

Alternative Antriebe für Linienbusse vor dem Hintergrund der Novelle der Clean Vehicles Directive der EU – eine ökologisch-ökonomische Gesamtbetrachtung

Ralph Pütz*, Peter Bronnenberg

siehe Autorenangaben

Abstract

Heute besteht aus Gründen der lokalen Emissionsreduzierung kein Handlungsbedarf mehr, denn die modernen, abgasnachbehandelten Euro-VI-Verbrennungsmotoren für Linienbusse weisen ein Nahe-Null-Emissionsniveau auf. Handlungsbedarf besteht somit ausschließlich hinsichtlich der Schonung fossiler Ressourcen und damit einer CO₂-Reduzierung. Jenseits der politisch propagierten Elektromobilität bietet sich dazu eine Vielzahl von zielführenden Optionen in Verbindung mit Verbrennungsmotoren an, die technologieoffen bewertet werden müssen.

Schlagwörter/Keywords:

Linienbusantriebe, Clean Vehicles Directive, Elektromobilität, E-Fuels, E-Gas, ÖPNV

1. Einführung

In allen Bereichen des Straßenverkehrs, vom Pkw über leichte bis hin zu schweren Nutzfahrzeugen, ist ein politisch propagierter Paradigmenwechsel hin zu einer Elektromobilität festzustellen. So gilt für den Linienbusbereich bei der Neubeschaffung „sauberere“ Fahrzeuge durch Behörden bzw. Betreiber von Verkehrsmitteln im Sinne der VO 1370/2007 beim Kauf, Leasing, Mietkauf und Anmietung von Kraftomnibussen und Taxis die EU-Richtlinie 2009/33/EG, die als „Clean Vehicles Directive“ oder „EU-Beschaffungsrichtlinie“ bekannt ist. Ende April 2019 wurde eine Novelle dieser Richtlinie vom Europäischen Parlament und am 13.6.2019 vom Rat der EU verabschiedet. Nach Inkrafttreten der Richtlinie, die national bis spätestens Mitte des Jahres 2021 umgesetzt werden muss, sollen bis 2026 45 Prozent der Beschaffungen aus „sauberen Fahrzeugen“ bestehen, davon die Hälfte aus „emissionsfreien Fahrzeugen“, bis 2030 sollen dann sogar 65 Prozent der Beschaffungen aus „sauberen Fahrzeugen“ bestehen. Unter „emissionsfreien Fahrzeugen“ sind in der Richtlinie nur Fahrzeuge ohne lokale Emissionen und ohne direkte Emissionen von CO₂ definiert (vgl. Abbildung 1). Ziel dieser Richtlinie ist es also explizit, dass alle Erbringer von Linienverkehr konsequent und sukzessive auf Batteriebusse (Opportunity-Charger/ Gelegenheitslader und Overnight-Charger/ Nachtlader) oder Brennstoffzellen-(Hybrid)

Busse umstellen, denn nur diese sind „am Auspuff“ wie von der Richtlinie gefordert „emissionsfrei“. Diese ausschließliche, isolierte Fokussierung auf den Fahrbetrieb und damit die völlige Ausblendung der anderen Phasen des Lebenszyklus – wie Fahrzeugproduktion und Kraftstoffbereitstellung – kann zu völlig falschen Schlüssen führen, da in allen diesen Subsystemen Energie verbraucht wird und Emissionen entstehen. So kann z.B. eine „Nullemission“ der Elektromobilität im Einsatz vor Ort durch ggf. höhere Emissionen in der Kraftstoffbereitstellung und Fahrzeugproduktion zu signifikanten ökologischen Nachteilen führen. Dadurch werden also mit der Novelle der Clean Vehicles Directive durch die EU für den Linienbusbereich völlig falsche ökologische Maßstäbe angesetzt, die die angestrebte Dekarbonisierung als politisches Ziel keinesfalls belastbar widerspiegeln.

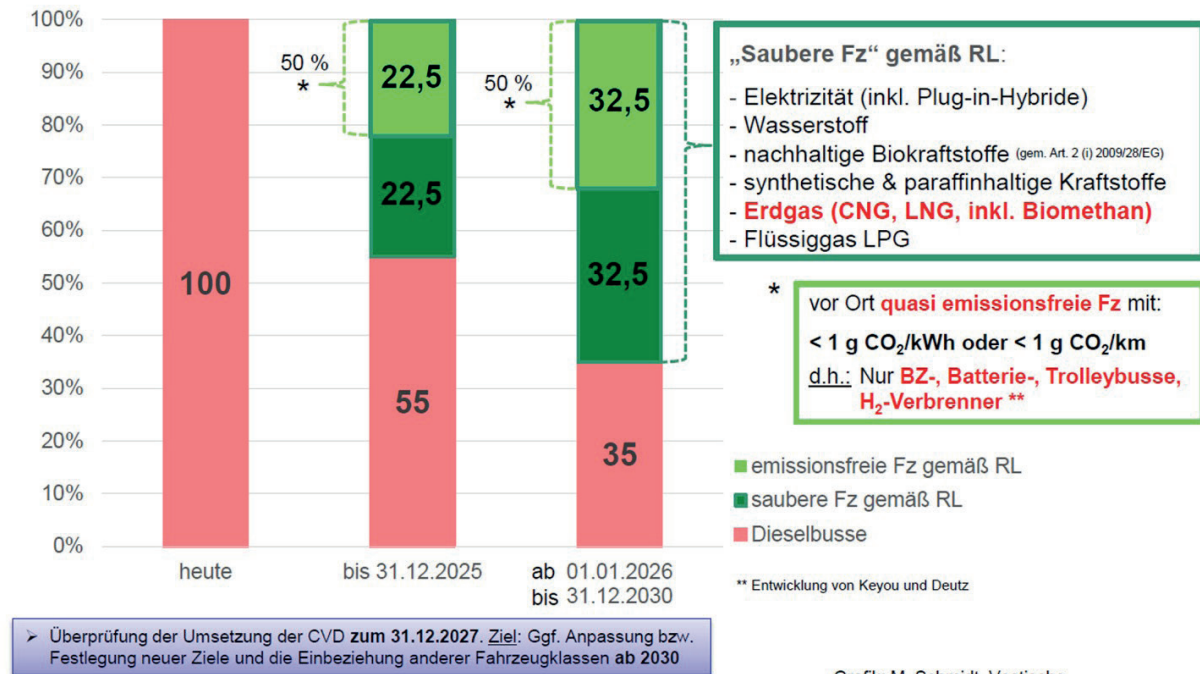
Oft wird auch ignoriert, dass in der Regel die Elektromobilität für jedes Verkehrsunternehmen und seine Randbedingungen ein individuelles System darstellt, bei dem Fahrzeug- und Antriebstechnik, Batterietyp, Energiezuführungsart/ Ladetechnik und Betriebsmuster auf die jeweilige Linientopologie exakt abgestimmt sein müssen. Die zugehörigen Analysen für geeignete Positionen der Ladeinfrastruktur in den jeweiligen Bedingebieten und eventuelle weitere Erfordernisse aufgrund z.B. lokal nicht vorhandener Mittelspannungsnetze dürfen nicht vernachlässigt werden. Die Novelle der „EU-Beschaffungsrichtlinie“ fordert zwar,

* Korrespondierender Autor.

E-Mail: ralph.puetz@belicon-forschung.de (R. Pütz)

Abbildung 1: Auswirkungen der Quotenvorgaben in der EU Clean Vehicles Directive auf die Neubeschaffung von Linienbussen**Anteil Stadtbusse des Beschaffungsloses in %:**

(Stand: 13.06.2019)



Grafik: M. Schmidt, Vestische

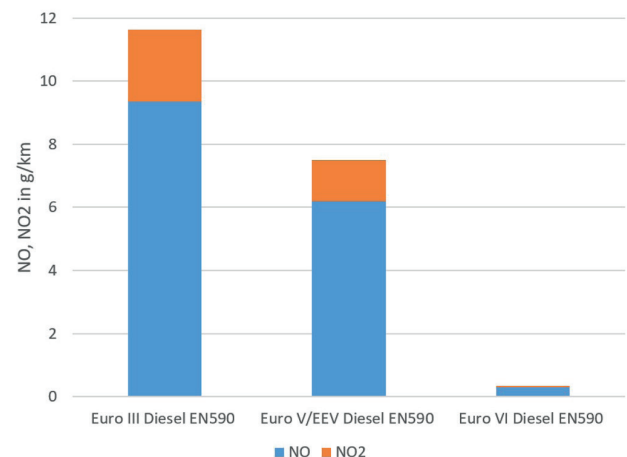
Quelle: Martin Schmidt, Herten

dass den Auftragnehmern (Verkehrsunternehmen) von den Mitgliedsstaaten ausreichende finanzielle Mittel zur Kompensation der Mehrkosten der alternativen Antriebe zur Verfügung gestellt werden müssen, jedoch sieht die „EU-Beschaffungsrichtlinie“ hier nur die Fahrzeuge, aber nicht die Infrastruktur, ihre Implikationen und damit Kosten.

