

DStGB DOKUMENTATION N° 152



EINSATZ VON GASBUSSEN IM ÖPNV

Ein Beitrag zum Klimaschutz und zur Luftreinhaltung



DStGB
Deutscher Städte-
und Gemeindebund



INHALT

Vorwort Deutscher Städte- und Gemeindebund e. V. Dr. Gerd Landsberg	1
Vorwort Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. Prof. Dr. Gerald Linke	2
Auf einen Blick	3
Einleitung	5
Methan als Kraftstoff für Busse	6
Fahrzeugtechnologie	7
Tankstellen für Gasfahrzeuge	9
Vergleich der verschiedenen Antriebstechnologien	11
EXKURS Ladekonzepte bei batterieelektrischen Bussen	11
Schlussfolgerungen	21
Literaturverzeichnis	22
Klimaneutral durch Augsburg von Klaus Roeder	24

Einsatz von Gasbussen im ÖPNV – ein Beitrag zum Klimaschutz und zur Luftreinhaltung

Kurzfassung einer wissenschaftlichen Untersuchung des DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn) und des DVGW-EBI (DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Karlsruhe) zum Einsatz von Gasbussen im ÖPNV.

IMPRESSUM

Redaktion: Jan Strehmann (DStGB)

Autoren: Maximilian Heneka (DVGW-EBI), Wolfgang Köppel (DVGW-EBI), Dietrich Gerstein (DVGW)

Herausgeber

Deutscher Städte- und Gemeindebund (DStGB)

Marienstraße 6 · 12207 Berlin

dstgb@dstgb.de · www.dstgb.de

Titelfoto

© AdobeStock - dreampicture



VORWORT DEUTSCHER STÄDTE- UND GEMEINDEBUND

Die Themen Klimawandel und Luftreinhaltung sind gerade in den Städten und Gemeinden allgegenwärtig. Vor Ort werden nicht nur die Ziele von EU, Bund und Ländern umgesetzt, die Kommunen setzen sich auch eigene ambitionierte Ziele für eine nachhaltige Verkehrswende und saubere Luft. Neben dem umfassenden Ausbau des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) drückt sich dies in einer Umgestaltung unserer Alltagsmobilität aus. Während der Umbau des Verkehrssystems die Städte und Gemeinden längst erreicht hat, wird die Diskussion über den Beitrag des Verkehrssektors zur Erreichung der Klimaziele endlich auch auf Bundesebene ernsthaft geführt. Die Kommunen sowie lokale und regionale Verkehrsunternehmen stehen jedoch bereits heute vor der Frage, mit welchen Antriebstechnologien der Wechsel von konventionellen fossilen Kraftstoffen zu umweltverträglicheren und gänzlich emissionsfreien Kraftstoffen erfolgen soll. Neben der Stärkung nachhaltiger Verkehrsträger und deren besserer Vernetzung, braucht es je nach lokalen Rahmenbedingungen wie Bevölkerungsdichte, Verkehrsaufkommen oder Topographie zukünftig einen Mix unterschiedlicher Antriebsarten im ÖPNV. Bei der Verkehrswende wird es keine „one-size-fits-all“-Lösungen geben.

Die im Frühjahr 2019 beschlossene europäische „Clean Vehicles Directive“ setzt den öffentlichen Akteuren ambitionierte Ziele zur künftigen Beschaffung von Bussen für den ÖPNV. Neben der Elektromobilität braucht es weitere Alternativen, um in den Zentren und auf dem Land die konventionell angetriebenen Busflotten zu ergänzen und perspektivisch zu ersetzen. Eine besondere Herausforderung ist die ÖPNV-Finanzierung, wenn aufgrund notwendiger Angebotserweiterungen Fahrzeuge künftig nicht nur ersetzt, sondern Fuhrparks vielerorts aufgestockt werden müssen.

Mit der vorliegenden DStGB-Dokumentation über den Einsatz von Gasbussen im ÖPNV möchte der Deutsche Städte- und Gemeindebund (DStGB) gemeinsam mit dem Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) einen Beitrag zur Debatte um neue Antriebstechnologien leisten. Die Ergebnisse der hier dargestellten Studie sollen kommunalen Entscheiderinnen und Entscheidern sowie Verkehrsunternehmen und Aufgabenträgern eine Anregung und Orientierung geben, ob der Einsatz von gasbetriebenen Bussen für ihr lokales ÖPNV-System eine zukunftsweisende Alternative darstellt.

Dr. Gerd Landsberg
Hauptgeschäftsführer Deutscher Städte- und Gemeindebund



VORWORT DES DEUTSCHEN VEREINS DES GAS- UND WASSERFACHES e. V.

Insbesondere im Verkehrssektor müssen die Anstrengungen verstärkt werden, um die Klimaziele zu erreichen. Treibhausgasemissionen müssen in allen Bereichen und gerade auch im ÖPNV verringert werden. Die Klimaziele der Bundesregierung stellen den Verkehrssektor vor große Herausforderungen. Hinzu kommt die Notwendigkeit, Luftschadstoffe in Ballungsgebieten zu reduzieren. Dadurch geraten auch die Fahrzeuge des ÖPNV in den Fokus der Diskussion um saubere, alternative Antriebskonzepte.

Die derzeitige Förderpolitik der Bundesregierung ist vor dem Hintergrund stark divergierender Rahmenbedingungen für alternative Antriebe im ÖPNV mit Bussen volkswirtschaftlich fragwürdig. Während die Beschaffung von Elektrobussen deutlich gefördert wird, erhalten Kommunen mit Interesse an Gasbussen bislang keine Unterstützung. Die im Frühjahr auf europäischer Ebene verabschiedete „Clean Vehicles Directive“ erkennt Gasantriebe als saubere Technologie an. Allerdings wird über die Einführung von Beschaffungsquoten für Elektrobusse der Einsatz der Gastechologie benachteiligt. Diese Schieflage beim Förderregime schafft Fehlanreize und schadet dem Klimaschutz.

Eine echte Technologieoffenheit würde helfen, auch andere kostengünstige und umweltfreundliche Antriebskonzepte wie den Gasantrieb umzusetzen. Der technische Entwicklungsstand der batterieelektrischen Mobilität und der Brennstoffzellenmobilität ist noch nicht so weit ausgereift, dass ein flächendeckender und kostengünstiger Einsatz möglich ist. Geringe Reichweiten, lange Ladezeiten bei batterieelektrischen Antrieben und – zumindest für die nächsten Jahre – Strom aus konventionellen Quellen tragen nicht zu einem effizienten und schnell umsetzbaren Klimaschutz bei.

Gas-Technologien für Busse sind keine Zukunftsvision, sondern technisch voll ausgereift und sofort verfügbar. Dies zeigt der erfolgreiche Einsatz von Gasbussen in mehr als 20 Kommunen in Deutschland. Hierzu gehören Augsburg, Oldenburg, Köln, Gießen und ab 2020 auch Koblenz, um nur einige zu nennen. Auch in europäischen Großstädten wie z. B. Madrid, Nantes oder Warschau werden Gasbusse mit großem Erfolg eingesetzt.

Auf dem Weg zu einer sauberen Mobilität mit Gas sind nur zwei Schritte zu leisten. Im sogenannten „Fuel Switch“ löst CNG (Compressed Natural Gas) zunächst Diesel als Kraftstoff ab. Bereits dadurch wird die Umweltbilanz von Bussen verbessert. Wichtig ist der zweite Schritt, der „Content Switch“. Hierbei wird Erdgas Schritt für Schritt durch erneuerbare „grüne“ Gase wie Biomethan oder synthetisch erzeugtes Gas ersetzt. Damit verbessert sich die Klimabilanz deutlich. Wird ausschließlich erneuerbares Gas verwendet, können Gasbusse weitgehend emissionsfrei angetrieben werden. Hierbei unterstützt der DVGW Kommunen und Verkehrsunternehmen und steht beratend zur Seite.

A handwritten signature in blue ink that reads "G. Linke".

Prof. Dr. Gerald Linke

Vorstandsvorsitzender Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.

AUF EINEN BLICK

Busse sind für viele Menschen ein wichtiger Bestandteil der täglichen Mobilität. Allein im Jahr 2017 wurden nach aktuellen Zahlen des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) etwa 4,5 Mrd. Fahrgäste mit Bussen befördert [1]. Ein Großteil der Fahrten wurde dabei von sog. Stadtbussen in Mittel- und Großstädten absolviert.

Durch die hohen Fahrleistungen in Ballungsgebieten haben Busse im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) einen überproportional großen Einfluss auf die innerstädtische Luftqualität. Von den aktuell etwa 35.000 zugelassenen Linienbussen erfüllen nur etwa 27 % die Euro VI-Abgasnorm [1]. Angesichts der aktuellen Diskussion um Dieselfahrverbote, infolge der zu hohen Schadstoffbelastungen in deutschen Großstädten, ist daher auch im Busverkehr ein Umstieg auf emissionsärmere Fahrzeugmodelle erforderlich.

Auch aus Sicht des Pariser Klimaabkommens und den daraus abgeleiteten Klimaschutzzielen der Bundesregierung ist ein schneller Umstieg auf Fahrzeuge mit geringen (wie z. B. sofort verfügbare Biomethan-Fahrzeuge) und ohne Treibhausgasemissionen (wie z. B. mittel- bis langfristig verfügbare E-Methan-Fahrzeuge) sinnvoll.

Aktuell werden im straßengebundenen ÖPNV nahezu ausschließlich Fahrzeuge mit Dieselantrieb eingesetzt. Alternative Antriebskonzepte hatten im Jahr 2017 einen Anteil von nur etwa 5 % [2]. Mit einem Anteil von etwa 60 % stellen Gasbusse, die mit CNG (Compressed Natural Gas) angetrieben werden, derzeit das am weitesten verbreitete alternative Antriebskonzept dar.

Gasbusse werden schon seit über 20 Jahren eingesetzt, sind technisch ausgereift und können bisher verwendete Dieselbusse ohne Einschränkungen oder größere Infrastrukturumrüstungen ersetzen. Aufgrund der geringeren lokalen Emissionen (Stickoxide, Feinstaub, Lärm) und des hohen Treibhausgasminderungspotenzials gelten Gasbusse als vielversprechende Alternative zu konventionellen Dieselbussen. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Antriebsstränge konnten die Verbrauchswerte und Emissionen der Fahrzeuge in der Vergangenheit deutlich verbessert werden. Zuletzt hat sich mit der Einführung der Mild-Hybrid-Technologie eine weitere technische Möglichkeit zur Reduktion der fahr-

zeugseitigen Treibhausgas- und Schadstoffemissionen eröffnet: Durch Rekuperation und die Einführung einer Stopp-Start-Funktion wird der Kraftstoffverbrauch gegenüber konventionellen Fahrzeugen um etwa 13 % reduziert. Wird Biomethan als Kraftstoff verwendet, sind Gasfahrzeuge bereits heute nahezu treibhausgasneutral.

