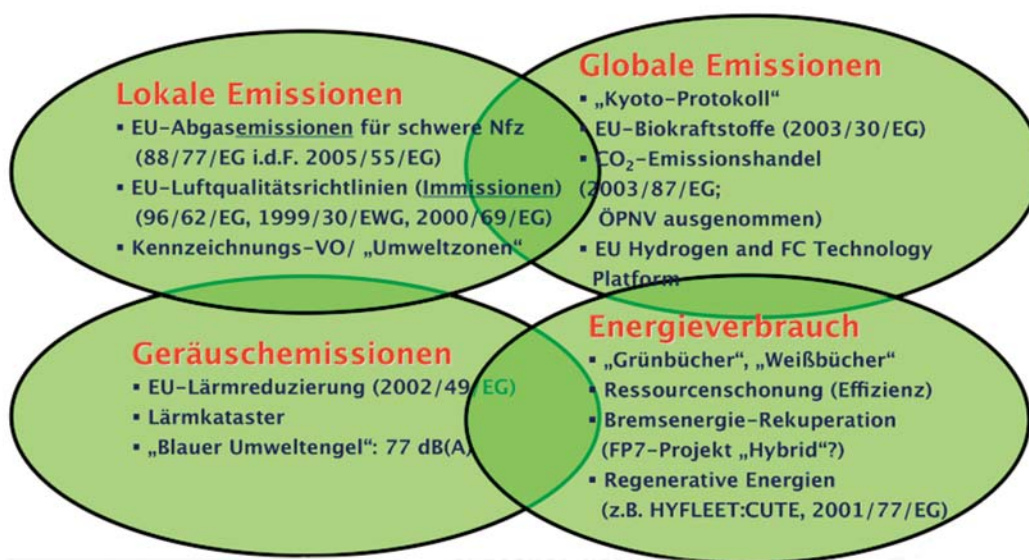
Umfangreiche Verbesserungen lassen sich alleine schon durch „Modal Shift“ hin zu öffentlichen Verkehrsmitteln erreichen. Mit der Nutzung des ÖPNV spart jeder Fahrgast durch vermiedene

Fahrten mit dem Individualverkehr bedeutende Mengen an CO₂ und Partikeln (Feinstaub) ein. Besonders die ÖPNV-Verkehrsunternehmen im VDV haben – aus eigenem Antrieb und lange vor Beginn der Thematisierung in Medien und Politik – eine Vorreiterrolle in Sachen Umweltschutz eingenommen, indem sie frühzeitig, vorausschauend und freiwillig zielführende Lösungsansätze initiiert und etabliert haben: beispielsweise in Gestalt der verbesserten Abgasqualität ihrer Flotten. Der forcierte Einsatz von Linienbusverkehrs-

systemen mit sowohl geringen lokalen als auch globalen Emissionen bei hoher Energieeffizienz stellt somit im engen Kontext einer „ganzheitlichen“ ökologischen Nachhaltigkeit im Verkehrsbereich ein wesentliches Erfolgsrezept dar (siehe **Bild 2**).

Dabei müssen die Schlüsseltechnologien auch unter den Rahmenbedingungen des liberalisierten Verkehrsmarktes in Verbindung mit rückläufiger öffentlicher Kofinanzierung ökonomisch umsetzbar sein.