Linienbusse, die im Stadtverkehr aufgrund fest vorgegebener, reproduzierbarer Linien das Potenzial eines reduzierten Aufwands für die erforderliche Energiezuführungs-Infrastruktur aufweisen, scheinen – neben Verteilerfahrzeugen – für die Einführung der Elektromobilität prädestiniert. Die Entwicklung von Elektrobussen – mit der Ausnahme des (partiell) oberleitungsgebundenen Trolley-(Hybrid-)Busses – steht jedoch noch am Anfang. Andererseits haben etablierte, konventionelle Antriebe für Linienbusse – Diesel- und Erdgasantriebe – bereits einen derart hohen Reifegrad erreicht, der bei allen Herstellern ein lokales Nahe-Null-Emissionsniveau bei vertretbarer Wirtschaftlichkeit ermöglicht (vgl. Abbildung 2). Dabei weisen einige Vertreter der Euro-VI-Population bei den emittierten kritischen Komponenten Partikel (PM, Particulate Matter; PN, Particulate Number) und Stickoxide (NO_x ; NO und NO_2) je nach Umgebungsbedingungen sogar eine geringere Konzentration auf als in der angesaugten Umgebungsluft. Folglich besteht hinsichtlich der Partikel- sowie Stickoxidemissionen – und hier insbesondere bezüglich des Reizgases NO_2 – für Linienbusse mit Verbrennungsmotor ab der Grenzwertstufe Euro

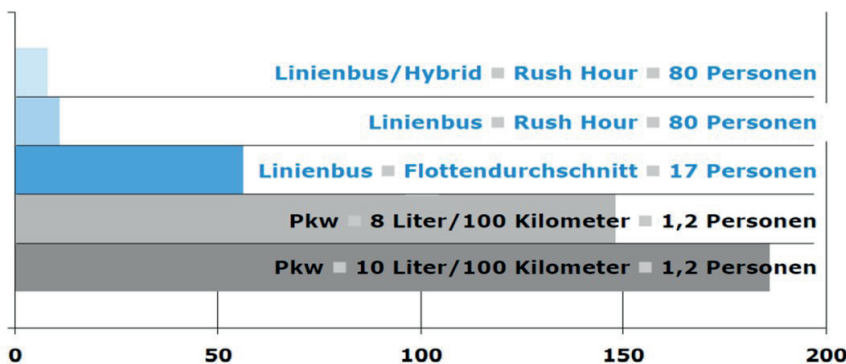
VI bereits kein akuter Handlungsbedarf mehr, auch wenn in der breiten Öffentlichkeit vielfach hier medienwirksam ein anderes Bild gezeichnet wird.

In Bezug auf die weitere Reduzierung der globalen Emissionen stellen technologische Maßnahmen im ÖPNV mit Linienbussen lediglich einen Aspekt dar – die viel größere Hebelwirkung würde durch eine forcierte Verlagerung des Verkehrs auf öffentliche Verkehrsträger erreicht (vgl. Abbildung 3). Eine „Verkehrswende“ wäre folglich unmittelbar

Abbildung 2: Stickoxidemissionen von Solo-Linienbussen unterschiedlicher Grenzwertstufen auf der Landshuter Linie 3

Quelle: BELICON/R. Pütz

Abbildung 3: Vergleich der globalen Emissionen von Pkw und Solo-Linienbussen im Stadtverkehr in Abhängigkeit des Besetzungsgrades (CO₂-Äquivalent in g/km/Fahrgast)



Quelle: VDV/R. Pütz

umsetzbar – auch mit hochsignifikanten Vorteilen beim Flächenverbrauch, jedoch wird politisch auf die viel langsamer umsetzbare „Antriebswende“ fokussiert.

Aktuell herrscht angesichts der Novelle der EU-Beschaffungsrichtlinie in vielen deutschen Verkehrsunternehmen große Verunsicherung, welche Antriebstechnologie kurz- und mittelfristig für die Linienbus-Fahrzeugneubeschaffung aus ökologisch-ökonomischen Erwägungen das Optimum bietet oder überhaupt noch in Frage kommt. Jede Verbesserung der lokalen und globalen Emissionen sowie hinsichtlich der Ressourcenschonung muss im liberalisierten Verkehrsmarkt jedoch auch wirtschaftlich umsetzbar sein. Deshalb soll nachfolgend auf der Basis der Randbedingungen eines mittleren ÖPNV-Verkehrsunternehmens, das sowohl Stadt- als auch Vorort- bzw. Überlandverkehr betreibt, ein Vergleich der etablierten, konventionellen verbrennungsmotorischen Antriebe für Linienbusse mit den alternativen Antriebstechnologien des Spektrums Elektromobilität erfolgen und auch ein Ausblick auf die weitere, mittelfristige Entwicklung gewagt werden. Das zugrunde gelegte, beispielhafte Unternehmen betreibt rund 200 Linienbusse mit einer mittleren Zyklusgeschwindigkeit von ca. 22 km/h mit den Extrema 18 km/h auf Linien des Stadtverkehrs und bis hin zu 34 km/h im Regionalverkehr. Die mittlere jährliche Fahrstrecke je Bus beträgt rund 50.000 km.

Für eine umfassende ökologische und ökonomische Bewertung von Fahrzeugflotten müssen alle Stationen des Lebenszyklus von Linienbusverkehrssystemen wie

- Fahrzeugproduktion (und ggf. Verwertung und Entsorgung),
- Kraftstoffbereitstellung (Well-to-Tank; WTT),
- Fahrbetrieb (Tank-to-Wheel; TTW) und
- Instandhaltung

in die Analyse einbezogen werden, da wie erwähnt die *isolierte Betrachtung nur des eigentlichen Fahrbetriebs* – wie in der *Clean Vehicles Directive* – zu völlig falschen Schlüssen führen kann. Erst auf diese Weise können im engen Kontext einer „ganzheitlichen“ ökologischen Integrität zielführende Lösungsansätze für Linienbusverkehrssysteme mit sowohl

geringen lokalen als auch globalen Emissionen bei hoher Energieeffizienz und reduzierten Geräuschen systembezogen identifiziert werden. Bei der Analyse der Emissionen stehen als *lokal* wirksame Hauptkriterien die Partikel- und Stickoxid-Emissionen und als *global* wirksame Hauptkriterien die CO₂-Emissionen bzw. das CO₂-Äquivalent im Vordergrund, deren Wirkungen über die Bestimmung der externen Kosten als *ökologisches Profil* einer Antriebstechnik zusammengefasst werden können. Bei der ökonomischen Analyse erfolgt die Fokussierung auf die „Fahrzeugkosten“, die aus Kapitaldienst, Kraftstoff/Energiekosten und Instandhaltungskosten gebildet werden, ergänzt durch die Kosten für die Energiezuführungsinfrastruktur.