Die Studienergebnisse zeigen, dass der Gasantrieb in Bezug auf Kosteneffizienz, Umwelt- bzw. Klimaschutz und Alltagstauglichkeit eine schnell verfügbare und prüfenswerte Alternative zum Dieselantrieb darstellt.

Hervorzuheben sind insbesondere die nachfolgend aufgelisteten Aspekte:

KOSTEN

- Die Mehrkosten für moderne Gasbusse sind über den Gesamtnutzungszeitraum (12 Jahre) gegenüber vergleichbaren Euro VI-Dieselbussen mit weniger als 2 % (bzw. ca. 3 % bei Verwendung von Biomethan) vernachlässigbar.
- Aufgrund der hohen Anschaffungskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur sind batterieelektrische Busse und Brennstoffzellenbusse aktuell ohne eine hohe Förderung noch nicht wirtschaftlich darstellbar. Gegenüber konventionellen Dieselbussen liegen die Gesamtkosten über den Nutzungszeitraum der Fahrzeugflotte (12 Jahre) um 7 % (batterieelektrischer Bus mit Gelegenheitsladung) bis 31 % (batterieelektrischer Bus mit Depotladung) höher. Die zusätzlich anfallenden Kosten für eine eventuell erforderliche Netzertüchtigung sind dabei noch nicht berücksichtigt. Ebenfalls wurde ein möglicher Fahrzeugmehrbedarf infolge der reduzierten Fahrgastkapazitäten der batterieelektrischen Fahrzeuge vernachlässigt.

EMISSIONEN

- Gasfahrzeuge weisen gegenüber modernen Euro VI-Dieselfahrzeugen deutlich geringere lokale Emissionen auf. Bei Realmessungen zwischen vergleichbaren Linienbussen konnten für Gasbusse um über 60 % geringere Stickoxid-Emissionen nachgewiesen werden. Zusätzlich fallen Feinstaub- und Lärmemissionen um ca. 90 % bzw. 50 % geringer aus.
- Durch den Einsatz von Biomethan können die THG Emissionen (Well-to-Wheel) von Gasbussen im Vergleich zu modernen Dieselnbussen schon heute um ca. 80 % reduziert werden. Mittelfristig steht Gasbussen durch die Bereitstellung von E-Methan, das über Power-to-Gas-Verfahren erzeugt wird, ein weiterer Kraftstoff zur Verfügung, der die zukünftigen Anforderungen an einen klimaneutralen Linienbusbetrieb vollumfänglich erfüllen kann.

PRAXISERFAHRUNGEN

- Die Befragung verschiedener ÖPNV-Betreiber zeigt, dass Gasbusse eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung erfahren und eine zuverlässige, ausgereifte Technologie sind.
- Gasbusbetreiber nutzen bereits heute Biomethan als Kraftstoff und erzielen dadurch erhebliche Treibhausgasemissionseinsparungen.
- In Bezug auf den Tankvorgang, die Wartung und die Instandhaltung der Fahrzeuge und die Anforderungen an das (Werkstatt-)Personal bestehen kaum Unterschiede zu konventionellen Dieselnbusssystemen.

EINLEITUNG

Der öffentliche Straßenpersonennahverkehr (ÖSPNV) ist ein wichtiger Bestandteil der täglichen, kommunalen Mobilität. Busse, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen beförderten im Jahr 2017 insgesamt rund 8,2 Mrd. Fahrgäste [1]. Der größte Teil des ÖSPNV in Städten und auch in ländlichen Regionen wird durch Linienbusse ausgeführt. Dieser Linienbusverkehr erbrachte im Jahr 2017 mit 28,3 Mrd. Personenkilometern etwa 62 % der Personenbeförderungsleistung des ÖSPNV [1].

Insgesamt sind in Deutschland rund 35.000 Busse in Städten und Ballungsräumen im Einsatz [2]. Mit einem Anteil von über 95 % dominieren Dieselbusse aktuell den Markt [1]. Nur etwa 27 % der zugelassenen Linienbusse erfüllen die Euro VI-Abgasnorm [1]. Angesichts der aktuellen Diskussion um die Luftqualität in deutschen Großstädten wächst daher auch bei den Linienbussen die Notwendigkeit, konventionelle Dieselantriebe durch alternative Antriebskonzepte zu ersetzen.

Auch aus Sicht des „Klimaschutzplan 2050“ [3] und den darin enthaltenen Treibhausgasminderungszielen ist ein schneller Umstieg auf klimafreundliche Antriebskonzepte erforderlich. Demnach sollen die Treibhausgasemissionen des Verkehrs bis 2030 um 40 % gegenüber dem Referenzjahr 1990 reduziert werden. Bisher hat der Verkehrssektor noch keinen wesentlichen Beitrag zur Treibhausgasminderung leisten können. Im Gegenteil: Wie aus aktuellen Zahlen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) hervorgeht, lagen die absoluten Treibhausgasemissionen des deutschen Verkehrssektors im Jahr 2017 sogar um etwa 5 % über dem Referenzwert aus dem Jahr 1990 [4].

Die bisherige Stagnation hat die EU dazu veranlasst, die Verbreitung „sauberer“ und „emissionsfreier“ Straßenfahrzeuge durch strengere Vorgaben für die öffentliche Beschaffung zu beschleunigen. Demnach wurden mit der Verabschiedung der Neufassung der „Clean Vehicles Directive“ (EU-Richtlinie 2009/33/EG) am 18.04.2019 durch das EU-Parlament erstmals länderspezifische Mindestziele für

den Anteil an emissionsfreien und emissionsarmen Fahrzeugen bei der öffentlichen Auftragsvergabe festgelegt.

Im Zuge der Diskussion um die Etablierung von sauberen, alternativen Antrieben bei Linienbussen haben die DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut (EBI) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) in einer Studie untersucht, inwieweit Gasbusse eine mögliche Option darstellen. Ziel war es hierbei, ÖPNV-Unternehmen, Kommunen und politischen Entscheidungsgremien eine wissenschaftlich fundierte sowie praxisnahe Entscheidungshilfe für die Beschaffung von Gasbussen bereitzustellen. Hierzu wurden die Vor- und Nachteile der Gastechnologie anhand von Daten und Fakten zu Fahrzeugen, benötigter Betankungsinfrastruktur und spezifischen Anforderungen an Personal und Werkstätten zum heutigen Stand aufgezeigt. Ferner wurden die Gesamtkosten und die Klimawirksamkeit des Linienbetriebs untersucht. Neben Gas- und Dieselbussen wurden weitere Alternativen wie batterieelektrische Busse, Brennstoffzellenbusse sowie Mild-Hybrid-Konzepte betrachtet und vergleichend bewertet.

Im Rahmen dieses Beitrags werden die Kernaussagen dieser Studie vorgestellt.

METHAN

ALS KRAFTSTOFF FÜR BUSSE

Für den Betrieb von Gasbussen stehen verschiedene Kraftstoffoptionen zur Verfügung, die sich in ihren Wertschöpfungsketten voneinander unterscheiden. Neben fossilem Erdgas können Biomethan oder erneuerbares Methan (E-Methan) als Kraftstoff verwendet werden.

Um Erdgas oder seine erneuerbaren Substitute als Kraftstoff nutzen zu können, muss die Energiedichte bezogen auf das Volumen erhöht werden. Hierzu werden die Gase auf ca. 200 bar zu CNG (Compressed Natural Gas) komprimiert.

ERDGAS

Erdgas ist ein weltweit gefördertes, brennbares natürliches Gasgemisch, das in der Stromerzeugung, im Wärmemarkt, als Grundstoff in der Industrie und als Kraftstoff verwendet wird. Die Hauptkomponente von Erdgas ist Methan. Daneben sind in geringen Mengen weitere Bestandteile wie z. B. die brennbaren Gase Ethan, Propan und Butan sowie Stickstoff und Kohlenstoffdioxid enthalten.

Da Erdgas eine hohe Methanzahl und dementsprechend auch eine hohe Klopffestigkeit aufweist, ist es als Kraftstoff sehr gut geeignet. Bei der motorischen Verbrennung von Erdgas entsteht aufgrund des geringeren Kohlenstoffanteils pro Kilowattstunde (kWh) bis zu 25 % weniger CO₂ als bei Dieselmotoren. Berücksichtigt werden muss allerdings der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs. Dieselmotoren haben in der Regel höhere Wirkungsgrade als Gasmotoren. Bezogen auf den gefahrenen Kilometer reduziert sich der Emissionsvorteil von Erdgas entsprechend.

BIOMETHAN

Biomethan entsteht durch die Aufbereitung von Biogas. Hierbei wird das in einer Biogasanlage aus organischen Abfällen sowie aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnene Rohbiogas von unerwünschten Neben- und Spurenkomponenten wie z. B. Kohlenstoffdioxid (CO₂), Schwefelwasserstoff oder Stickstoff befreit. Durch Verdichtung auf ca. 200 bar kann das aus der Biogasaufbereitung kommende Biomethan direkt als Kraftstoff verwendet werden. Alternativ besteht die Möglichkeit das gereinigte Biogas in das Erdgasnetz einzuspeisen und den Nutzern bzw. der Tankstelle bilanziell zuzurechnen.

Eine weitere Möglichkeit der Bereitstellung von Methan aus biogenen Quellen stellt die thermische Vergasung von holzartiger (ligninreicher) Biomasse, wie z. B. Waldrestholz, zu Substitute Natural Gas (SNG) dar.

Durch die Verwendung von nachhaltig erzeugtem Biomethan als Kraftstoff lassen sich die Well-to-Wheel-Emissionen – also alle Treibhausgasemissionen, die innerhalb der gesamten Wirkungskette von der Rohstoffgewinnung bis hin zum Betrieb des Fahrzeugs auftreten – bereits heute um bis zu 80 % reduzieren (je nach eingesetzten Substraten). Da nur diejenige Menge an CO₂ bei der Verbrennung freigesetzt wird, die bereits zuvor während der Wachstumsphase an die Biomasse gebunden wurde, ist die (motorische) Verbrennung von Biomethan treibhausgasneutral und trägt somit nicht zum anthropogenen Treibhauseffekt bei.