Bild 2



„Ganzheitlicher“ Umweltschutz als übergeordnete Zielsetzung

Untersuchung

3. Details der Methodik

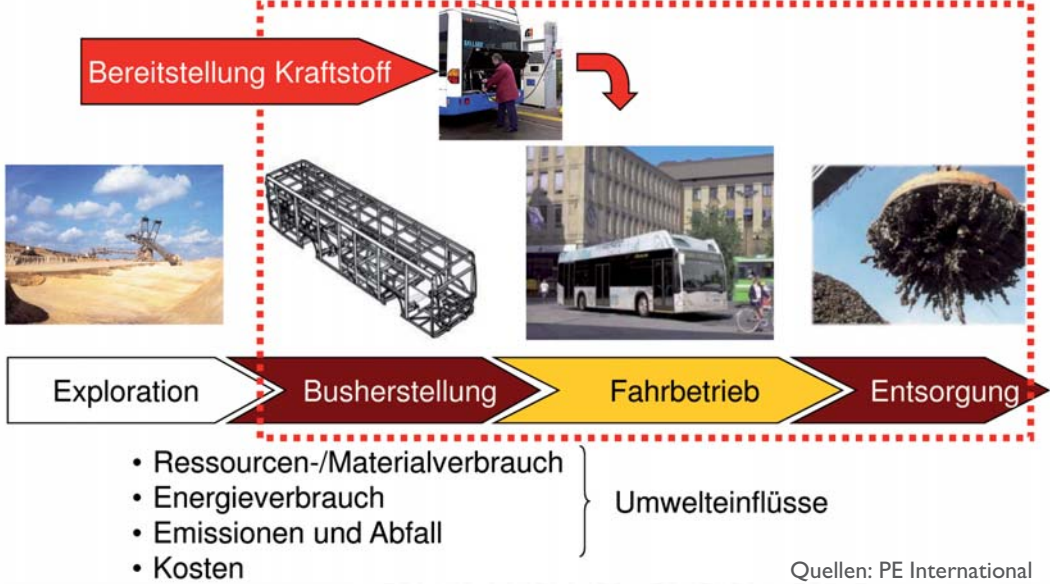
a) Randbedingungen

Bei der Analyse der ökonomischen und ökologischen Einflüsse von Linienbussen im ÖPNV wurden bisher in der Regel immer nur die Beschaffung der Neufahrzeuge und der eigentliche Fahrbetrieb betrachtet. Allerdings hat die Erfahrung mit der Feinstaubthematik gezeigt, dass eine rein lokale Betrachtung nicht ausreichend ist, sondern dass auch den bisher vernachlässigten Teilprozessen, wie Bereitstellung des Kraftstoffs und Produktion sowie Entsorgung des Fahrzeugs, Bedeutung

beigemessen werden muss. Beispielsweise kann eine ausschließliche Betrachtung der Partikelmasse-Emissionen aus dem eigentlichen Fahrbetrieb zu irreführenden Schlüssen führen, zumal bei Feinstäuben insbesondere der Ferntransport der Partikel für die Luftqualität entscheidend ist und eine komplexe Entstehung aufweist, die die „Vorketten“ einbezieht. Für eine umfassende ökonomisch-ökologische Bewertung müssen daher alle Stationen des Lebenszyklus von Linienbussen in die Analyse einbezogen werden (siehe **Bild 3**).



Bild 3



Umfassender Ansatz: Life-Cycle-Betrachtung des Systems Linienbus

Um die Ergebnisse der ganzheitlichen Betrachtung zu verdeutlichen, wurde als Basis für die Ermittlung der Kraftstoffverbräuche ein realer Fahrzyklus²⁾ mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 22,3 km/h zugrunde gelegt, der in etwa einem leichten Stadt- bzw. Vorortverkehr (SORT-2/3-Zyklus) entspricht. Außerdem wurde das Datengut des Handbuchs Emissionsfaktoren³⁾ für die Differenzierung der EURO-Grenzwertstufen genutzt. Auf dieser repräsentativen Linie wurden eine Jahresfahrleistung von 60.000 Kilometern pro Fahrzeug bei einem mittleren Besetzungsgrad von 20 Prozent und eine betriebliche Einsatzdauer von zwölf Jahren zugrunde gelegt.

b) Szenarien

Damit die Auswirkungen verschiedener Flottenzusammensetzungen auf das ökonomische und ökologische Ergebnis transparent werden, wurden ausgewählte fiktive Flotten miteinander verglichen. Untersucht wurden nicht nur die fossilen Kraftstoffpfade

- » „schwefelfreier Dieselkraftstoff“ und
- » „Wasserstoff aus Erdgas-Dampf-reformierung“;

sondern auch folgende regenerative Kraftstoffe:

- » Synthetischer biogener Dieselmotorkraftstoff der zweiten Generation (BtL = Biomass-to-Liquids) und

- » Wasserstoff (elektrolytisch erzeugt aus landgestützten Windkraftanlagen).

Im Gegensatz zu den derzeit in der Öffentlichkeit kritisch diskutierten Biokraftstoffen der ersten Generation (Pflanzenöl, Biodiesel/RME¹⁾, Bioethanol etc.) wurde hier von biogenem Dieselmkraftstoff der zweiten Generation (BtL) aufgrund seiner ethischen und klimatischen Vorteile ausgegangen.