Linienbusse mit konventionellem, verbrennungsmotorischem Antrieb machen heute immer noch rund 98 Prozent der deutschen Linienbusflotte aus und können unter bestimmten Voraussetzungen als „saubere Fahrzeuge“ noch mit bestimmten Quoten beschafft werden. Gemäß der „EU-Beschaffungsrichtlinie“ sind dabei zukünftig nur noch Linienbusse mit den etablierten, lokal hoch sauberen Dieselmotor dann zulässig, wenn dieser mit nachhaltigen Biokraftstoffen oder synthetischen Kraftstoffen (xtL-Kraftstoffen) betrieben wird. So wären also neben den aus regenerativem Strom erzeugten „E-Fuels“ (erneuerbare Flüssigkraftstoffe aus Strom; Power-to-Liquids) auch GtL (Gas-to-Liquids; aus Erdgas) und sogar CtL (Coal-to-Liquids; aus Kohle) zulässig, letzteres völlig ungeachtet seiner hohen CO₂-Intensität und damit signifikanten Verschlechterung der CO₂-Bilanz gegenüber fossilem Dieselmotor. Ferner sind Gasmotoren mit Erdgas (CNG, LNG oder regenerativ erzeugtem Biogas) sowie Flüssiggas (LPG; Liquefied Petroleumgas) als „saubere Fahrzeuge“ zulässig. Dabei ist eine Mild-Hybridisierung durch Einsatz von sogenannten Rekuperationsmodulen mit 48-V-Bordnetz bereits heute als Serienstandard verfügbar. Ebenso gelten neben den genannten Konzepten mit ausschließlich Verbrennungsmotoren auch alle Plug-in-Hybride als „saubere Fahrzeuge“, wobei jedoch zu erwarten ist, dass mittel- bis langfristig die Quoten für „emissionsfreie Fahrzeuge“ signifikant ansteigen werden. Dazu zählen neben der

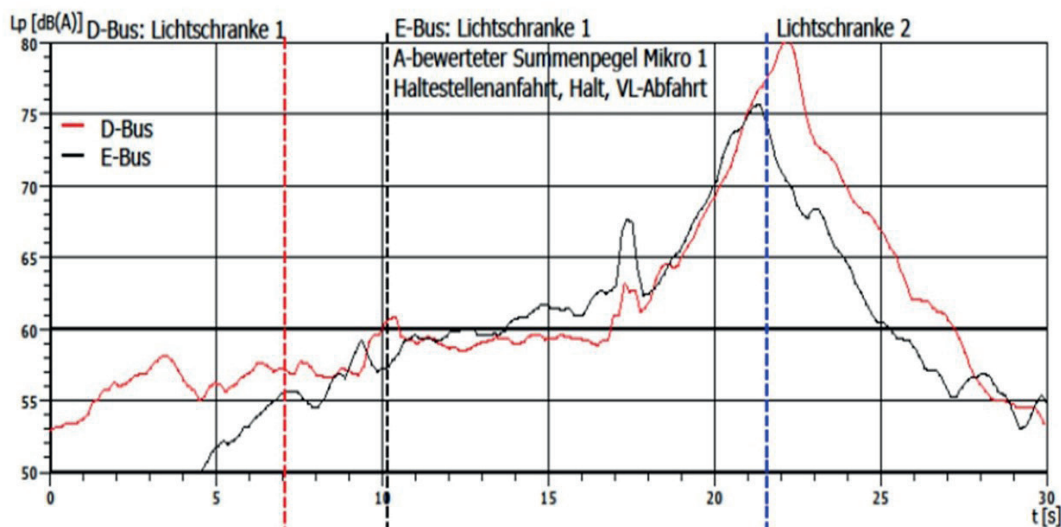
Batterie- und Trolleybus-Elektromobilität die Optionen der Wasserstofftechnik wie Busse mit Brennstoffzellen-(Hybrid-) und Wasserstoff-Ottomotor-Antrieben. Zurzeit ist bei Wasserstoff-Ottomotoren jedoch nur ein Anbieter auf dem deutschen Markt aktiv.

Trotz zahlreicher Pilotprojekte und Praxiserprobungen von Verkehrsunternehmen mit alternativen Antrieben, die in der Regel national von den Ministerien BMVI, BMU und BMWI sowie international durch EU-Förderprojekte (z.B. ZeEUS, Zero Emission Electric Urban Bus System und ELIP-TIC, Electrification of Public Transport in Cities) finanziert und medienwirksam präsentiert werden, ist der prozentuelle Anteil an alternativen Antrieben in der deutschen Linienbusflotte noch vernachlässigbar gering (Anteil kleiner zwei Prozent der Linienbusflotte). Dabei wird mittelfristig auch nach Bewertung der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) und der „Batterie-Roadmap 2050“ weiterhin die Li-Ionentechnik der 2. und 3. Generation eingesetzt werden. Erst die Post-Li-Ionen-Technologie, deren Einführung nach 2030/2035 erwartet wird, dürfte zu signifikanten Effizienzsteigerungen führen. Aktuell wird bei Li-Ionen-Batterien die schnellladefähige, aber reichweitenlimitierte NMC-(Nickel-Mangan-Kobalt) Technologie für Opportunity-Charger favorisiert, während für Overnight-Charger die reichweitenoptimierte, aber nur mit Langsamladung betreibbare Festkörperbatterietechnologie LMP (Lithium-Metall-Polymer) als zielführend angesehen wird. Ob sich langfristig die „Post-Li-Ionen-Technologie“ Li-S, Li-Luft etc. durchsetzen wird, ist heute nicht absehbar.

Auch wenn heute der Einsatz alternativer Antriebstechnologien im deutschen ÖPNV, insbesondere von Batterie- und Brennstoffzellenbussen, noch sehr begrenzt ist, wird durch die „EU-Beschaffungsrichtlinie“ und mit der Annäherung an eine betriebliche Serienreife dieser Technologien deren Ein-

satz zukünftig weiter forciert werden. Kleinere und mittlere Verkehrsunternehmen unterhalb einer Flottengröße von 200 Bussen dürften von einem sehr breiten Einsatz angesichts der heute noch i.d.R. signifikant reduzierten Verfügbarkeiten des Gesamtsystems (inklusive der Energiezuführungs-Infrastruktur) überfordert sein, da mit Ausnahme der Unternehmen mit Straßenbahnen auch die Personal-Qualifikationsstruktur hier unzureichend ist. In den kleineren und mittleren Unternehmen beschränkt sich der Einsatz alternativer Antriebe sinnvollerweise allenfalls auf Einzelfahrzeuge oder Kleinstflotten, um Erfahrungen mit der Elektromobilität zu sammeln. Daher wäre eine nationale Umsetzung der Clean Vehicles Directive mit der Maßgabe, dass die vorgegebenen Quoten nicht für alle Verkehrsbetriebe bis hinunter zum Kleinstbetrieb gelten, sondern ausschließlich auf die großen Verkehrsunternehmen entfallen, die dann die nationalen Quoten für die Branche erfüllen, absolut zielführend. Ein wichtiger umweltrelevanter Vorteil aller Elektrobuskonzepte und insbesondere in den vom Verkehr hoch belasteten Metropolen sind die im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Antrieben reduzierten Geräuschemissionen. Praxismessungen des Instituts BELICON belegen, dass beim Verlassen der Haltestelle Elektrobusse um rund 5 dB(A) reduzierte Schalldruckpegel gegenüber Dieselnissen aufweisen (vgl. *Abbildung 4*). Für eine quantifizierte Beurteilung der Umweltwirkungen aufgrund der Schallemissionen fehlt bislang allerdings eine gesetzliche Grundlage anhand z.B. externer Kosten wie bei Schadstoffemissionen (siehe EU-Beschaffungsrichtlinie 2009/33/EG). Dazu müssten jedoch nicht alleine die Schalldruckpegel, sondern diese auch mit Bezug auf die jeweiligen Frequenzen, begutachtet werden. Deshalb unterbleibt nachfolgend eine Bewertung der Geräuschemissionen.

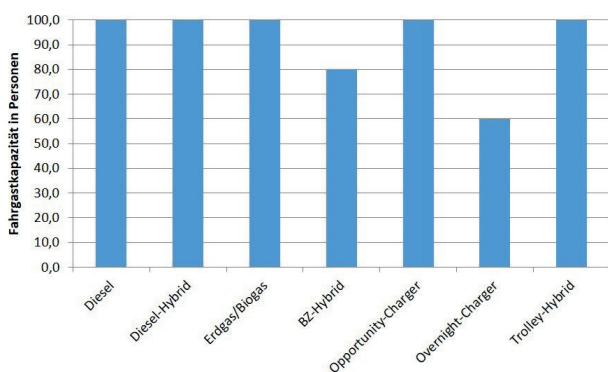
Abbildung 4: Außengeräusch bei Haltestellenanfahrt (A-bewerteter Summenpegel): Vorteile für E-Busse