ERNEUERBARES METHAN

Erneuerbares Methan wird über den Power-to-Gas-Prozess (kurz: PtG-Prozess) erzeugt. Hierbei wird erneuerbare elektrische Energie (z. B. aus Photovoltaik oder Windkraftanlagen) über eine Wasserelektrolyse mit anschließender Methanisierung in erneuerbares Methan (E-Methan) umgewandelt. Bei der Methanisierung wird der durch die Elektrolyse bereitgestellte erneuerbare Wasserstoff mit einer Kohlenstoffquelle zu Methan umgesetzt. Als mögliche Kohlenstoffquellen kommen nicht vermeidbares Kohlenstoffdioxid (CO₂) oder Kohlenstoffmonoxid (CO) aus industriellen Prozessen sowie biogenes CO₂ oder CO – z. B. aus der Aufbereitung von Biogas oder aus Holzvergasungsanlagen – in Frage. Eine weitere Möglichkeit der Kohlenstoffbereitstellung ist die direkte Abtrennung von CO₂ aus der Luft.

Durch die Einbindung von erneuerbarer elektrischer Energie aus Photovoltaik- und Windkraftanlagen in die Synthese von Methan besteht die Möglichkeit, einen nahezu treibhausgasneutralen Kraftstoff für Gasfahrzeuge bereitzustellen [5]. Power-to-Gas-Anlagen agieren dabei als Bindeglied zwischen der Strom- und Gasinfrastruktur und tragen durch die Bereitstellung grüner Gase zur optimalen Integration von überschüssiger, erneuerbarer elektrischer Energie in die Verbrauchssektoren (Wärme und Verkehr) bei.

FAHRZEUGTECHNOLOGIE

Gasmotoren haben einen hohen technischen Reifegrad erreicht und zeichnen sich durch eine hohe Zuverlässigkeit aus. Bedingt durch die große Nachfrage aus dem europäischen Ausland haben zahlreiche Hersteller Gasbusse im Angebot und bieten diese auch für den deutschen Markt an. Verfügbar sind u.a. Gelenk- und Solobusse für den innerstädtischen Bereich und für den Überlandbetrieb.

Nachfolgend soll ein kurzer Überblick über ausgewählte Fahrzeugcharakteristika, wie z. B. Reichweiten und Emissionsverhalten sowie über den aktuellen technologischen Entwicklungsstand der Antriebsstränge (Mild-Hybrid-Technologie) gegeben werden.

REICHWEITEN

Das Mitführen von Kraftstoff ist bei Gasbussen aufgrund des hohen Speicherdrucks (ca. 200 bar) aufwändiger als

bei entsprechenden Dieselfahrzeugen¹. Als Tanks werden mehrere Druckgasbehälter verwendet, die auf dem Dach der Busse montiert werden. Damit bleibt das nutzbare Raumangebot des Busses unverändert. Im Fahrgastraum entstehen keine Platzverluste für die Passagiere. Gleichzeitig erlaubt die Montage auf dem Dach deutlich höhere Speicherkapazitäten. Gasbusse sind damit in der Lage, Reichweiten von über 500 km zu erreichen (s. *Abbildung 1*).

SCHADSTOFFEMISSIONEN

Zum 01.01.2014 sind in Europa die Abgasnormen weiter verschärft worden. Mit der Einführung der Euro VI Abgasnorm wurden die Grenzwerte für Lkw und Busse bei Partikeln um etwa 67 % und bei Stickoxiden (NO_x) um etwa 80 % gegenüber Euro V gesenkt. Zudem wurde mit der Euro VI-Abgasnorm ein Grenzwert für die Partikelanzahl eingeführt (s. *Tabelle 1*).

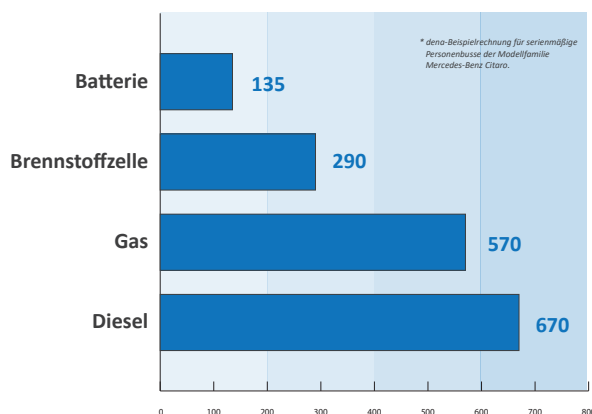


Abbildung 1: Reichweiten für Linienbusse nach Antriebsart² [6]

Tabelle 1: Euro VI-Abgasgrenzwerte für Lkw und Busse [8]

Kohlenstoffmonoxid (CO)	4 g/kWh
Kohlenwasserstoffe (NMHC)	0,16 g/kWh (Otto-Fahrzeug)
Stickoxide (NO _x)	0,46 g/kWh
Methan (CH ₄)	0,5 g/kWh (Otto-Fahrzeug)
Partikelmasse (PM)	0,01 g/kWh
Partikelzahl	6,0 x 10 ¹¹ Partikel/kWh

¹ Zum Vergleich: Bei Brennstoffzellenbussen werden aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte des Wasserstoffs Speicherdrücke von 350 bar benötigt, um eine ausreichende Reichweite zu generieren.

² Beispielrechnung nach [6] für serienmäßige Personenbusse der Modellfamilie Mercedes-Benz Citaro. Verwendete Parameter (Energiespeicher, Verbrauch). Batterieelektrischer Bus: Reichweite laut Herstellerangaben; Brennstoffzellen-Bus: 35 kg, 12 kg/100 km; Gasbus: 209,2 kg, 38,25 kg/100 km; Dieselsebus: 260 L, 38,7 L/100 km.

Die Einhaltung der aktuellen Feinstaub- und Stickoxid-Grenzwerte setzt bei Dieselbussen in der Regel den Einsatz von Partikelfiltern und Stickstoffreinigungsverfahren auf Basis von AdBlue® voraus. Bei modernen Gasfahrzeugen ist außer einem 3-Wege-Katalysator keine weitere Abgasreinigungstechnik erforderlich.

Wie aus *Abbildung 2* hervorgeht unterschreiten moderne Gasantriebe die Euro VI-Grenzwerte deutlich. Der Vergleich zwischen einem LNG-Lkw (Liquefied Natural Gas

- Flüssigerdgas) und einem Euro VI-Diesel-Lkw zeigt, dass Gasantriebe gegenüber Dieselantrieben deutlich reduzierte Schadstoff- und Lärmemissionen aufweisen. Im Falle der Stickoxide beträgt die Emissionsminderung im Vergleich zum Dieselantrieb etwa 40 %. Die Feinstaub und Lärmemissionen werden um ca. 90 % bzw. 50 % reduziert. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass insbesondere die angegebenen Stickoxid-Emissionswerte nur für einen kontinuierlichen Fahrbetrieb gelten. Bei wiederholten Anfahrvorgängen werden in der Regel deutlich höhere Emissionen generiert.

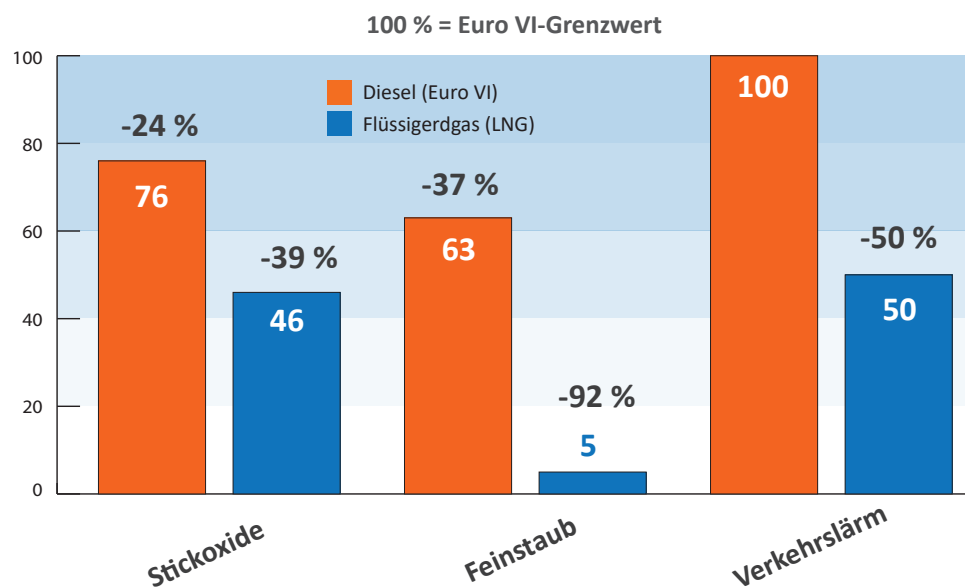


Abbildung 2: Emissionsvorteile von Gasantrieben gegenüber Euro VI-Dieselantrieben [9–11]

MILD-HYBRID-TECHNOLOGIE FÜR GAS- & DIESELBUSSE

Moderne Diesel- und Gasbusse sind aktuell auch als Mild-Hybrid-Variante verfügbar (s. *Abbildung 3*). Die Fahrzeuge sind hierbei mit einem zusätzlichen 48 V-Kurbelwellen-Starter-Generator (KSG) ausgestattet. Bei Verzögerungs- und Bremsvorgängen wandelt dieser die anfallende Rekuperationsenergie in elektrische Energie um und speichert diese in einem aus Hochleistungskondensatoren bestehenden UltraCap-Energiespeicher. Die gespeicherte Energie wird u. a. zur Versorgung des elektrischen Bordnetzes während des Fahrzeugstillstands eingesetzt, was das Abstellen des Motors an Haltestellen und roten Ampeln ermöglicht (Stopp-Start-Automatik). Beim Anfahren arbeitet der KSG als elektrischer Starter. Die gespeicherte elektrische Energie wird in diesem Fall für den Beschleunigungsvorgang verwendet und entlastet dadurch den Verbrennungsmotor. Ist ausreichend elektrische Energie im Energiespeicher vorhanden, wird das Bordnetz auch

während der Fahrt mit Energie versorgt [12].

Durch die Nutzung der zurückgewonnenen Bremsenergie weisen Mild-Hybrid-Fahrzeuge gegenüber konventionellen Fahrzeugmodellen einen reduzierten Kraftstoffverbrauch und geringere Emissionen auf. Zusätzlich trägt die Stopp-Start-Automatik (insbesondere im Stadtbetrieb) zu einer verringerten Lärm- und Schadstoffbelastung bei.