Als Referenzflotte (**Szenario 1**) diente eine bezüglich der EURO-Grenzwertstufen prozentual an die VDV-eigene Flotte (Stand 01/2006) angelehnte Flotte von insgesamt 100 Linienbussen, jedoch ohne Partikelfilter und unter ausschließlicher Verwendung fossilen schwefelfreien Dieselmotorkraftstoffs. Dieser Referenzflotte wurden folgende Flotten gegenübergestellt:

Szenario 2:

Fahrzeugflotte wie Referenzflotte bezüglich der Grundmotorisierung, jedoch alle Fahrzeuge mit geschlossenem Dieselpartikelfilter (DPF) ausgerüstet und mit fossilem Dieselmotorkraftstoff betrieben.

Szenario 3:

Alle Fahrzeuge sind ausschließlich EEV⁵⁾-Dieselbusse (inklusive DPF) mit fossilem Dieselkraftstoff.

Szenario 4:

Wie Szenario 3, jedoch mit biogenem synthetischem Dieselkraftstoff (BtL⁶⁾).



2) Esslinger Zyklus der Stuttgarter Straßenbahnen AG

3) Handbuch für Emissionsfaktoren, Revision 2.1, des Umweltbundesamtes (HBEFA 2.1)

4) RME = Rapsölmethylester (Biodiesel)

Szenario 5:

Alle Fahrzeuge sind ausschließlich EEV-Diesel-Hybridbusse⁷⁾ (inklusive DPF) mit fossilem Dieselmotorkraftstoff.

Szenario 6:

Wie Szenario 5, jedoch mit biogenem synthetischem Dieselmotorkraftstoff (BtL).

Szenario 7:

Alle Fahrzeuge sind ausschließlich EEV-Erdgas(CNG)-Hybridbusse mit fossilem Erdgas.

Szenario 8:

Alle Fahrzeuge mit ausschließlich Wasserstoff-Ottomotoren und Hybridantrieb, angetrieben mit fossilem Nebenprodukt-Wasserstoff.

Szenario 9:

Wie Szenario 8, jedoch mit regenerativem Wasserstoff.

Szenario 10:

Alle Fahrzeuge sind ausschließlich Brennstoffzellen-Hybridbusse mit hochreinem, fossilem Wasserstoff.

Szenario 11:

Wie Szenario 10, jedoch mit regenerativem Wasserstoff.

Diese insgesamt elf Szenarien bezogen sich zur Vereinfachung auf Flotten mit jeweils 100 Linienbussen und stellen die aus heutiger Sicht aussichtsreichsten Optionen dar, wobei einige der hier betrachteten Antriebs- und Kraftstoffvarianten derzeit noch nicht seri-



enreif am Markt erhältlich sind. Die Kostenbetrachtung bezog sich auf die kapitalgebundenen Fahrzeuginvestitions- und Tankstellenkosten (beides ohne öffentliche Förderung⁸⁾), auf die Kraftstoff- inkl. der Reduktionsmittelkosten (AdBlue) sowie auf die Instandhaltungskosten (Personal und Material).

c) Energieverbrauch und Emissionen

Für die Bilanzierung der lokalen Emissionen eines Szenarios wurden als essenzielle Komponenten die Partikelmasse (PM⁹⁾) und die Stickoxide (NO_x) ausgewählt, für die globalen Emissionen kam das alle global wirksamen Bestandteile zusammenfassende CO₂-Äquivalent zur Anwendung. Ferner wurden die Primärenergieverbräuche der Flotten ermittelt.

Ergebnisse

4. Bewertung der Ergebnisse

a) Emissionen:

Weitere Reduzierungen sind machbar

Der Vergleich der verschiedenen Szenarien mit der Referenzflotte (Szenario 1) zeigt, dass die stärkste Partikelreduzierung durch den konsequenten Einsatz von Partikelfiltern (DPF) in Verbindung mit fossilem schwefelfreiem Dieselmotorkraftstoff erzielt wird (siehe Bild 4). Beim Einsatz synthetischen, regenerativen Dieselmotorkraftstoffs (BtL) sind zwar die PM-Emissionen im reinen Fahrbetrieb um rund 20 bis 30 Prozent redu-

ziert, was den BtL-Einsatz neben seinem CO₂-Potenzial rechtfertigen kann, jedoch ergeben sich bei der Herstellung dieses biogenen Kraftstoffs wesentlich erhöhte Partikel-Emissionen (PM), die die Gesamtbilanz deutlich verschlechtern. Ebenso ist eine Verschlechterung der lokalen und globalen Emissionen beim Hybridantrieb durch die Herstellung der Speichermedien und tendenziell bei Brennstoffzellen erkennbar.