Quelle: BELICON/R. Pütz

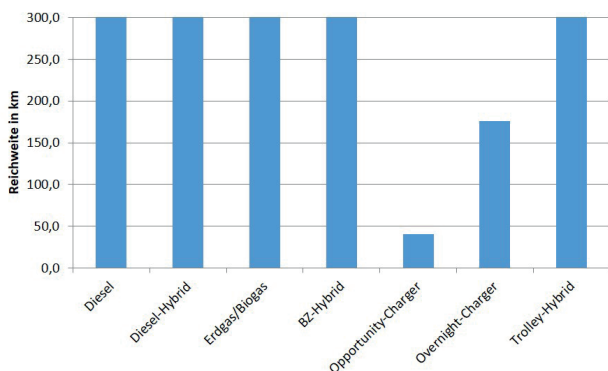
Neben den ökonomischen Parametern auf der Basis der Fahrzeugkosten (Kapitaldienst, Kraftstoff- und Instandhaltungskosten) sowie Infrastrukturkosten wird die Wirtschaftlichkeit auch durch betriebliche Parameter beeinflusst. So weisen z.B. Overnight-Charger-Batteriebusse, die im Solobus Batteriekapazitäten von über 300 kWh besitzen, aufgrund der großen Batteriegewichte geringere Fahrgastkapazitäten als konventionelle Busse mit Verbrennungsmotor auf. Dies bedeutet, dass zum Ersatz eines konventionellen Busses in der Morgenspitze zwei Batteriebusse eingesetzt werden müssten (vgl. *Abbildung 5*). Des Weiteren wird im Winter und Sommer, wenn forciert Heizenergie bzw. Energie zum Betrieb der Klimaanlage aus der limitierten Energiekapazität der Batterie geliefert werden muss, die geforderte Tagesfahrstrecke von mehr als 300 km nicht erreicht, so dass aufgrund langer Ladezeiten auch hier zwei Batteriebusse einen konventionellen Bus ersetzen müssen (vgl. *Abbildung 6*). Die Kombination dieser Einflüsse, z.B. Morgenspitze im Winter, verstärkt die Problematik weiter signifikant. Die anderen Optionen des Spektrums Elektromobilität weisen derart ausgeprägte Einschränkungen in der Fahrgastkapazität und in den Ladezeiten (Energiezuführung) nicht auf. Beim Opportunity-Charger können sich jedoch bei Ausfall einer der Ladestationen Beeinträchtigungen des gesamten Betriebsablaufs ergeben. Dies gilt auch bei Verspätungen und Zugriff mehrerer Linien auf eine Ladestation.

Abbildung 5: Fahrgastkapazität von Solo-Linienbussen nach Antriebssystem



Quelle: BELICON/R. Pütz

Abbildung 6: Reichweite von Solo-Linienbussen nach Antriebssystem (gefordert: >300 km pro Tag)



Quelle: BELICON/R. Pütz

2. Ökologische Analyse – „heute“ und „mittelfristig“

Die *ökologische Gesamtbewertung* erfolgt hier gemäß der „EU-Beschaffungsrichtlinie“ anhand der Summierung der externen Kosten aus den lokalen und globalen Emissionen aller Subsysteme (Kraftstoffvorkette, Fahrzeugproduktion, Fahrbetrieb) und charakterisiert somit in der Summe die Umweltrelevanz der untersuchten Antriebsvarianten zum jeweiligen Stand der Technik auf den Zeithorizonten „heute“ und „mittelfristig“ (in zehn Jahren). Die Analyse bezieht sich exemplarisch auf Solobusse.

Die Bereitstellung von EN590-Dieselmotorkraftstoff (als Referenz) erfolgt dabei auf Basis eines Mixes aus konventionellem Rohöl (heute dominierend), unkonventionellem Rohöl sowie aus Kohle (Coal-to-Liquid) und Erdgas (Gas-to-Liquid). Zukünftig wird die Bereitstellung von Dieselmotorkraftstoff aus Ölsanden und Ölschiefer eine größere Bedeutung erlangen. Dies ist nachfolgend im Mix für den Zeithorizont „mittelfristig“ berücksichtigt. Als Pfad für GtL dienen Daten von Shell und Oryx. Die Bereitstellung von Erdgas erfolgt auf Basis eines Mixes aus unterschiedlichen Herkunftsländern. Dabei weist die Erdgasbereitstellung aus Russland und Katar die höchsten Treibhausgasemissionen auf, jene aus den Niederlanden, Norwegen, Großbritannien und Deutschland hingegen vergleichsweise geringe. Die Emission von globalen und lokalen Emissionen für die Bereitstellung von Erdgas für Deutschland auf dem Zeithorizont „mittelfristig“ basieren nachfolgend auf dem aktuellen EU-Mix sowie der Annahme, dass in zehn Jahren ein Anteil von rund 11 Prozent an Erdgas aus noch größerer Transportentfernung von den Erdgasfeldern (7.000 km) und 5 Prozent an Biogas mit einer 90,42-prozentigen CO₂-Reduzierung (auf der Basis der Angaben der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2017) enthalten sind. Je nach Genese verändern sich die Stickoxidemissionen des Bereitstellungspfades für Biogas gegenüber fossilem Erdgas in einer enormen Bandbreite, so dass nachfolgend Worst Case-Werte Anwendung finden. Diesen steht die genannte, hochsignifikante CO₂-Reduzierung von 90,42 Prozent durch Biogas aus Abfällen entgegen.

Für die Bereitstellung von komprimiertem Wasserstoff (Compressed Gaseous H₂, CGH₂) wird ein Mix aus Erdgasdampfpreformierung (heute dominierend) und Elektrolyse mit erneuerbarem Strom angesetzt. In beiden Fällen wird vorausgesetzt, dass der Wasserstoff vor Ort an der Tankstelle produziert wird, da eine zentrale, großtechnische Elektrolyse-Infrastruktur nicht vorhanden ist und eine immense Investition erforderte, die nur die Bundespolitik durch strategische Entscheidung mit nachfolgender massiver Förderung initiieren kann, was heute aber noch nicht absehbar ist. Für den Zeithorizont „mittelfristig“ wird eine Wasserstoffherkunft zu 50 Prozent aus erneuerbarem Strom angesetzt. Für die Zusammensetzung des deutschen Strom-Mixes in zehn Jahren wird für Deutschland ein Stromverbrauch aus Solar- und Windenergie von rund 50 Prozent angesetzt. Laut dem Pariser Klimaschutzabkommen wurde von der EU über

alle Sektoren insgesamt eine CO₂-Reduzierung um 28 Prozent bis 2021 zugesagt. Zum Vergleich war in Deutschland bis zum Jahr 2015 eine Reduzierung um 27 Prozent zu verzeichnen, was weit unter der Zielsetzung lag. Die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors will Deutschland im Vergleich zum Jahr 1990 bis zum Jahr 2030 um 42 Prozent senken – bis zum Jahr 2050 gar um 80 bis 95 Prozent. Die Erreichbarkeit dieses Ziels ist angesichts der Unwägbarkeiten eines gleichzeitigen Atom- und Kohleausstiegs mit ungewissen Importquoten an regenerativem Strom indes sehr fraglich.

Zur Bestimmung der Umweltwirkungen der Buserstellung werden eventuelle Migrationen hin zu „Purpose-Design“-Elektrofahrzeugen, die der Autor durchaus als zielführend erachtet, aufgrund von fehlenden Indizien in diese Richtung aus der Industrie nicht berücksichtigt. Hierfür wäre eine grundlegende Änderung der Fertigungsstrukturen erforderlich. Bei der ökonomischen Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die essentiellen Rohstoffe Lithium und Kobalt für ein schnelles, weltweites Wachstum der Elektromobilität ausreichend vorhanden sind. Temporäre Engpässe an Lithium und Kobalt bleiben wegen der in der Literatur sehr heterogenen Bewertungen hier unberücksichtigt.