Laut Angaben von MAN Truck & Bus erreichen Mild-Hybrid-Modelle gegenüber konventionellen Fahrzeugen unter SORT 2-Bedingungen Kraftstoffeinsparungen von etwa 12 % bei Dieselbussen bzw. 13 % bei Gasbussen.



Abbildung 3: MAN Lion's City-Bus mit EfficientHybrid-Modul
(Quelle: MAN Truck & Bus SE)

TANKSTELLEN FÜR GASFAHRZEUGE

Aktuell gibt es in Deutschland knapp 900 CNG-Tankstellen. Davon sind 107 Tankstellen reine Biomethantankstellen (Stand: Q4/2018) [13]. Weitere 118 CNG-Tankstellen bieten Biomethan in Beimischungen von 10 bis 90 % an³.

Öffentliche CNG-Tankstellen sind in erster Linie für die Betankung von Pkw ausgelegt. Um die Tankzeiten gering zu halten werden für Busse und Lkw höhere Durchsatzmengen benötigt. Hierzu müssen die Tankstellen über entsprechend große Speicherkapazitäten verfügen. Gleichzeitig müssen die Tankstellen baulich so ausgelegt sein, dass Busse und Lkw diese problemlos anfahren können. Zu beachten sind dabei insbesondere Dachhöhen und Wendekreise.

AUFBAU & FUNKTIONSWEISE EINER CNG-TANKSTELLE

CNG-Tankstellen können über das örtliche oder regionale Gasnetz mit Erdgas versorgt werden. In den meisten Fällen wird Erdgas über das regionale Gasleitungsnetz mit einem Druck von wenigen Millibar bis zu 20 bar zur Verfügung gestellt.

In der Tankstelle wird das Gas zunächst aufbereitet und getrocknet. Anschließend wird es über einen Verdichter

komprimiert und bei einem Druck von etwa 300 bar vorgehalten. Durch die Druckdifferenz zwischen Gasspeicher und Fahrzeugtank kann das Fahrzeug ohne zusätzlichen Kompressionsaufwand betankt werden. Beim Tankvorgang wird das verdichtete Gas zunächst über die Hochdruck-Rohrleitungen der Zapfsäule zugeführt und anschließend über eine gasdichte Schlauch- und Tankkupplungsverbindung in den Fahrzeugtank gefüllt.

Da das komprimierte Gas direkt aus den Druckbehältern in die Zapfsäule gelangt, dauert der Tankvorgang nur wenige Minuten und ist vergleichbar zu den Tankzeiten von konventionellen Benzin- und Dieselfahrzeugen (s. *Abbildung 4*).

ÖFFENTLICHE TANKSTELLEN

Von den knapp 900 verfügbaren, öffentlichen CNG-Tankstellen sind nur wenige Tankstellen baulich und leistungsmäßig in der Lage, Busse und Lkw zu betanken. Öffentliche CNG-Tankstellen werden in Kombination mit regulären Tankstellen von Unternehmen der Mineralölwirtschaft sowie von lokalen Energieversorgern bzw. Stadtwerken betrieben. Grundsätzlich können CNG-Tankstellen auch

³ Eine Übersicht über aktuelle Biomethantankstellen bietet die interaktive Karte „Gas kann grün“ des BDEW. Abrufbar unter: <https://www.bdew.de/energie/erdgas/interaktive-karte-gas-kann-gruen>.

umgebaut und auf die Betankung von Gasbussen umgerüstet werden.

BETRIEBSTANKSTELLEN

In der Regel ist der Bau einer konkret auf die Gasbusflotte abgestimmten CNG-Tankstelle auf dem Betriebsgelände einer Betankung an öffentlichen Tankstellen vorzuziehen. In Ergänzung zur Busbetankung bietet es sich an, die Tankstelle auch für weitere Gasfahrzeuge (Pkw, Lkw) zu nutzen. Hierdurch können Zusatzerlöse generiert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Tankstelle stellt der sog. Quotenhandel dar. Tankstellen-

betreiber bzw. ÖPNV-Betreiber, die im Besitz einer eigenen Tankstelle sind, können über die Nutzung von Biomethan oder erneuerbarem Methan und den Handel mit Treibhausgasminderungsquoten zusätzliche Erlöse generieren. Der Einkauf von Biomethan und der Quotenhandel werden in der 38. BImSchV vom 08.12.2017 geregelt.

Die Investitionskosten für CNG-Tankstellen mit für Busse geeigneten Betankungsleistungen liegen in der Größenordnung von 1 - 1,5 Mio. € für Tankanlage und Gasspeicher. Technische Anforderungen an den Bau, Betrieb und die Instandhaltung von CNG-Tankstellen sind im DVGW Regelwerk Arbeitsblatt G 651 2009-07 und im DVGW Merkblatt G 656 (M), März 2017 zusammengefasst.

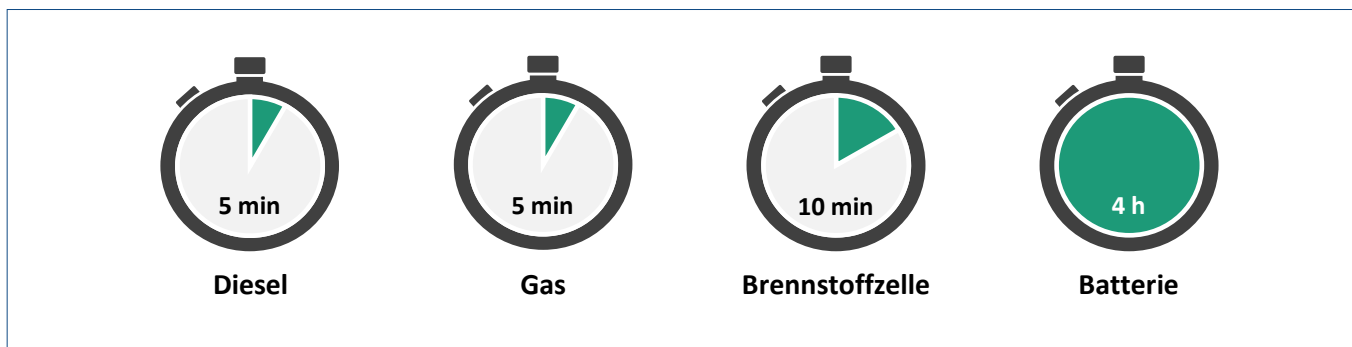


Abbildung 4: Typische Betankungsdauer für Linienbusse nach Antriebsart [6]

VERGLEICH DER VERSCHIEDENEN ANTRIEBSTECHNOLOGIEN

Für Linienbusse stehen aktuell verschiedene alternative Antriebssysteme zur Verfügung. Insbesondere im Bereich der batterieelektrischen Busse drängen zunehmend neue Hersteller auf den Markt, die mit ihren Modellen auf die Marktanteile konventioneller Dieselfahrzeuge abzielen und die Etablierung eines vollständig emissionsfreien Linienbusbetriebs versprechen.

Doch in welchem Ausmaß führen batterieelektrische Fahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge und Gasfahrzeuge zu einer Verringerung der Treibhausgas-Emissionen und mit welchen (Mehr-)Kosten ist im Vergleich zu modernen Euro VI-Dieselfahrzeugen zu rechnen? Auf diese Fragen wird in den nachfolgenden Abschnitten eingegangen.

METHODIK

Der Vergleich der verschiedenen Antriebskonzepte für Linienbusse erfolgt auf Basis einer generierten Modell-Stadtbuslinie mit vorgegebener Linien- bzw. Routencharakteristik. Neben Gasbussen werden heute verfügbare batterieelektrische Busse, Brennstoffzellenbusse, Euro VI-Dieselfahrzeuge sowie Mild-Hybrid-Konzepte analysiert.

Für den Vergleich werden die Gesamtkosten (Total Cost of Ownership) und die Klimabilanz des Linienbetriebs sowie das Treibhausgasreduzierungspotenzial der Antriebskonzepte betrachtet.

Die Analyse erfolgt dabei ausschließlich linienspezifisch. Eine fahrgastspezifische Linienauslegung (z. B. Berücksichtigung von Verstärkerfahrten bei typischen „Stoßzeiten“) wird nicht durchgeführt. Ebenso werden Synergie- bzw. Netzeffekte, die zwischen verschiedenen Buslinien eines Liniennetzes auftreten können, vernachlässigt.

EXKURS LADEKONZEPTE BEI BATTERIEELEKTRISCHEN Bussen

Im Gegensatz zu Diesel-, Gas- und Brennstoffzellenbussen, die ihre Speichertanks an den entsprechenden Zapfsäulen füllen, stehen für die Aufladung der Batteriespeicher von batterieelektrischen Bussen verschiedene Ladestrategien zur Verfügung, die sich u.a. auf die technischen Spezifikationen der Fahrzeugkomponenten, die Anforderungen an die Ladeinfrastruktur und insbesondere auf den Betriebsablauf bzw. die Betriebsplanung auswirken.

Im Wesentlichen wird zwischen dem Konzept der Depotladung (Overnight Charging, ON) und dem Konzept der Gelegenheitsladung (Opportunity Charging, OC) unterschieden:

DEPOTLADUNG

Bei dem Konzept der Depotladung (ON) werden die Batteriespeicher außerhalb der Betriebszeiten (in der Regel über Nacht) im Depot an entsprechend zugewiesenen Ladepunkten nachgeladen (s. *Abbildung 5*).

Als Depotlader ausgelegte Busse (ON-Busse) verfügen in der Regel über eine hohe Batteriekapazität (> 250 kWh), um die geforderte Tagesreichweite gewährleisten zu können. Im Vergleich zu Dieselfahrzeugen sind depotladende Busse je nach Batteriekapazität um mehrere Tonnen schwerer und haben dadurch eine reduzierte Fahrgastkapazität. Der sich

daraus ergebende Zielkonflikt zwischen Fahrgastkapazität und Reichweite führt aktuell häufig dazu, dass zur Substitution einer bestehenden Dieselbusflotte ein Mehrbedarf an batterieelektrischen depotladenden Bussen erforderlich wird.

GELEGENHEITSLADUNG

Die Ladestrategie der Gelegenheitsladung (OC) umfasst alle Konzepte, bei denen der Ladevorgang zusätzlich während des Betriebs an speziell dafür vorgesehenen Haltestellen erfolgt (s. Abbildung 6). Häufig handelt es sich hierbei um die Endhaltestelle einer Linie. Die Ladeleistungen betragen in der Regel mehrere 100 kW. Außerhalb der Betriebszeiten werden die Batteriespeicher analog zum Konzept der Depotladung an entsprechend ausgewiesenen Ladepunkten im Depot geladen bzw.

konditioniert.