Bei zunehmender Einführung der Hybridtechnik (Energierückgewinnung) wird – auch bei ausschließlicher BtL-Ver-

5) EEV = Enhanced Environmentally-friendly Vehicle

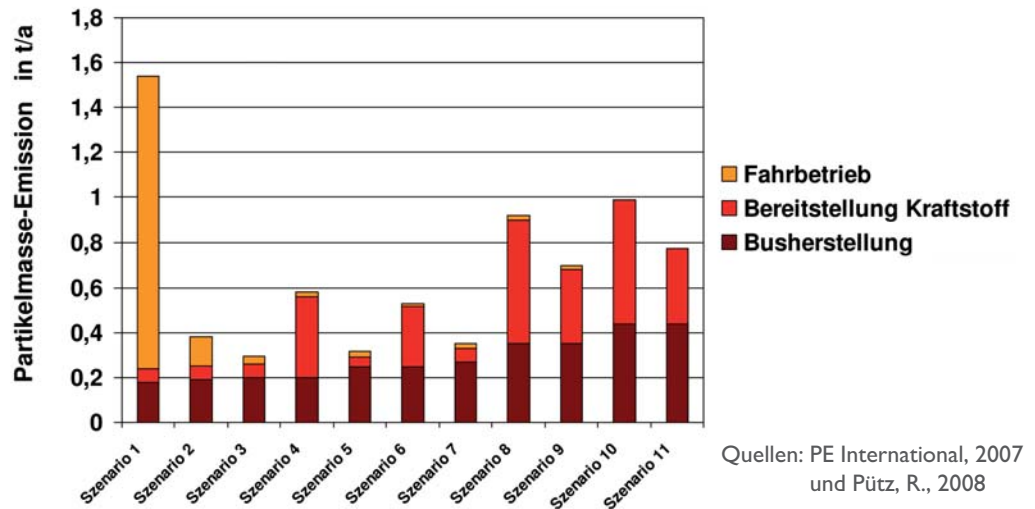
6) BtL = Biomass-to-Liquids

7) Hybridbus = Fahrzeug mit zusätzlichem Speicher zur Energierückgewinnung

8) Stand: 2007

9) PM = Particulate Matter (Partikelmasse)

Bild 4



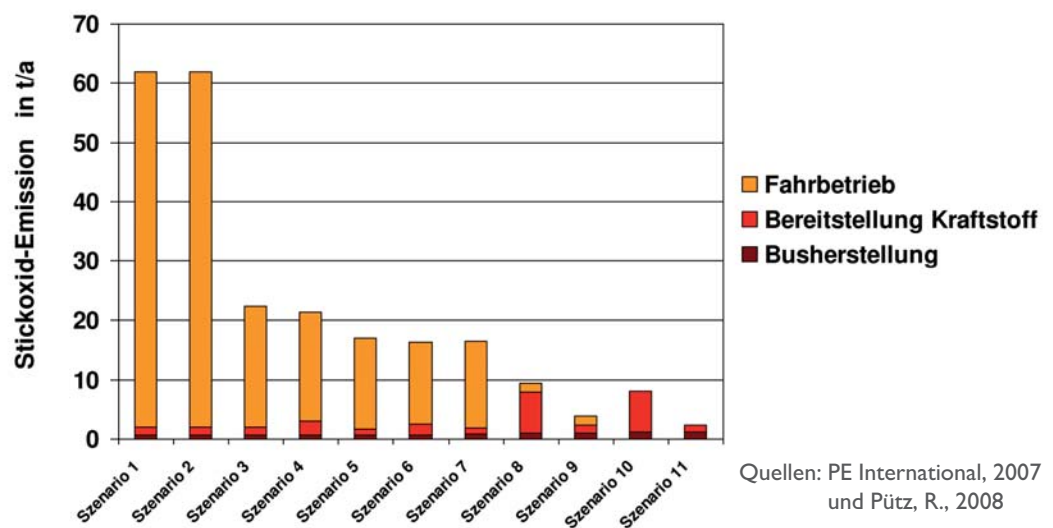
PM-Emission verschiedener Busflotten im gesamten Lebenszyklus (100 Solobusse)

wendung – eine Partikelreduzierung um etwa 65 Prozent beim EEV-Diesel-Hybridbus mit obligatorischem Partikelfilter (Szenario 6) möglich. Regenerativer Wasserstoff (aus Windkraft) erreicht weder in Bussen mit Wasserstoff-Ottomotoren (Szenario 9) noch in Brennstoffzellen-Hybridbussen eine vergleichbar große PM-Reduzierung (Szenario 11). Der fossile Wasserstoffpfad ist sogar die ungünstigste aller betrachteten Alternativen.