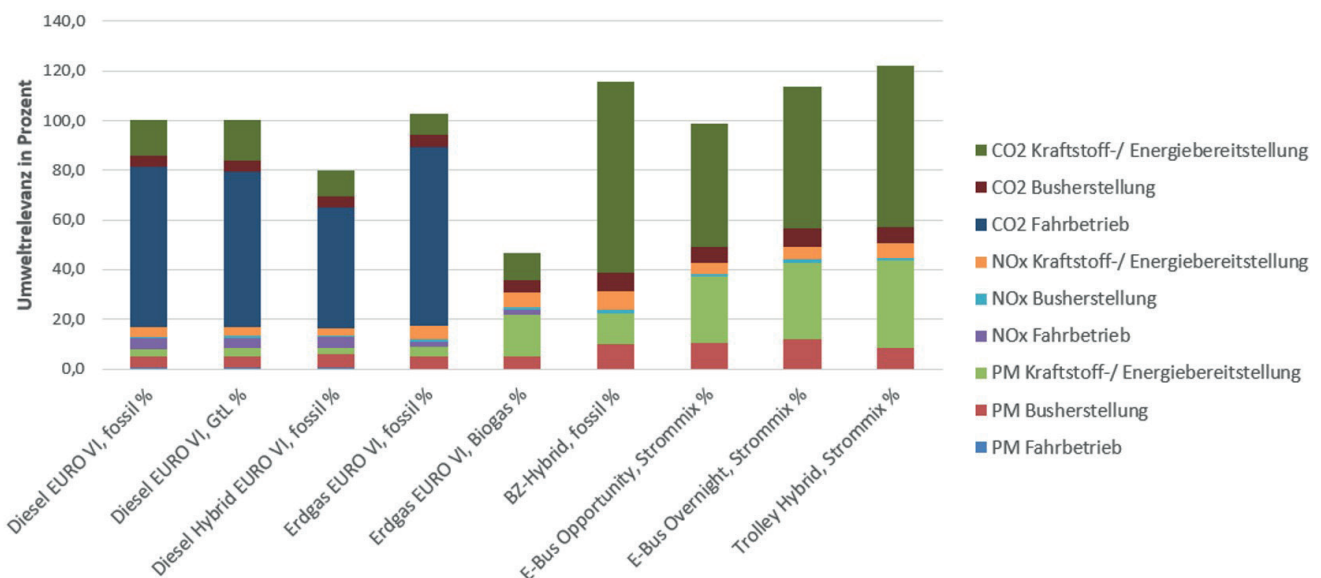
Das Datengut für die Emissionen im realen Fahrbetrieb auf den Linien basiert nachfolgend auf den umfangreichen PEMS-Messungen (Portable Emission Measurements) des Instituts BELICON an Solobussen für unterschiedliche Linientopologien unter Einbeziehung des Energieverbrauchs für Heizung/Klimatisierung. Bei der Erdgasbus-Variante wurde aufgrund heterogener Verbrauchswerte der aktuelle Benchmarksetter angesetzt. Oftmals wird für die Versionen der Elektromobilität lediglich der Energieverbrauch für die Traktion genannt, der bei Solobussen für SORT-2-Charakteristik

in der Ebene bei etwa 1,0 kWh/km liegt. Der Heizenergiebedarf wird dabei i.d.R. unzulässigerweise vernachlässigt. Die für die Batteriebusoptionen zugrunde gelegten Verbrauchswerte beruhen auf Praxismessungen des Instituts BELICON zu allen Jahreszeiten und sind als Mittelwerte berücksichtigt worden. Für den Zeithorizont „mittelfristig“ wurde für die verbrennungsmotorischen Antriebe (Diesel- und Erdgasmotoren) eine Mild-Hybridisierung als Serienstand mit einer durchschnittlichen weiteren Verbrauchsreduzierung um 10 Prozent angenommen, während für die alternativen Antriebe des Spektrums Elektromobilität bereits für den Zeithorizont „heute“ nach den Erfahrungen des Instituts BELICON eine mittlere Rekuperationsrate von 25 Prozent über das gesamte Einsatzjahr unterstellt wurde.

Die ökologische *Gesamtbewertung* für den Zeithorizont „heute“ weist aus, dass für eine umfassende Nachhaltigkeit – unter Berücksichtigung lokaler und globaler Emissionen sowie des Energieverbrauchs – bei den verglichenen Varianten heute keine nennenswerten Verbesserungen durch die in der Clean Vehicles Directive als „emissionsfrei“ definierten Antriebsvarianten des Spektrums Elektromobilität gegenüber dem nicht mehr als „sauber“ deklarierten Dieselantrieb erreicht werden (vgl. Abbildung 7). Auch die in der Beschaffungsrichtlinie als „sauber“ definierten Optionen des Dieselantriebs in Verbindung mit GtL und des Erdgasantriebs mit fossilem Erdgas bilden keine ökologischen Verbesserungen gegenüber dem Euro-VI-Dieselantrieb mit konventionellem EN590-Dieselmotorkraftstoff.

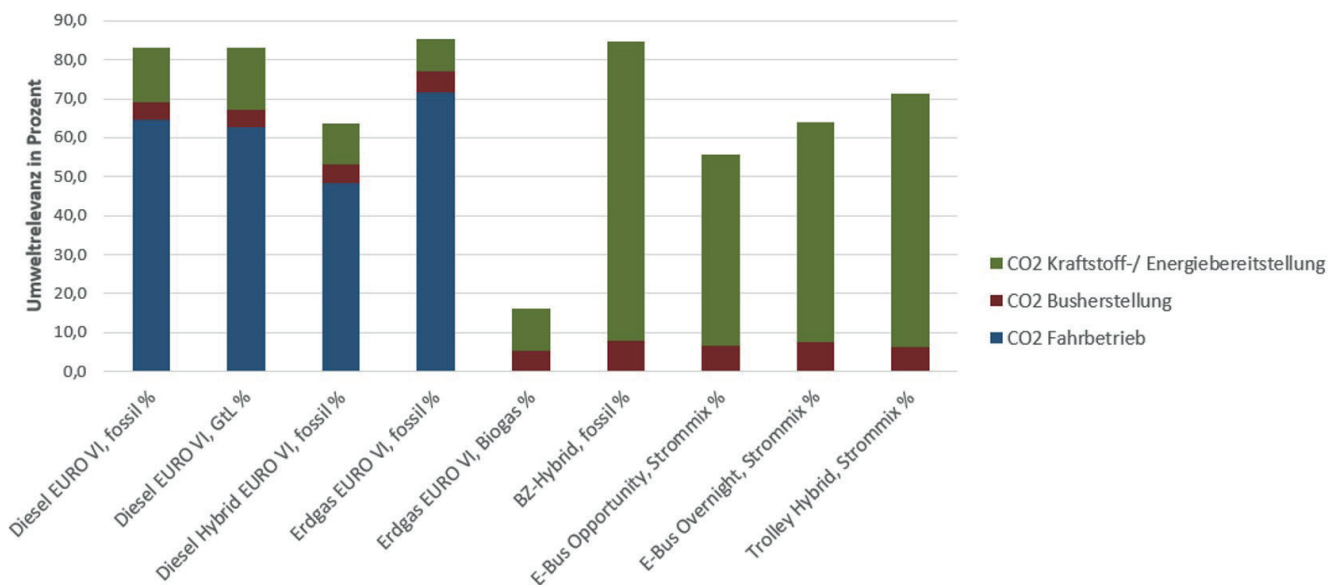
Zeitnah ökologische Verbesserungen böten indes der Einsatz von Full-Hybrid-Dieselmotoren (laut Beschaffungsrichtlinie aber nur in Form von Plug-in-Hybriden „sauber“) sowie die Verwendung von Biogas. Der Autor merkt aufgrund der

Abbildung 7: Systembezogene Umweltrelevanz „heute“ anhand externer Kosten gemäß 2009/33/EG für Solobusse unter mittleren ÖPNV-Randbedingungen im gesamten Lebenszyklus (12 Jahre)



Quelle: BELICON/R. Pütz

Abbildung 8: Systembezogene globale Umweltrelevanz „heute“ anhand externer Kosten gemäß 2009/33/EG für Solobusse unter mittleren ÖPNV-Randbedingungen im gesamten Lebenszyklus (12 Jahre)



Quelle: BELICON/R. Pütz

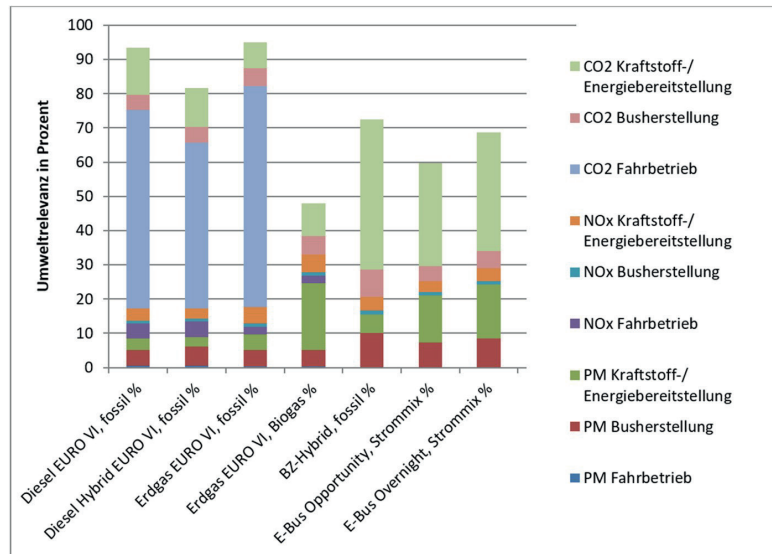
Messergebnisse seines Instituts BELICON jedoch an, dass die Energieeinsparungen bei Hybridbussen eine enorme Schwankungsbreite über alle Hersteller von 5 bis 31 Prozent aufweisen. Beim heute bereits möglichen Einsatz von 100 Prozent Biogas (CO₂-Minderungspotenzial >90 Prozent) wäre die Erdgastechnik in Verbindung mit Euro-VI-CNG-Antrieben heute die sauberste verfügbare Antriebstechnik, gilt aber trotz der für deutsche Verhältnisse signifikanten ökologischen Verbesserungen gegenüber den „emissionsfreien“ Optionen der Elektromobilität nicht als „emissionsfrei“. Die in Abbildung 7 dargestellten Ergebnisse sollten die politischen Entscheider in Deutschland bei der Umsetzung der Clean Vehicles Directive überzeugen, dass heute komplett mit Biogas aus Abfällen betriebene ÖPNV-Erdgasbusflotten wie in Augsburg, Gießen und Oldenburg, die zu den saubersten Busflotten Deutschlands zählen, langfristig bei der Option Biogas bleiben dürfen, ohne parallel eine weitere Technologie nebst Infrastruktur zwangsweise einführen zu müssen. Zwei unterschiedliche Antriebstechnologien sind für einen Verkehrsbetrieb parallel kaum tragbar.