Im Gegensatz zu depotladenden Bussen unterliegen gelegentlichsladende Busse konzeptbedingt keiner Reichweitenbeschränkung. Eine bestehende Dieselbusflotte kann demnach ohne einen Mehrbedarf an Fahrzeugen ersetzt werden. Gleichzeitig können die Batteriespeicher kleiner dimensioniert werden, was sich positiv auf das Fahrzeuggewicht und damit die Fahrgastkapazität auswirkt. Der Preis dafür ist jedoch ein höherer Infrastrukturausbaubedarf und eine deutlich eingeschränkte Flexibilität. Bei unzureichender Auslegung der Batteriespeicher können demnach bereits temporäre Änderungen in der Streckenführung (z. B. Umleitung aufgrund von Baustellen) eine Gefahr für den Regelbetrieb darstellen. Ebenso ist ein Einsatz als „Linienspringer“ nur bei vergleichbaren bzw. topographisch ähnlichen Strecken mit vorhandener Ladeinfrastruktur realisierbar.

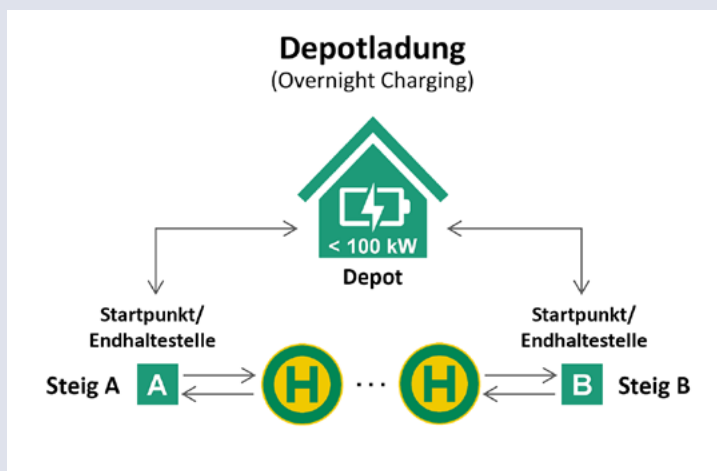


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Ladekonzepts „Depotladung“

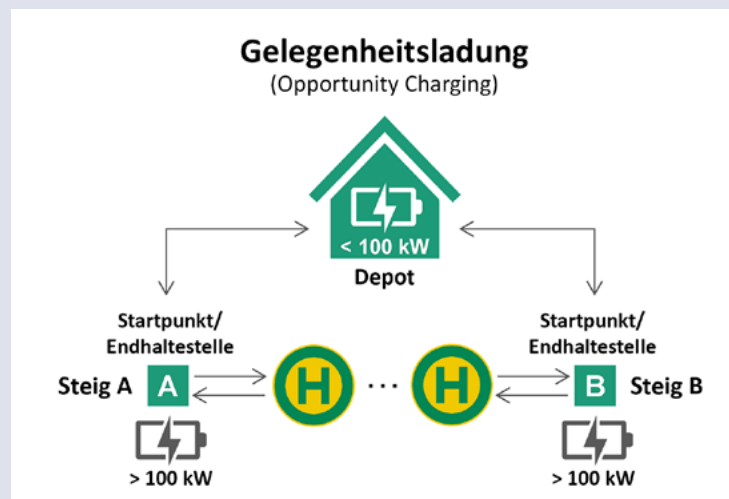


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Ladekonzepts „Gelegenheitsladung“

BETRACHTETE FAHRZEUGMODELLE

Der Vergleich der verschiedenen Antriebskonzepte wurde auf Basis des Mercedes-Benz Citaro® durchgeführt. Der Vorteil dieser für den Stadt- und Überlandverkehr konzipierten Modellreihe liegt in der großen Vielfalt an verfügbaren (alternativen) Antriebssystemen. Technologiespezifische Gewichtsunterschiede können dadurch direkt in den Berechnungen berücksichtigt werden.

Tabelle 2 zeigt eine Auswahl an technischen Daten zu den betrachteten Citaro®-Modellen.

Tabelle 2: Technische Spezifikationen der betrachteten Linienbusse (Auswahl) [14–20]

	DIESEL	GAS	BATTERIE (ON)	BATTERIE (OC) ¹⁾	BRENNSTOFFZELLE
Länge in mm	12.135	12.135	12.135	-	11.950
Breite in mm	2.550	2.550	2.550	-	2.550
Höhe in mm	3.120	3.389	3.400	-	3.496
Leergewicht in kg	11.415	11.721	13.700	12.867	13.200
Zul. Gesamtgewicht in kg	19.500	19.500	19.500	19.500	19.500
Beförderungskapazität in Personen ²⁾	108	104	77	95	84
Anzahl Gasflaschen	-	6 (200 bar)	-	-	7 (350 bar)
Batteriekapazität in kWh	-	-	250	75	26,9

1) Eigene Annahmen auf Basis der ON-Busvariante
2) Berechnet aus zulässigem Gesamtgewicht unter Annahme eines durchschnittlichen Passagiergewichts von 75 kg.

LINIENCHARAKTERISTIK

Die Gegebenheiten der zugrundeliegenden Linienbusstrecke haben einen großen Einfluss auf den Energie- bzw. Kraftstoffbedarf eines Linienbussystems. Im Rahmen dieser Untersuchung wird der betrachtete „Linienbetriebsplan“ auf Basis des sog. SORT 2-Fahrzyklus – einem Straßentestzyklus für Busse, der einen leichten Stadtverkehr mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 18,6 km/h abbildet – ausgelegt.

In Tabelle 3 sind die Charakteristika des generierten Linienbetriebsplans dargestellt. Es wird angenommen, dass sämtliche Liniendaten (Taktung, Durchschnittsgeschwindigkeit, Wendezeit) über die tägliche Einsatzzeit konstant sind.

GENERIERTE MODELLLINIE		
Durchschnittsgeschwindigkeit	km/h	18,6
Anzahl an Umläufen	pro Tag	15
Routenlänge (pro Umlauf)	km	13,8
Fahrzeit (inkl. Haltezeit)	min	44,5
Wendezeit	min/Route	7,4
Linientakt	min	20
Jahresbetriebstage	d/a	300
Jahreslaufleistung	km/a/Bus	62.100

Tabelle 3: Parameter der generierten Modelllinie

ENERGIEBEDARF

Für einen repräsentativen Vergleich der Antriebskonzepte müssen den Fahrzeugen vergleichbare Verbrauchsdaten zugrunde liegen. Literaturwerte sind dazu in der Regel nur bedingt geeignet, da sich die hier zu findenden Verbräuche häufig auf unterschiedliche Messbedingungen (Fahrzeugbeladung, Streckentopographie, Geschwindigkeit, Witterungsbedingungen, etc.) beziehen.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden die Strecken- bzw. Systemverbräuche¹ der verschiedenen Antriebskonzepte als Jahresmittelwerte auf Basis von empirisch

ermittelten Verbrauchsfunktionen nach [21] und [22] bestimmt. Den Berechnungen liegt dabei eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 18,6 km/h, eine Zuladung von 1,5 t sowie eine ebene Streckentopographie zugrunde. Für AdBlue® wird ein Bedarf von 2 % des Streckenverbrauchs des Dieselmotors angenommen [15].

Tabelle 4 zeigt die berechneten Fahrzeug- und Systemverbräuche.

Tabelle 4: Übersicht der berechneten Fahrzeug- und Systemverbrauchswerte nach Antriebsart

	DIESEL	GAS	BATTERIE (ON)	BATTERIE (OC)	BRENNSTOFFZELLE
KENNGRÖSSEN					
Tank-/Ladewirkungsgrad	1,0	1,0	0,97	0,97	1,0
FAHRZEUGENERGIEBEDARF					
- in L/100 km	41,4	-	-	-	-
- in kg/100 km	-	37,7	-	-	8,0
- in kWh/100 km	406,2	474,6	118,8	114,8	266,6
SYSTEMENERGIEBEDARF					
- in kWh/100 km	406,2	474,6	122,5	118,4	266,6

FAHRZEUG- UND INFRASTRUKTURBEDARF

Der technologiespezifische Fahrzeug- und Infrastrukturbedarf wird aus den angenommenen Liniendaten und den berechneten Streckenverbräuchen abgeleitet.

Für Gas-, Diesel- und Brennstoffzellenbusse sowie gelegentlichladende batterieelektrische Busse wurde ein Bedarf von 6 Fahrzeugen ermittelt. Bei den depotladenden batterieelektrischen Bussen sind infolge der geringeren Fahrzeugreichweiten insgesamt 8 Fahrzeuge für den Linienbetrieb erforderlich.

Die benötigte Tank- und Ladeinfrastruktur orientiert sich an der Anzahl der Fahrzeuge. Sowohl für depotladende Busse als auch für gelegentlichladende Busse wird je ein Depot-Ladepunkt pro Fahrzeug mit einer Ladeleistung von maximal 75 kW angenommen. Im Falle der gelegentlichladenden Busse werden zusätzlich noch zwei Schnellladestationen an der Endhaltestelle – jeweils eine

für jede Fahrtrichtung – benötigt. Die Ladeleistung wurde hierbei mithilfe einer Energiebilanz auf 200 kW festgelegt.

Für Diesel-, Gas- und Brennstoffzellenfahrzeuge wird je eine Tankstelle mit einer Versorgungskapazität von 50 Bussen hinterlegt. Im Falle der Dieselmotors wird angenommen, dass die Tankstelle bereits existiert und kein Neubau erforderlich ist.

¹ Systemverbräuche berücksichtigen sowohl den Fahrzeugenergiebedarf als auch Lade- bzw. Tankverluste.

THG EMISSIONEN (WELL-TO-WHEEL-ANALYSE)

Die (Neu-)Regelung der CO₂-Flottengrenzwerte für Pkw [23] und Lkw [24] durch die Europäische Union sieht vor, dass für die Bewertung der Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr ausschließlich die lokal „auf der Straße“ anfallenden CO₂-Emissionen von Relevanz sind. Eine Unterscheidung zwischen fossilen und erneuerbaren Kraftstoffen findet aktuell nicht statt. Ebenso bleiben die Treibhausgasemissionen der Energie- bzw. Energieträgerbereitstellung unberücksichtigt, wodurch sich ein verzerrtes Bild bei der Bewertung der Klimawirkung verschiedener Antriebskonzepte ergibt. Der Well-to-Wheel-Ansatz bietet eine Möglichkeit, die tatsächliche Klimawirkung von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebstechnologien auf einer einheitlichen Basis zu vergleichen.