Deutlich erkennbar zeigen sich bei den alternativen (regenerativen) Szenarien trotz wesentlich niedrigerer PM-Emissionen im Fahrbetrieb dominierende Anteile der Partikelemissionen aus der Buserstellung und Kraftstoffbereitstellung.

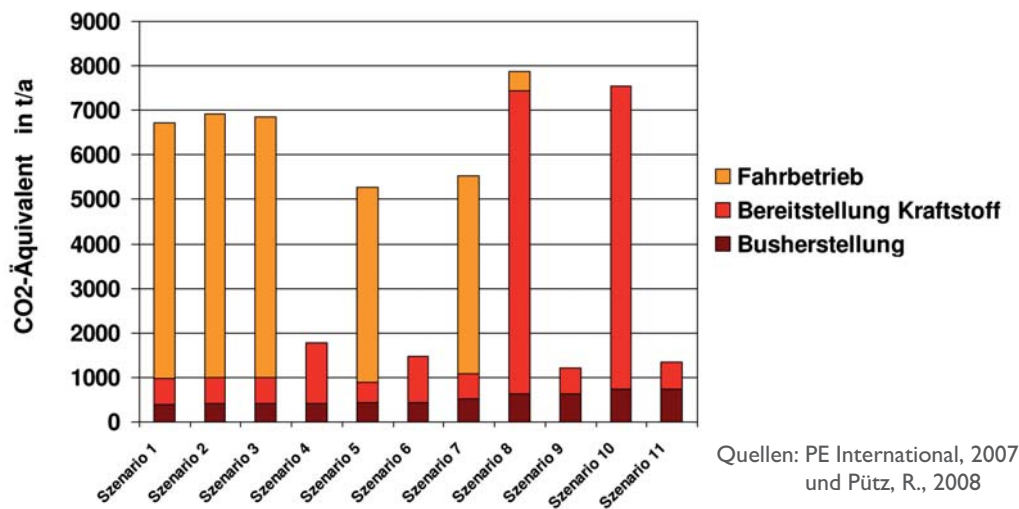
Auch die Stickoxidemissionen (siehe Bild 5) lassen sich durch Hybridisierung und gleichzeitigen Einsatz regenerativer Kraftstoffe signifikant absenken – zwischen etwa 70 Prozent durch EEV-

Bild 5



NOx-Emission verschiedener Busflotten im gesamten Lebenszyklus (100 Solobusse)

Bild 6



CO₂-Emission verschiedener Busflotten im gesamten Lebenszyklus (100 Solobusse)

Diesel-Hybridbusse mit BtL (Szenario 6) und mehr als 95 Prozent durch Brennstoffzellen-Hybridbusse mit regenerativem Wasserstoff (Szenario 11).

Das Reduktionspotenzial bei den globalen Emissionen (siehe Bild 6) liegt bei allen regenerativen Hybrid-Szenarien (Szenarien 6, 9 und 11) in etwa gleichauf bei rund 80 Prozent. Zu einem ähnlichen Ergebnis führt auch die Auswertung des gesamten Primärenergieverbrauchs (siehe Bild 7). Die Verwendung fossilen Wasserstoffs ist aufgrund der erheblichen Zunahme der globalen Emissionen und des Primärenergiebedarfes nicht zielführend (Szenarien 8 und 10).

Die EEV-Erdgastechnik mit fossilem Erdgas (Szenario 7) bietet keine Verbesserung gegenüber der fossilen EEV-Dieselseltechnik (Szenario 5) bei den lokalen Emissionen und eine Verschlechterung bei globalen Emissionen und Primärenergieverbrauch.

Die ökologische Bewertung aller Szenarien weist aus, dass für eine umfassende Nachhaltigkeit – unter Berücksichtigung lokaler und globaler Emissionen sowie des Energieverbrauchs – auch mittelfristig die Dieselseltechnik die erste Wahl bleibt, insbesondere bei Verwendung biogener synthetischer Dieselselkraftstoffe. Darüber hinaus bietet die Hybridisierung des Antriebsstranges ein zusätzliches Potenzial.