Weitere Optionen wie der Einsatz biogener synthetischer Dieselmotoren (BtL) oder aus ausschließlich regenerativem Strom über den Zwischenschritt Wasserelektrolyse hergestellte E-Fuels (Power-to-Liquids; PtL) und E-Gase (Power-to-Gases; PtG) böten weiteres ökologisches Potenzial, das künftig aktiv erschlossen werden sollte und muss. Während biogene Kraftstoffe der 2. und 3. Generation für die Dieselmotoren aktuell (und wohl auch mittelfristig) nur in geringen Mengen verfügbar sind, könnten PtL und PtG langfristig eine Marktrelevanz erreichen. Vorteilhaft wäre hier, dass die bestehenden Energie-Verteilungs- und Betankungsinfrastrukturen beibehalten werden können.

Die ökologische Bewertung ausschließlich der *global wirksamen Emissionen* für den Zeithorizont heute zeigt eine Dominanz der globalen Emissionen mit bis zu über 80 Prozent am gesamten ökologischen Profil (externe Kosten). Bezogen auf die globalen Emissionen wären heute bereits Verbesserungen durch die alternativen Antriebsvarianten der Elektromobilität gegenüber den konventionellen verbrennungsmotorischen Antrieben erreichbar, jedoch nicht unbedingt gegenüber dem Diesel-Hybridbus. Die konkurrenzlos CO₂-günstigste Option ist der Einsatz von Biogas im CNG-Euro-VI-Antrieb (vgl. Abbildung 8).

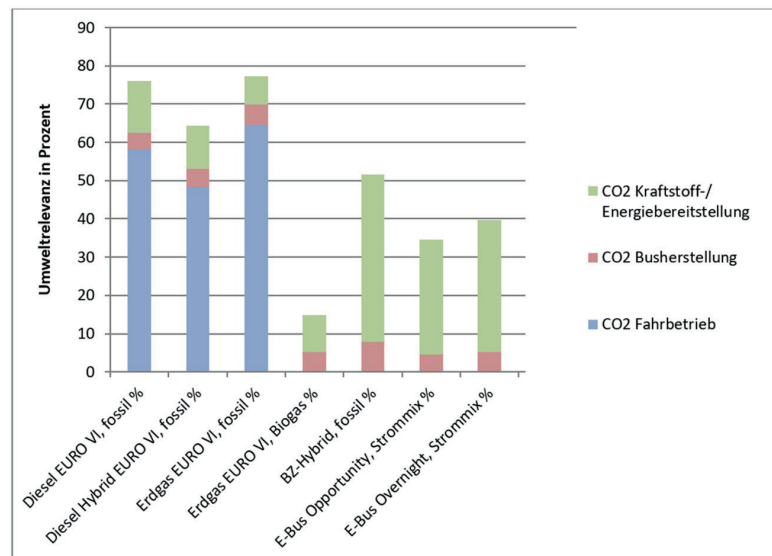
Die *ökologische Gesamtbewertung* für den Zeithorizont „mittelfristig“ der verglichenen Varianten unter mittleren ÖPNV-Randbedingungen weist aus, dass die Umweltprofile der alternativen Technologien des Spektrums Elektromobilität signifikante Vorteile gegenüber jenen der konventionellen Antriebe erreichen können, wenn sich die hohen, politisch erwarteten Reduktionsziele (z.B. Anteil regenerativer Energien) auch tatsächlich einstellen werden (vgl. Abbildung 9). Die Option GtL wurde aufgrund des vergleichsweise marginalen Einflusses nicht mehr betrachtet. Die ökologische Bewertung ausschließlich der *global wirksamen Emissionen* für den Zeithorizont „mittelfristig“ zeigt hochsignifikante Verbesserungen durch alternative Antriebsvarianten des Spektrums Elektromobilität gegenüber den konventionellen verbrennungsmotorischen Antrieben. Die Erdgastechnik mit Biogas böte bei den globalen Emissionen auch „mittelfristig“ weiterhin die beste ökologische Option (vgl. Abbildung 10).

Abbildung 9: Systembezogene Umweltrelevanz „mittelfristig“ anhand externer Kosten gemäß 2009/33/EG für Solobusse unter mittleren ÖPNV-Randbedingungen im gesamten Lebenszyklus (12 Jahre)



Quelle: BELICON/R. Pütz

Abbildung 10: Systembezogene globale Umweltrelevanz „mittelfristig“ anhand externer Kosten gemäß 2009/33/EG für Solobusse unter mittleren ÖPNV-Randbedingungen im gesamten Lebenszyklus (12 Jahre)



Quelle: BELICON/R. Pütz

3. Ökonomische Analyse – „heute“ und „mittelfristig“

Die ökonomische Analyse der derzeit diskutierten alternativen Antriebskonzepte der Elektromobilität im Vergleich zum Euro-VI-Diesel- als Referenz unter den Randbedingungen eines mittleren ÖPNV-Betriebes erfolgt ebenfalls auf der Fahrzeug-Basis Solobus. Die Kosten je Bus-Kilometer setzen sich dabei zusammen aus:

- Fahrzeug-Kapitaldienst;
- Ersatzinvestitionen (z.B. für einen während der Lebenszeit des Busses notwendigen Batteriewechsel);
- Kraftstoffe bzw. Energie;
- Instandhaltung;

- Infrastruktur-Mehrkosten gegenüber Dieselbetrieb (hier nur exemplarisch darstellbar).

Es wird ein Linienbus in üblicher Vollausrüstung als Basis angesetzt. Dabei werden für die Optionen des Spektrums Elektromobilität während der betrieblichen Nutzungsdauer von 12 Jahren eine zweite Batterie bzw. eine zweite Brennstoffzelle angesetzt, da aktuelle Erfahrungen hinsichtlich der Garantien der Elektrobushersteller darauf hindeuten. Für Diesel-Full-Hybride werden heute mittlere Investitionsmehrkosten von 90.000 € angesetzt, für Erdgasbusse 40.000 €. Für einen Opportunity-Charger mit einer 70-kWh-Batterie wird ein Mehrpreis von rund 170.000 €, für einen Over-

night-Charger mit 350-kWh-Batterie ein Mehrpreis von rund 450.000 €, jeweils inklusive zweiter Batterie, angesetzt. Für den Zeithorizont „mittelfristig“ werden jedoch erwartungsgemäß *hochsignifikante Investkosten-Senkungen bei allen alternativen Antrieben*, insbesondere des Spektrums Elektromobilität, angesetzt.

Für die Entwicklung der Kraftstoffpreise wurden Abschätzungen gemäß IFEU/BELICON, 2015, der Energiereferenzprognose von 2014 und A. Schulz, Diss. 2015 sowie auf der Basis weiterer wissenschaftlicher Veröffentlichungen und Angaben der Energieunternehmen angesetzt. Demnach ist mittelfristig ein signifikanter Anstieg der Kraftstoffpreise bei allen Energieträgern, mit der Ausnahme von Wasserstoff, zu erwarten. Durch die Entkoppelung von Erdgas- und Dieselpreis und die Erschließung weiterer Erdgasfelder ist der Preisanstieg beim Erdgas geringer. Die *Instandhaltungskosten* sind einerseits von den *Personalkosten*, abhängig von den Personalkennzahlen und den durchschnittlichen Jahresgehalten (hier werden übliche Lohnkosten von rund 50.000 €/a angenommen) sowie den *Materialkosten* abhängig.