Vorgehensweise

Die Well-to-Wheel-Analyse berücksichtigt den energetischen Aufwand und somit die Treibhausgasemissionen der Kraftstoffbereitstellung und der Kraftstoffnutzung. Im Gegensatz zu einer vollständigen Ökobilanz gemäß ISO 14040 [25] und ISO 14044 [26] sind Bauvorleistungen, Wartungs- und Instandhaltungsprozesse sowie die Entsorgung von z. B. Abfallstoffen nicht Gegenstand des Well-to-Wheel-Betrachtungsrahmens¹ [27]. Ebenso beschränkt sich

die Methodik auf die Bestimmung der sog. CO₂-Äquivalent-Emissionen. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen werden aus den Emissionsanteilen der Treibhausgase Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffmonoxid (N₂O) berechnet und berücksichtigen dabei die unterschiedliche Klimawirkung dieser Verbindungen. CO₂ dient dabei als Bezugsgröße. Beispielsweise ist Methan 28-mal klimawirksamer als CO₂.

Die Durchführung von Well-to-Wheel-Analysen bei Transportdienstleistungen im Güter- und Personenverkehr wird in Deutschland durch die Norm DIN EN 16258 [28] beschrieben. Zur Bestimmung der Well-to-Wheel-Emissionen wird zunächst der Bilanzierungsrahmen festgelegt. Die Well-to-Wheel-Analyse umfasst grundsätzlich alle Aufwendungen, die innerhalb der Kraftstoffbereitstellungskette („vom Bohrloch bis zum Kraftstofftank“ – Well-to-Tank) und bei der Kraftstoffnutzung im Fahrzeug („vom Kraftstofftank bis zum Rad“ – Tank-to-Wheel) auftreten. Neben den Hauptprozessen, wie z. B. der Förderung, Aufbereitung und Bereitstellung der Rohstoffe oder der Produktion und Verteilung der Kraftstoffe, beinhaltet die Bilanzierung auch sämtliche stoff- und energieliefernden Nebenprozesse.

Abbildung 7 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Bestandteile einer beispielhaften Well-to-Wheel-Prozesskette für Gas- und Dieselmotoren.

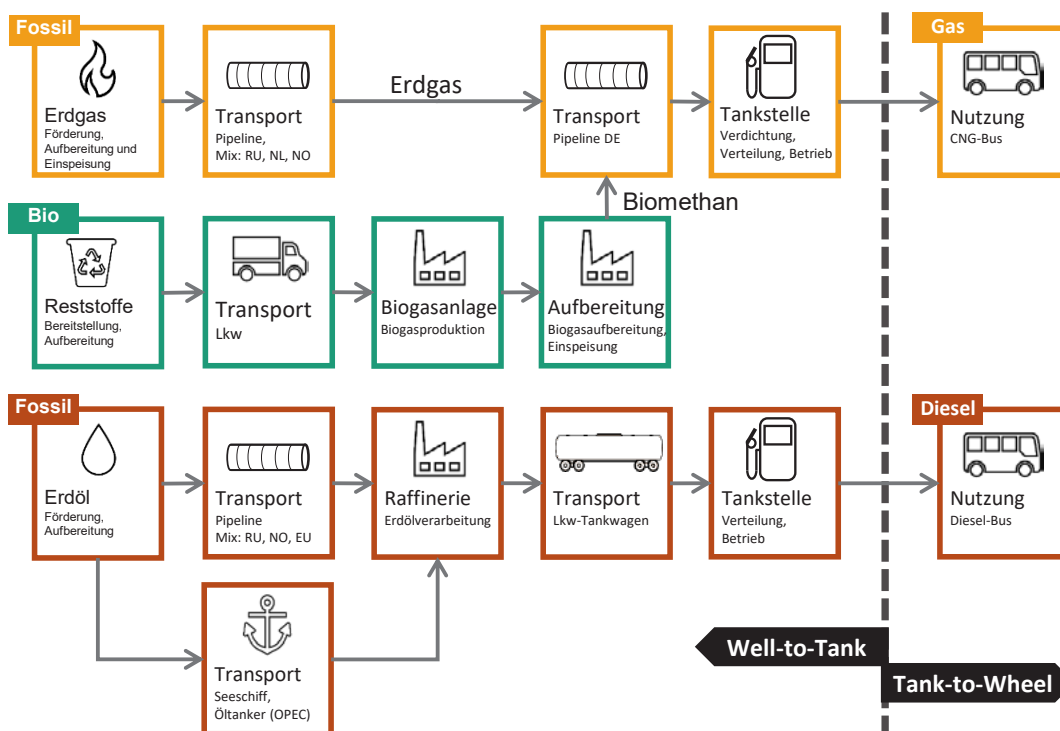


Abbildung 7: Bestandteile der Well-to-Wheel-Prozesskette bei Gas- und Dieselmotoren

¹ Diese Einschränkung stellt grundsätzlich einen Nachteil der Well-to-Wheel-Methodik dar, der zu einer Bevorteilung von batterieelektrischen Fahrzeugen führen kann. Demnach wird bei der Well-to-Wheel-Betrachtung ein eventueller Fahrzeugmehrbedarf bei der Bewertung der Klimawirkung eines Antriebskonzepts nicht berücksichtigt. Ebenfalls gehen die Aufwendungen für die Herstellung von Batterien und Brennstoffzellen in der Regel nicht in die Berechnung ein. Abhilfe schafft hier nur eine vollständige LCA (Live Cycle Assessment), die neben der Bereitstellung und dem Verbrauch der Energieträger auch sämtliche Materialvorketten berücksichtigt. Aufgrund beschränkter Datenverfügbarkeiten ist die Durchführung einer LCA häufig mit einem erheblichen Aufwand verbunden, der in den meisten Studien nicht geleistet werden kann.

Für die Well-to-Wheel Analyse wird für jeden der in *Abbildung 7* gezeigten Prozessbausteine eine Sachbilanz aufgestellt. Anhand dieser werden sämtliche energie-liefernden Input- und Output-Ströme (z. B. elektrische Energie, chemische Energie) sowie Hilfsstoffe und Hilfs-energien erfasst. Das Ergebnis dieser Bilanzierung wird üblicherweise in Bezug auf die sog. „funktionelle Einheit“ ausgewiesen. Hierbei handelt es sich um eine Bezugsgröße, die den bereitgestellten Nutzen eines Produktsystems beschreibt. Im Falle der hier betrachteten Linienbussysteme wird vereinfacht die erbrachte „Transportstrecke“ als funktionelle Einheit verwendet.

Die Sachbilanz entspricht damit einer Bestandsaufnahme der spezifischen Input- und Output-Daten. Unter Berücksichtigung der zugehörigen Emissionsfaktoren können mithilfe dieser Inventarisierung die spezifischen Treibhausgasemissionen des jeweils betrachteten Prozessschritts bestimmt werden. Die Summe der Treibhausgas-Emissionen der Einzelprozesse ergibt die Treibhausgas-Emissionen der Well-to-Wheel-Prozesskette.

Betrachtete Energiebereitstellungsketten

Für die Bewertung der Treibhausgas-Emissionen der betrachteten Linienbuskonzepte werden verschiedene Energieträgeroptionen berücksichtigt. Neben den (konventionellen) fossilen Energieträgern werden demnach auch die Treibhausgas-Minderungspotenziale von biogenen bzw. erneuerbaren Energieträgern bewertet. Im Falle von Gasbussen, wird beispielsweise neben fossilem Erdgas auch das heute bereits verfügbare Biomethan betrachtet. Weiterhin soll das mittel- bis langfristige Treibhausgas-minderungspotenzial von erneuerbarem Methan (E-Methan) geprüft werden (= Best Case „Methan“). Hierzu wird als exemplarisches Beispiel aus dem DVGW-Projekt G 201603 „Vergleichende Bewertung von PtX-Prozessen zur Bereitstellung von Kraftstoffen aus erneuerbaren Quellen“ [5] eine typische Power-to-Gas-Prozesskette zur Herstellung von E-Methan verwendet.

Bei den Brennstoffzellenbussen wird für die Wasserstoffbereitstellung sowohl eine Dampfreformierung von fossilem Erdgas als auch eine Wasserelektrolyse mit erneuerbarer elektrischer Energie (= Best-Case „Wasserstoff“) betrachtet. Ebenso werden den Ladevorgängen der batterieelektrischen Busse auf Basis von [29] über die Nutzungsdauer verschiedene Strommix-Szenarien hinterlegt, die den wachsenden Anteil an erneuerbarer Energie im deutschen Strommix bis 2030 berücksichtigen (40 % EE-Anteil in 2018, 50 % EE-Anteil in 2030). Zusätzlich wird als separates Szenario der Betrieb mit 100 % erneuerbarer elektrischer Energie betrachtet (Best Case „Strom“).

Ergebnisse

Die Berechnung der Well-to-Wheel-Emissionen wird auf Basis des festgelegten Linienbetriebsmusters für eine Fahrzeugnutzungsdauer von 12 Jahren und eine Fahrleistung von 62.100 km/(Bus*a) durchgeführt. Die Modelllinie wird von 6 Fahrzeugen bedient. Im Falle der depotladenden batterieelektrischen Busse (Batterie Overnight) werden infolge der geringeren Reichweite 2 zusätzliche Austausch-Fahrzeuge benötigt. Für den Fahrzeugenergiebedarf werden die berechneten Strecken- bzw. Systemverbräuche herangezogen. Bezogen auf die gewählte funktionelle Einheit (Transportstrecke) ergeben sich für die betrachteten Linienbussysteme die in *Abbildung 8* dargestellten Well-to-Wheel-Emissionen.

Die Well-to-Wheel-Analyse zeigt, dass der Linienbetrieb mit batterieelektrischen Bussen und Brennstoffzellenbussen gegenüber Euro VI-Diesalbussen aufgrund der höheren Antriebsstrangeffizienz deutlich geringere Well-to-Wheel-Emissionen aufweist. Bei den batterieelektrischen Bussen liegen die Treibhausgas-Einsparungen mit 0,55 kg/km bzw. 0,56 kg/km bei etwa 55 %. Werden Mild-Hybrid-Diesalbuse eingesetzt, reduziert sich der Emissionsvorteil der batterieelektrischen Busse auf etwa 48 %. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Treibhausgas-Rucksack der Batterieproduktion nicht in die Bilanz einfließt. Insbesondere bei depotladenden Bussen (Batterie Overnight) ist infolge des höheren Fahrzeugbedarfs mit einer höheren Klimawirksamkeit des Linienbussystems zu rechnen.