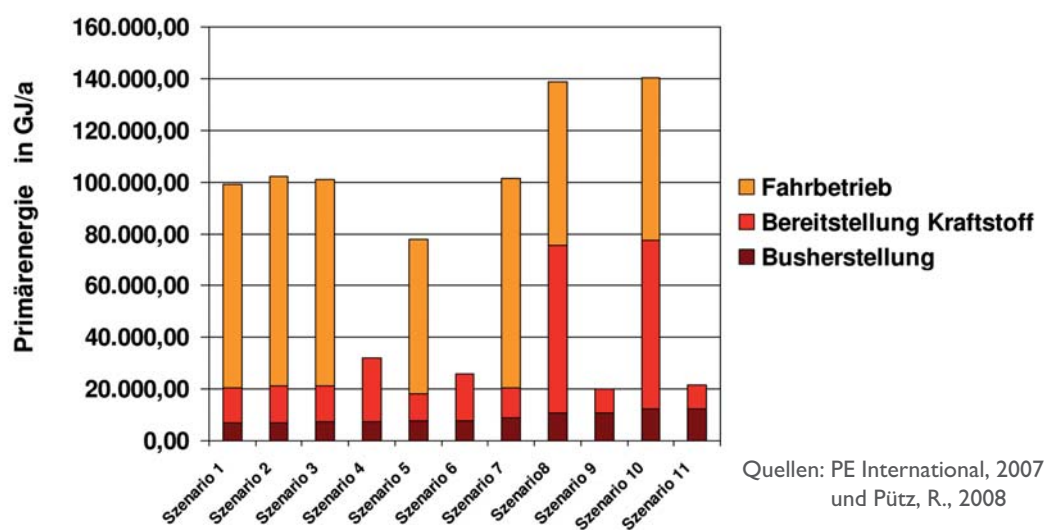


b) Kosten:
Nachhaltigkeit kann sich rechnen

Die ökonomische Analyse (siehe **Bilder 8 und 9**) zeigt beim Übergang von der Diesel-Referenzflotte (**Szenario 1**) und fossilem schwefelfreiem Dieseldieselkraftstoff zu einer EEV-Diesel-Hybridflotte und

biogenem synthetischem Dieseldieselkraftstoff (**Szenario 6**) einen Kostenanstieg – bezogen auf den gesamten Lebenszyklus der Flotten – um rund 15 Prozent. Dies liegt daran, dass die höheren Investitionskosten für Diesel-Hybridbusse und die Mehrkosten für Dieselpartikelfilter in Verbindung mit höheren Instandhaltungskosten nicht

Bild 7



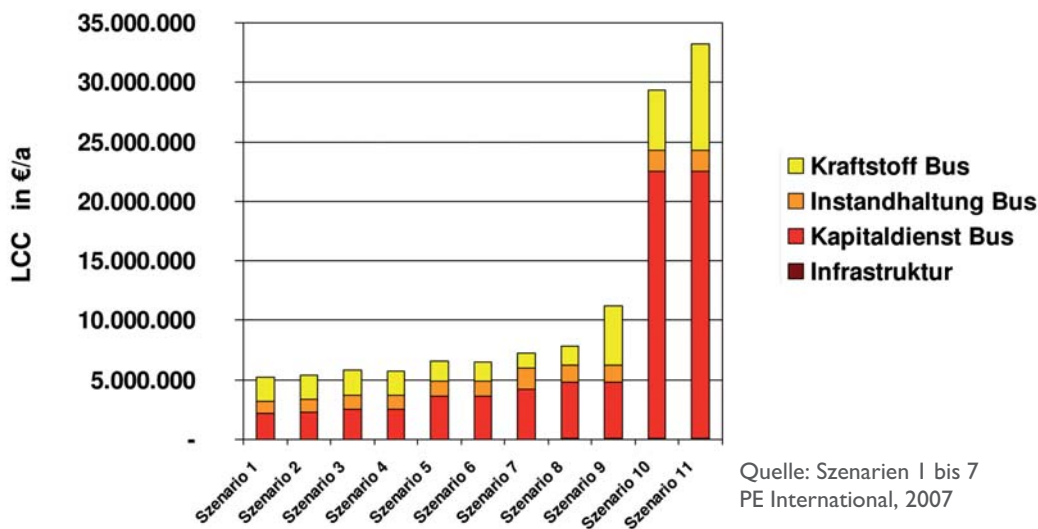
Primärenergieverbrauch verschiedener Busflotten im gesamten Lebenszyklus (100 Solobusse)