Da fast alle Busverkehrsunternehmen über eine Diesel-Betankungsinfrastruktur auf den Betriebshöfen verfügen, müssen bei einem Wechsel auf eine andere Antriebstechnik noch die Infrastrukturkosten für die Energiezuführung kalkuliert werden. Die Infrastrukturkosten für alternative Antriebe sind neben der Flottengröße jedoch hochsignifikant von den lokalen Gegebenheiten sowie dem Betriebsmuster und dem Liniennetz abhängig („Elektromobilität als System“). Für einen *Schnellladepunkt* beim Opportunity-Charger (GL) werden z.B. Kosten in Höhe von 250.000 € angenommen.

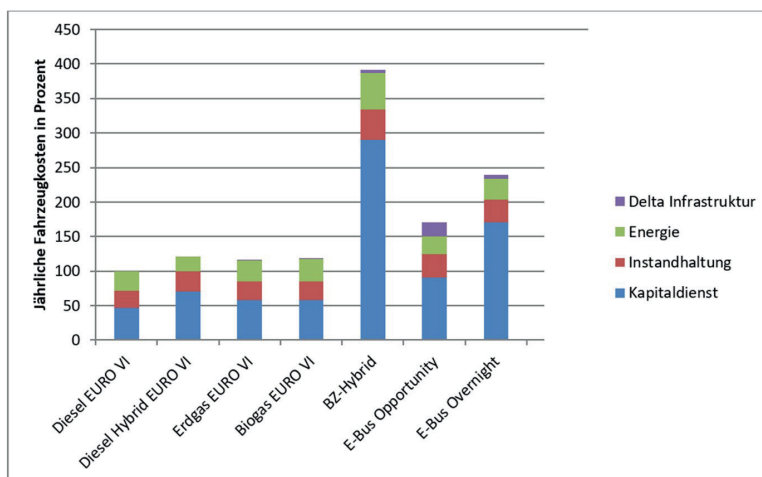
Die *ökonomische Gesamtbewertung* (inklusive Infrastruktur) für den Zeithorizont „heute“ bei einer Abschreibungsdauer von 9 Jahren ist in *Abbildung 11* dargestellt. Ohne Berücksichtigung der üppigen Anschubfinanzierung des Bundesumweltministeriums für Elektrobusse inklusive de-

ren Infrastruktur lägen die Optionen der Elektromobilität heute noch weit hinter einer Wirtschaftlichkeit zurück.

Für die ökonomische Bewertung für den Zeithorizont „mittelfristig“ wird die prognostizierte Entwicklung der Kraftstoffpreise angenommen, in den Investkosten für die Elektromobilität ebenso die prophezeite, signifikante Kostendegression der Energiespeicher, jedoch weiterhin noch eine Ersatzbatterie über die 12- (bis 17-)jährige betriebliche Einsatzdauer beim (ersten) Betreiber. Heute ist davon auszugehen, dass die Lebensdauer der Batterien beim durchschnittlichen ÖPNV-Einsatz kaum mehr als ein „halbes Busleben“ (Spannbreite etwa 5 bis 7 Jahre) erreicht. Für die Brennstoffzellen (BZ)-Technik ist „mittelfristig“ ebenfalls eine signifikante Kostendegression angenommen. Daraus folgt die in *Abbildung 12* dargestellte *ökonomische Gesamtbewertung* für den Zeithorizont „mittelfristig“, wobei dann bei den alternativen Konzepten der Elektromobilität (Batterie- und BZ-Technik) auf diesem Zeithorizont eine erreichte betriebliche Serienreife unterstellt wird. Außerdem wird dann die Energiezuführungsinfrastruktur als bereits vorhanden unterstellt.

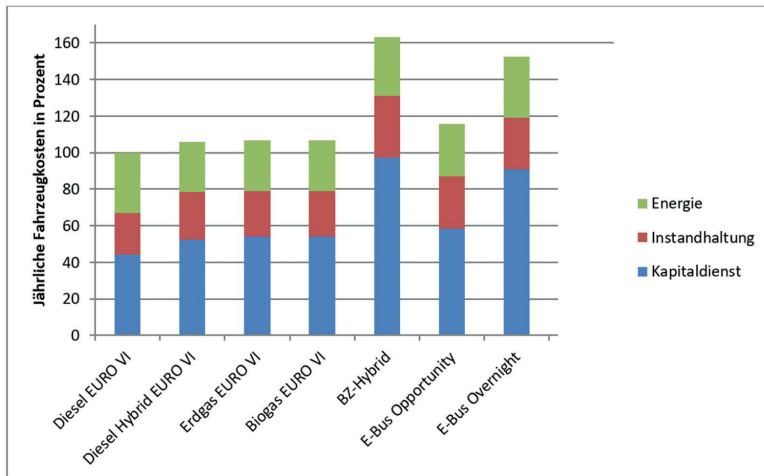
Es ist ersichtlich, dass „mittelfristig“ Elektrobusse – insbesondere wegen der anzunehmenden Steigerung der Energiepreise für die fossilen Kraftstoffe Diesel und Erdgas sowie der Reduktion der Batterie- und BZ-Kosten und trotz steigender Strompreise – sich wirtschaftlich an die konventionellen Antriebe immer weiter annähern werden. Die Wirtschaftlichkeit der etablierten, hochsauberen Konzepte mit Verbrennungsmotor wird jedoch auch mittelfristig von den Optionen der Elektromobilität für die Gegebenheiten der meisten ÖPNV-Unternehmen nicht erreicht werden. Weiter über dem Niveau der Diesel- und Diesel-Hybrid-Technik werden auch die Fahrzeugkosten der Erdgas-/ Biogastechnik liegen (+7 Prozent gegenüber dem Dieselantrieb). Mit der mittelfristig noch dominierenden, heutigen Li-Ionen-Batterietechnik wird ein Betrieb von Elektrobusen wie bei Bus-

Abbildung 11: Relativer Kostenvergleich der Antriebstechnologien für Solobusse (Lebenszykluskosten ohne Fahrerkosten) auf dem Zeithorizont „heute“ für mittleren ÖPNV – ohne jegliche Förderung, inklusive Infrastruktur



Quelle: BELICON/R. Pütz

Abbildung 12: Relativer Kostenvergleich der Antriebstechnologien für Solobusse (Lebenszykluskosten ohne Fahrerkosten) auf dem Zeithorizont „mittelfristig“ für mittleren ÖPNV – ohne Förderung und ohne Infrastruktur



Quelle: BELICON/R. Pütz

sen mit Verbrennungsmotor – also Overnight Charger (GL) – aufgrund der hohen Investitionskosten bereits *ohne Berücksichtigung der Investitionen in die Infrastruktur* nur mit *hochsignifikanten Mehrkosten* von rund 52 Prozent möglich sein. Der Opportunity Charger (GL) wird – ohne Berücksichtigung der Infrastrukturkosten – noch um rund 16 Prozent Mehrkosten gegenüber der Dieselschiffahrt aufweisen.

Da die Weiterentwicklung der Elektromobilität im Pkw-Bereich als Treiber auch für die Kostendegression der Elektromobilität bei Linienbussen angesehen wird, soll hier die Bewertung FEV Aachen (2017) für den Zeitverlauf bis zum Jahr 2030 zitiert werden. Demnach werden im Jahr 2030 lediglich 20 Prozent der Neuzugänge im Bereich Pkw und leichte Nutzfahrzeuge über *keinen* Verbrennungsmotor verfügen. Batteriefahrzeuge werden dann 19 Prozent und Brennstoffzellenfahrzeuge lediglich 1 Prozent der Fahrzeugneuzugänge ausmachen. Allerdings sollen 91 Prozent der Neuzugänge über einen elektrischen Antriebsstrang verfügen, was die zunehmende Bedeutung der (Plug-in) Hybridisierung belegt. Den mit 51 Prozent größten Anteil an den Neuzugängen werden den Mild-Hybriden zugeschrieben. Trost (2016) entwickelte in seiner Dissertation am Fraunhofer IWES eine Prognose für die Entwicklung des Fahrzeugbestandes je Antriebstechnik im Zeitverlauf. Er prognostiziert für das Jahr 2030 einen Anteil an Batteriefahrzeugen um rund 7 Prozent. Erst nach 2040, mit der erwarteten Einführung der „Post-Lithium-Technik“ (Li-Luft, Li-S, Festkörperbatterien etc.) wird die Batterieelektromobilität demnach stärker an Bedeutung gewinnen.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick auf den Horizont „langfristig“