Im Falle der Brennstoffzellenbusse werden bei der Verwendung von Wasserstoff aus Erdgas (via Dampfreformierung) Treibhausgas-minderungen von ca. 40 % gegenüber dem Dieselsystem erreicht. Mit fossilem Erdgas betriebene Gasbusse erreichen dagegen mit 1,16 kg/km nur ein vergleichsweise geringes Treibhausgas-Einsparpotenzial. Durch den Einsatz von Mild-Hybrid-Gasbussen können die Treibhausgasemissionen auf 1,01 kg/km gesenkt werden.

Die Klimawirkung der batterieelektrischen Busse ist stark abhängig vom Anteil an erneuerbarer elektrischer Energie im deutschen Strommix. Wird ausschließlich erneuerbare elektrische Energie für die Ladevorgänge verwendet, sind die batterieelektrischen Busse gemäß der Well-to-Wheel-Methodik treibhausgasneutral.

Ebenso wie bei batterieelektrischen Bussen lassen sich auch bei den Brennstoffzellenbussen erhebliche Treibhausgas-minderungen erzielen, sofern für die Bereitstellung des Wasserstoffs ausschließlich erneuerbare elektrische Energie verwendet wird. Die Treibhausgasemissionen der Brennstoffzellenbusse werden in diesem Fall auf nahezu 0 reduziert. Die in *Abbildung 8* gezeigten „Rest-Emissionen“

Well-to-Wheel-Emissionen

in kg CO₂-Äquivalente/km

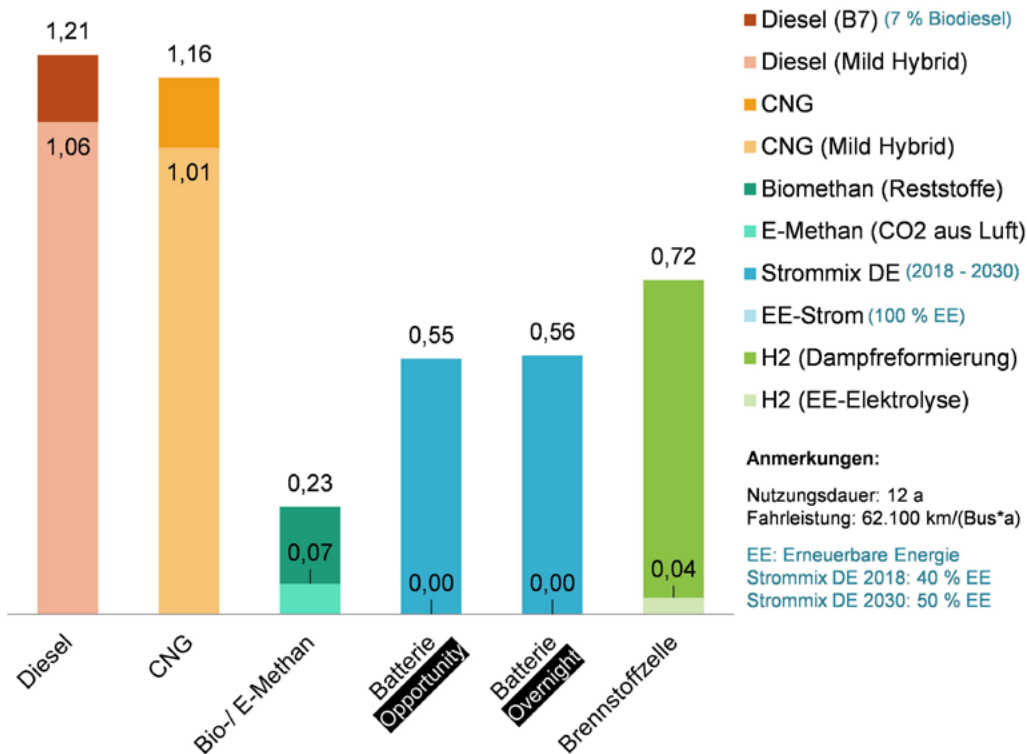


Abbildung 8: Well-to-Wheel-Emissionen des Linienbetriebs nach Antriebsart (ohne Batterie- und Fahrzeugherstellung)

von 0,04 kg/km sind auf die Tankstelle bzw. die Kompression zurückzuführen, die jeweils mit Netzstrom betrieben werden.

Im Gegensatz zu batterieelektrischen Bussen und Brennstoffzellenbussen bieten Gasbusse bereits heute die Möglichkeit, einen nahezu treibhausgasneutralen Linienbetrieb zu etablieren. Die Voraussetzung dafür ist die Verwendung von Biomethan als Kraftstoff. Werden Gasbusse ausschließlich mit Biomethan betrieben, fallen die Well-to-Wheel-Emissionen des Linienbetriebs gegenüber dem konventionellen Dieselsystem um 81 % geringer aus (0,23 kg/km). Zusätzliche Einsparpotenziale ergeben sich durch den Einsatz von Mild-Hybrid-Fahrzeugen, die infolge der verbesserten Antriebsstrangeffizienz die Emissionen um weitere 13 % senken. Mittelfristig stehen mit der Einführung der Power-to-Gas-Technologie zudem weitere Kraftstoffoptionen zur Verfügung, die einen treibhausgasneutralen Gasbusbetrieb ermöglichen. Die Treibhausgasemissionen sind in diesem Fall vergleichbar mit Batterie- und Brennstoffzellenbussen, die ausschließlich mit erneuerbarer elektrischer Energie bzw. erneuerbarem Wasserstoff betrieben werden.

TOTAL COST OF OWNERSHIP (TCO)

Der wirtschaftliche Vergleich der betrachteten Linienbuskonzepte erfolgt auf Basis eines Total-Cost-of-Ownership-Ansatzes. Hierbei handelt es sich um eine Methode der Kostenrechnung, die sämtliche Kosten und Folgekosten eines Produkts bzw. einer Dienstleistung (hier: Personentransport) berücksichtigt und so einen einheitlichen Kostenvergleich zwischen verschiedenen Technologien ermöglicht.

Vorgehensweise

Die Kostenbetrachtung erfolgt mit Hilfe der Annuitätenmethode. Berücksichtigt werden die Investitions- bzw. Kapitalkosten der Fahrzeuge und der (Lade-)Infrastruktur, die Kosten für den Austausch von Batterien und Brennstoffzellen (Ersatzbeschaffungen), Wartungs- und Instandhaltungskosten, Fahrpersonalkosten sowie die Kosten für Betriebsstoffe (Kraftstoffe, elektrische Energie, AdBlue®) (s. Abbildung 9).

Zusätzlich werden auf Basis der EU-Richtlinie 2009/33/EG (Clean Vehicles Directive) bzw. dem daraus hervorgegangenen § 68 der Verordnung über die Vergabe öffentlicher Aufträge (Vergabeverordnung, VgV) [31] die Emissionen von Schadstoffen und Treibhausgasen monetarisiert.

Sonstige Kosten wie z. B. Gemein- oder Versicherungskosten werden im Rahmen dieser Studie vernachlässigt. Es wird angenommen, dass zwischen diesen Kostenelementen keine technologiespezifischen Unterschiede bestehen.

Annahmen

Für die Berechnung der Gesamtkosten des Linienbetriebs wird von einer Fahrzeugbeschaffung im Jahr 2018 ausgegangen. Die Fahrzeugnutzungsdauer wird auf 12 Jahre festgelegt. Für die Infrastruktur werden 24 Jahre angenommen. Der verwendete Diskontsatz beträgt 5 %/a.

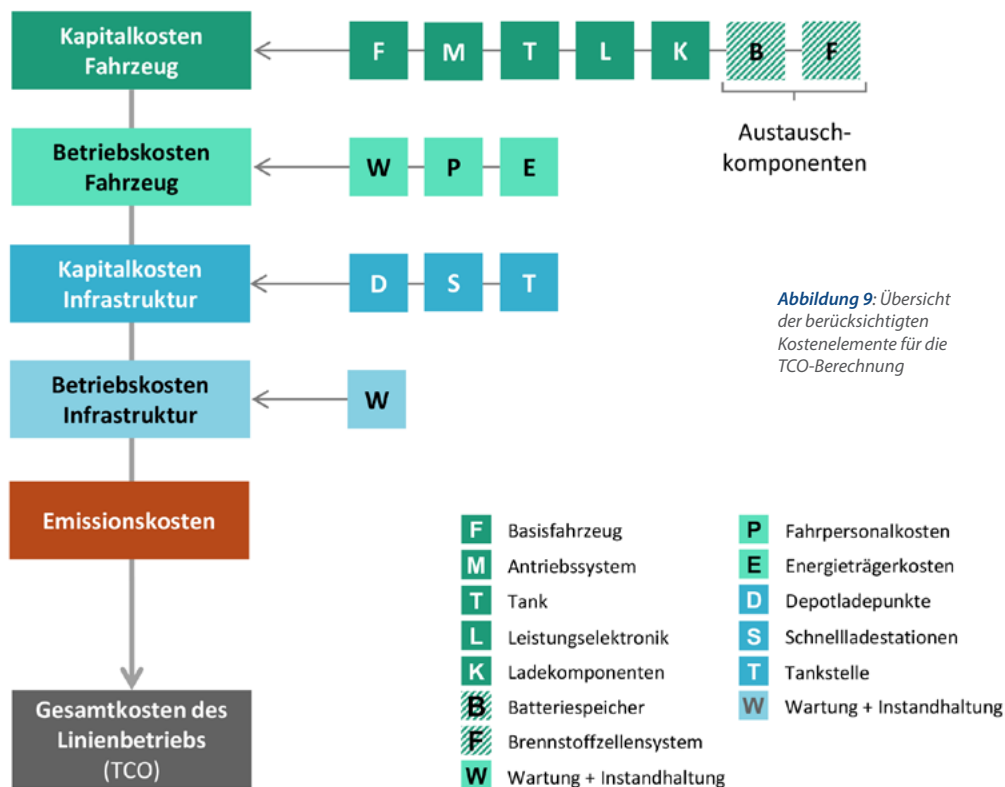
Die Bestimmung der Fahrzeugkosten erfolgt auf Basis eines „Bottom-up“-Ansatzes. Das bedeutet, dass die Busse zunächst in ihre technologiespezifischen Komponenten unterteilt werden. Technologieunabhängige Fahrzeugbestandteile werden dabei in der Position „Basisfahrzeug“ zusammengefasst. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass die abgeleiteten Kosten einerseits unabhängig von der aktuellen Marktsituation sind und andererseits eine komponentenspezifische Kostenentwicklung berücksichtigt werden kann.