gänzlich durch die geringeren Kraftstoffkosten kompensiert werden können (Annahmen: 25 Prozent Bremsenergie-rückgewinnung (Zielvorstellung); BtL: 0,90 Euro je Liter; fossiler Diesel: 0,95 Euro je Liter). Dies belegt die Notwendigkeit einer ausreichenden öffentlichen Kofinanzierung für die

bezogene Mehrkosten von mehr als 60 Prozent für die Brennstoffzellen-Hybridflotte ergeben.

Eine Übergangslösung könnte in der forcierten Nutzung vom Nebenprodukt Wasserstoff (aktuell etwa 3 Euro je Kilogramm) in Verbindung mit Wasser-

Bild 8



Quelle: Szenarien 1 bis 7
PE International, 2007

Wasserstoff-Szenarien (8 bis 11)
Konservative Kostenannahme

Kosten verschiedener Busflotten im gesamten Lebenszyklus (100 Solobusse)

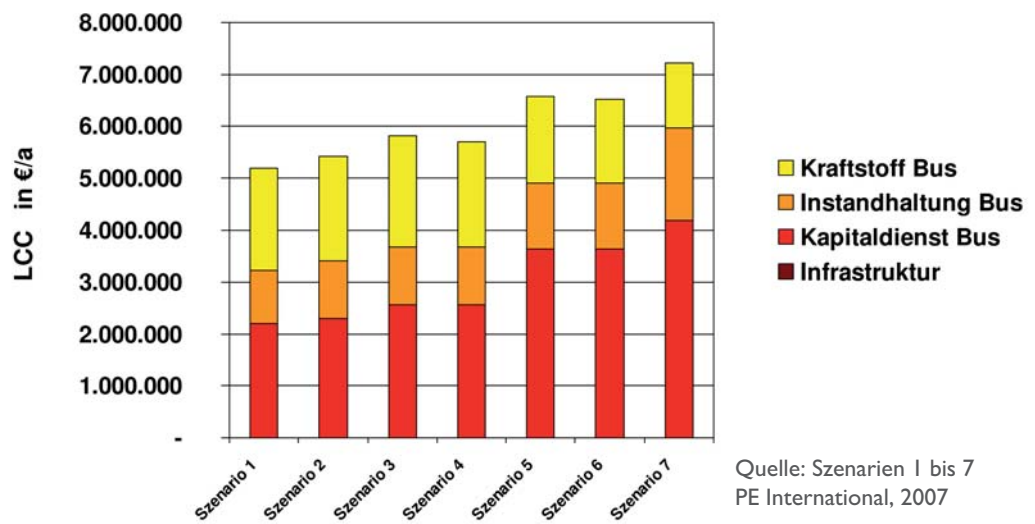
Erschließung des bereits geschilderten umweltrelevanten Potenzials durch Hybridantriebe und BtL-Verwendung. EEV-CNG-Hybridbusse (**Szenario 7**) weisen wesentlich höhere Lebenszykluskosten auf als EEV-Diesel-Hybridbusse (siehe Bild 9) und scheiden auch aufgrund der umweltrelevanten Nachteile aus.

stoffverbrennungsmotoren bestehen – eine Lösung, die in Deutschland den Bedarf von rund 5.000 Linienbussen zu decken imstande wäre, wobei die fahrzeugbezogenen Gesamtmehrkosten bereits heute auf rund 50 Prozent gedrückt werden könnten.