Die ganzheitliche ökologische und ökonomische Analyse der zurzeit eingesetzten oder im Test befindlichen alterna-

tiven Antriebstechnologien für Linienbusse und deren erwartete Weiterentwicklung zeigt, dass konventionelle „Nahe-Null-Emissions“-Antriebe mit Verbrennungsmotoren für die überschaubare Zukunft, d.h. den Betrachtungshorizont „mittelfristig“, für die Bedingungen der meisten ÖPNV-Verkehrsunternehmen weiterhin die erste Wahl für Linienbusse bleiben könnten – eine technologie neutrale Politik vorausgesetzt, die sich in der Clean Vehicles Directive jedoch nicht widerfindet, da feste Quoten die sonst üblichen Wirkvorschriften ersetzen und eine einseitige ökologische Bewertung nur auf den Fahrbetrieb abhebt und die Energiebereitstellung und Fahrzeugproduktion ausblendet. Alternative Antriebe des Spektrums Elektromobilität würden im Vergleich zu den etablierten Verbrennungsmotor-Optionen heute systembezogen die Ökobilanz nicht (bzw. im Fall des Opportunity Chargers nur unwesentlich) verbessern. Erst mittelfristig können die alternativen Optionen der Elektromobilität das ökologische Niveau der etablierten Antriebsoptionen mit Verbrennungsmotor für die Randbedingungen der meisten ÖPNV-Unternehmen unterbieten. Der ideologisch motivierte kontinuierliche Ausschluss der hoch sauberen Verbrennungsmotortechnik ist unter ökologischen Gesichtspunkten nicht gerechtfertigt. Ökonomisch betrachtet liegen alle alternativen Antriebe des Spektrums Elektromobilität heute ohne öffentliche Förderung weitab jenseits eines wirtschaftlichen Einsatzes. Auch mittelfristig werden die Mehrkosten der Optionen des als „emissionsfrei“ definierten Spektrums der Elektromobilität noch nicht das Niveau der hochsauberen Verbrennungsmotortoptionen erreicht haben und bei Berücksichtigung der Energiezufuhrinfrastruktur im Abschreibungszeitraum noch signifikante Mehrkosten erfordern. Da die Clean Vehicles Directive eine Kompensation dieser Mehrkosten durch die Mitgliedsstaaten fordert, wird sich der ÖPNV mit Linienbussen im Geltungszeitraum der Richtlinie hochsignifikant verteuern. Die Richtlinie fordert aber auch, dass die Ein-

führung alternativer Antriebe nicht zu einer Erhöhung von Fahrpreisen führen darf und auch Angebotsreduzierungen ausgeschlossen werden müssen. Eingedenk der in Deutschland propagierten „Tarifwende“ hin zu einem Gratis-ÖPNV dürften sich erhebliche finanzielle Folgen einstellen. Es ist absehbar, dass *kontinuierlich* umfangreiche Mittel der öffentlichen Hand *über lange Zeit* erforderlich sein werden. Auch aus diesem Grund ist eine politische Umsetzung der Clean Vehicles Directive mit Augenmaß zu betreiben. Dazu ist es unverzichtbar, dass einige – *große* – Verkehrsunternehmen hier eine Führungsverantwortung für die gesamte ÖPNV-Branche wahrnehmen und bei der Umsetzung der Richtlinie kleinere und mittlere Verkehrsunternehmen von den wenig zielführenden Beschaffungsquoten entlasten.

Aufgrund der womöglich rasanten Entwicklung der Elektromobilität müssen Einflüsse evtl. neuer Batterietechnologien, die aus heutiger Sicht zu diesem Zeitpunkt nicht als betrieblich serienreif absehbar sind, zu gegebener Zeit eine Neubewertung erfordern.

Abschließend empfiehlt der Autor der Politik, zukünftig wieder zu einer *technologieoffenen/technologieneutralen Förderung* auf der Basis von *Wirkvorschriften* zurückzufinden. So besteht heute aus Gründen der lokalen Emissionsreduzierung kein Handlungsbedarf mehr. Handlungsbedarf besteht ausschließlich hinsichtlich der Schonung fossiler Ressourcen und der CO₂-Reduzierung, die beide in engem Zusammenhang stehen. Eine technologieoffene politische Fragestellung müsste vielmehr lauten: Wie bekommt man die regenerativen Energien (Sonne, Wind, Wasser, Biomasse) zum Endantrieb – welcher nicht nur ein Elektromotor, sondern durchaus weiterhin auch ein hoch sauberer Verbrennungsmotor sein kann! Für einen technologieneutralen Ansatz müssen, ausgehend von den regenerativen Primärenergien, die vielfältigen Umwandlungs-, Speicherungs-, Energieverteilungs- und Betankungskonzepte, insbesondere hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit beziehungsweise die er-

forderlichen Investitionen, untersucht werden. Wie bereits vorher erwähnt, ist dabei ein Systemdenken unverzichtbar, welches für jeden Energiepfad die Effizienz, die Ökologie und die Kosten belastbar ermittelt. Somit sind neben der Elektromobilität noch viele andere Pfade höchst aussichtsreich. Insbesondere die Optionen PtL und PtG sind „langfristig“ höchst aussichtsreich, da die heute bestehende Energieverteilungs- und Betankungsinfrastruktur für flüssige und gasförmige Kraftstoffe unverändert genutzt werden könnte (vgl. Abbildung 13). Ein zentrales Element stellt jedoch dabei die notwendige Hydrolyse-Infrastruktur dar, die jedoch ein politisches Bekenntnis erfordert. Freilich ist die Energieeffizienz des elektrischen Pfades ungleich höher als jene der flüssigen oder gasförmigen „E-Fuels“, jedoch spielt die Energieeffizienz bei unendlich verfügbaren Energieträgern in anderen Weltregionen eine durchaus untergeordnete Rolle, so dass eingedenk der bestehenden Infrastruktur auch E-Fuel-Konzepte aussichtsreich sind, wenn man sich einmal darauf besonnen hat, dass Deutschland weiterhin ein Importland für Energie – d.h. zukünftig auch und vermehrt regenerative – bleiben wird.

Autorenangaben

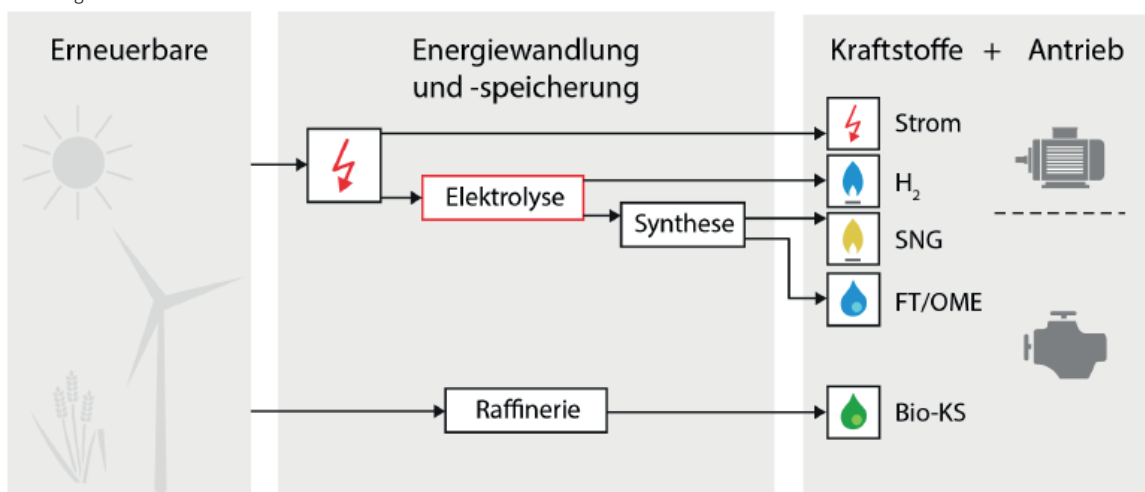
Prof. Dr. Ralph Pütz

Institutsleiter BELICON – Institut für angewandte Fahrzeugforschung und Abgasanalytik an der Hochschule Landshut
Kirchbergstraße 11, 84092 Bayerbach
ralph.puetz@belicon-forschung.de

Dipl.-Ing. Peter Bronnenberg

Geschäftsführer PaderSprinter GmbH und stellvertretender Vorsitzender des VDV-Ausschusses für Kraftfahrwesen
Barkhauser Straße 6, 33106 Paderborn

Abbildung 13: „Viele Wege führen nach Rom“: Technologieoffenheit erfordert eine systembezogene Bewertung aller aussichtsreichen Pfade von regenerativer Energie zum Endantrieb



Quelle: BMWi-AG IV/Sternor