Beim Übergang von der Diesel-Referenzflotte (**Szenario 1**) auf eine Brennstoffzellen-Hybridflotte mit regenerativem Wasserstoff (**Szenario 11**) ergäben sich signifikante Mehrkosten – bezogen auf den gesamten Lebenszyklus – von mehr als 500 Prozent. Der hierbei angesetzte Preis von 17 Euro je Kilogramm regenerativen Wasserstoffs ist der aktuelle Bezugspreis für elektrolytisch erzeugten Wasserstoff aus Windkraft. Unter der Annahme eines Kostenrückgangs auf 4,80 Euro je Kilogramm regenerativen Wasserstoffs bis zum Jahr 2020 und einer wesentlichen Kostendegression bei Brennstoffzellen würden sich immer noch fahrzeug-



Bild 9



Kosten verschiedener Busflotten im gesamten Lebenszyklus (100 Solobusse)
(Auszug aus Bild 8)



Fazit

5. Schlussfolgerungen aus der Untersuchung

Nach Auswertung der Untersuchungsergebnisse bietet das **Szenario 6** („Übergang auf eine hochsaubere Diesel-Hybridflotte mit ausschließlicher Verwendung regenerativen synthetischen Dieselmotors“) hinsichtlich

des Emissionsprofils (lokale und globale Emissionen) und der Energieeffizienz eine ähnliche ökologische Nachhaltigkeit wie die Variante **Szenario 11** („Brennstoffzellen-Hybridbusse und regenerativer Wasserstoff“) – jedoch zu signifikant geringeren Lebenszykluskosten. Heute sind vor allem die unvergleichlich höheren Investitionskosten

für Brennstoffzellen-Hybridbusse in Verbindung mit höheren Instandhaltungskosten dominierend; sie stellen zumindest eine massive Behinderung dieser Technik im liberalisierten Verkehrsmarkt dar. Dennoch ist bereits heute mit Blick auf die überzeugenden ökologischen Vorteile des regenerativen Wasserstoffs und eine erforderliche Unabhängigkeit von fossilen Kraftstoffen die Erprobung dieser nachhaltigen Technik im Linienbus unverzichtbar. Bezogen auf den gesamten Lebensweg, sind die kapitalgebundenen Wasserstoff-Tankstellenkosten von nachrangiger Bedeutung.

Daher ist unter der Prämisse einer umfassenden Nachhaltigkeit, also aus

„ganzheitlicher“ Sicht, die hochsaubere, abgasnachbehandelte Dieseltechnik, ggf. in Verbindung mit konsequenter Hybridisierung des Antriebsstranges und Verwendung von BtL, zum heutigen Zeitpunkt die ökologisch und ökonomisch richtige Lösung. Deren ausreichende öffentliche Förderung ist für die Erschließung der deutlichen Umweltvorteile – zumindest bis zum Erreichen einer betrieblichen Serienreife dieser Technik – im liberalisierten Verkehrsmarkt unverzichtbar. Eine zukunftsorientierte Politik muss diesen Ansatz daher nachhaltig unterstützen.



Im Dienste von fast 10 Milliarden Fahrgästen im Jahr

Was 1895 mit dem „Verein Deutscher Straßen- und Kleinbahnverwaltungen“ begann, hat sich bis heute zum Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) entwickelt. Im VDV sind die Unternehmen des ÖPNV und des Eisenbahngüterverkehrs organisiert. Mehr als 600 Verkehrsbetriebe bzw. deren Verbände sind im VDV zusammengeschlossen.



Impressum

Herausgeber:

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
Kamekestraße 37-39, 50672 Köln

Verantwortlich für den Inhalt:

VDV-Fachausschuss für Kraftfahrwesen
Dr.-Ing. Claudia Langowsky

Redaktionsbeirat:

Dipl.-Ing. Peter Bronnenberg, PaderSprinter
Dipl.-Ing. Albrecht Classen, Stadtwerke Trier GmbH
Dipl.-Ing. Uwe Cramer, ESWE Verkehrsgesellschaft mbH
Dipl.-Ing. Burkhard Eberwein, Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) AöR
Dipl.-Ing. Franz Fendt, Stadtwerke München GmbH/MVG
Dipl.-Ing. Klaus Klar, Rheinbahn AG
Dipl.-Ing. Ralph Pütz, VDV Köln
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Martin Schmidt, Vestische Straßenbahnen GmbH
Dipl.-Ing. Markus Wiedemann, Stuttgarter Straßenbahnen (SSB) AG

Grafik und Produktion:

Parc Royal Werbeagentur
Adolfsallee 11, 65185 Wiesbaden

Fotos:

MAN, ESWE Verkehr, IDEAS, Vestische, VDV, SSB, PaderSprinter, BVG

Grafiken:

VDV, PE International

Genehmigt durch den Verwaltungsrat der VDV-Bussparte
(Vorsitz: VDV-Vizepräsident Dr.-Ing. Eberhard Christ)