Den verwendeten Batterien und Brennstoffzellen wird auf Basis von Literaturwerten eine mittlere Lebensdauer von 6 bzw. 4 Jahren zugrunde gelegt [22, 32–34]. Zusätzlich

wird angelehnt an [22] und [35] eine einheitliche Kosten-degression von 8 %/a angenommen. Zum Zeitpunkt des Batterie- oder Brennstoffzellenwechsels fallen gegenüber dem Ausgangsjahr demnach deutlich geringere Kosten für die jeweiligen Ersatzbeschaffungen an.

Für die Berechnung der Energieträger- und AdBlue®-Kosten werden typische Tankstellenpreise aus dem Jahr 2018 verwendet (Diesel: 1,28 €/L, CNG: 1,10 €/kg, Biome-
than: 1,20 €/kg, AdBlue®: 0,59 €/L). Den batterieelektrischen Bussen wird der durchschnittliche Strompreis für Industriekunden im Jahr 2018 zugrunde gelegt (0,1642 €/kWh, ohne Stromsteuer). Für den Betrieb mit erneuerbarer elektrischer Energie werden auf Basis eines Preisvergleichs von Ökostrom- und Netzstromtarifen für Industriekunden Mehrkosten von 3 % angenommen. Sämtliche Preise wurden anschließend um die Mehrwertsteuer bereinigt und die jeweils geltenden ÖPNV-Energiesteuerentlastungen berücksichtigt, die sich aus § 56 EnergieStG bzw. § 9c StromStG ergeben. Im Falle von Wasserstoff wird der von der Clean Energy Partnership (CEP) in Anlehnung an die Preise konventioneller Flüssigkraftstoffe festgelegte Bezugspreis von 9,50 € je kg angesetzt.

Die Energieträgerpreise sind über den betrachteten Nutzungszeitraum nicht konstant. Aus diesem Grund wird für jeden einzelnen Energieträger eine Kostenentwicklung



hinterlegt, die sich an der Energiereferenzprognose [36] bzw. im Falle von Wasserstoff an Trendszenarien nach [37] orientiert und gleichzeitig den zunehmenden Anteil an erneuerbarer elektrischer Energie im deutschen Strommix bzw. bei der Produktion von Wasserstoff berücksichtigt. Abweichend davon wird für Biomethan und AdBlue® ein konstanter Preisanstieg von 2 %/a angenommen.

Für erneuerbaren Wasserstoff und erneuerbares Methan aus Power-to-Gas-Prozessen wurde aufgrund der aktuellen Unwägbarkeiten hinsichtlich der Preisniveaus und der Preisentwicklung keine TCO-Berechnung durchgeführt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Bezugspreise zunächst deutlich über den Preisen von fossilem Wasserstoff bzw. Methan und Biomethan liegen.

Die Kosten für das Fahrpersonal werden in Anlehnung an [38] pauschal auf 80.000 €/Bus*a festgelegt. Vereinfacht wird davon ausgegangen, dass für depotladende batterieelektrische Busse trotz des Fahrzeugmehrabbedarfs nicht mehr Personal für den Linienbetrieb benötigt wird. Das

bedeutet, dass der zusätzliche Zeitaufwand, der für den Austausch der Busse zu erbringen ist (Leerfahrten zum Depot), bei der Berechnung der Personalkosten vernachlässigt wird.

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Fahrzeuge und Infrastruktur basieren auf den Annahmen von [22]. Die Kosten berücksichtigen sowohl den benötigten Personal- als auch den Materialeinsatz und sind über eine Nutzungsdauer von 12 Jahren gemittelt.

Ergebnisse

In *Abbildung 10* ist die ökonomische Gesamtbewertung der betrachteten Linienbussysteme (Fahrzeuge und Infrastruktur) für den Beschaffungszeitpunkt 2018 und eine Fahrzeugnutzungsdauer von 12 Jahren dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass Gasbusse für die betrachteten Betriebsbedingungen mit 2,75 €/km bzw. 2,78 €/km bei Verwendung von Biomethan ähnliche Kosten wie Euro VI-Dieselsbusse (2,70 €/km) aufweisen.

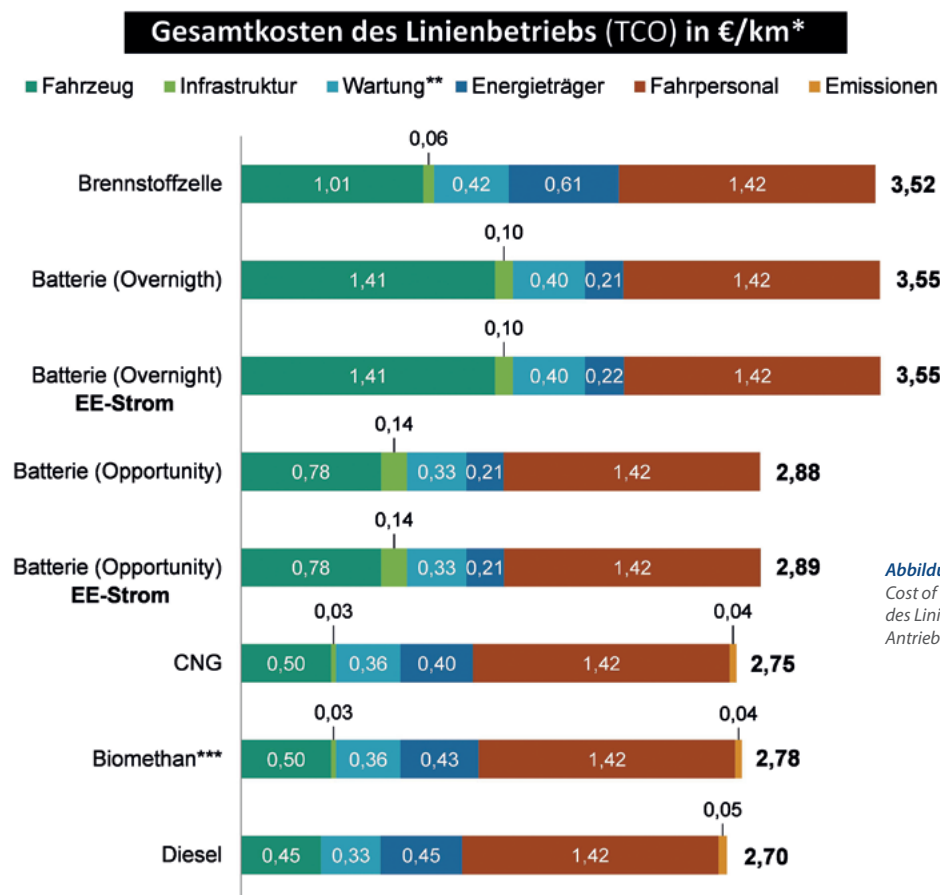


Abbildung 10: Total Cost of Ownership (TCO) des Linienbetriebs nach Antriebsart

* Fahrzeugnutzungsdauer: 12 a, Fahrleistung, 62.100 km/(Bus*a), Fahrzeugbedarf: 6 (+2 für depotladende Busse)

** beinhaltet Fahrzeuge und Infrastruktur

*** Aufgrund des Tank-to-Wheel-Ansatzes werden Biokraftstoffe nach § 68 VgV bei der Monetarisierung der Emissionen wie fossile Kraftstoffe behandelt

Deutlich höhere Gesamtkosten sind bei den batterieelektrischen Bussen und den Brennstoffzellenbussen festzustellen. Die kostengünstigste Batteriebusvariante stellen die gelegentlichladenden Busse (Batterie Opportunity) dar, die gegenüber dem konventionellen Dieselsystem nur um etwa 7 % höhere TCO aufweisen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in dieser Studie eine eventuell erforderliche Ertüchtigung der Netze vernachlässigt wird, was in diesem Punkt einer Best-Case-Betrachtung entspricht. Zu beachten ist außerdem, dass gelegentlichladende batterieelektrische Busse entsprechend der zugrundeliegenden Ladestrategie im Vergleich zu den anderen Antriebskonzepten eine deutlich eingeschränkte Flexibilität aufweisen (s. Exkurs „Ladekonzepte bei batterieelektrischen Bussen“).

Für das depotladende batterieelektrische Bussystem (Batterie Overnight) liegen die Gesamtkosten im Vergleich zu konventionellen Dieselsystemen mit 3,55 €/km um 31 % höher, was u. a. auf den erhöhten Fahrzeugbedarf (+ 2 Fahrzeuge) zurückzuführen ist. Der berechnete Mehrbedarf an Bussen berücksichtigt dabei ausschließlich die geforderte Tagesfahrleistung bzw. Reichweite. Ein zusätzlicher Fahrzeug- und Personalbedarf, der insbesondere zu Stoßzeiten aufgrund der geringeren Fahrgastkapazitäten (vgl. Tabelle 2) auftreten kann, wurde in der Berechnung nicht betrachtet. Je nach Fahrgastaufkommen und Linienauslastung können die Gesamtkosten des Linienbetriebs daher noch höher ausfallen.

Werden Brennstoffzellenbusse für den Linienbetrieb eingesetzt, liegen die TCO mit 3,52 €/km in einem ähnlichen Bereich wie bei den depotladenden Bussen. Im Vergleich zum Dieselsystem ist der Linienbetrieb mit Brennstoffzellenbussen um etwa 30 % teurer. Brennstoffzellenbusse stellen damit zusammen mit den depotladenden batterieelektrischen Bussen das teuerste alternative Antriebskonzept dar.

Die nähere Betrachtung der Kostenstrukturen zeigt, dass sich insbesondere bei den Kapitalkosten und den Kosten für Energieträger (inkl. AdBlue®) Unterschiede ergeben, während annahmebedingt die spezifischen Fahrpersonalkosten für alle Systeme identisch sind. Demnach weist der Einsatz von Dieselsystemen aufgrund der niedrigen Fahrzeugkosten und der nicht berücksichtigten Kosten für die Tankinfrastruktur insgesamt die geringsten Kapitalkosten auf. Gegenüber Gasbussen wird der Kostenvorteil jedoch teilweise durch die höheren Energieträgerkosten bzw. die zusätzlichen Kosten für AdBlue® und die höheren Emissionskosten nach § 68 VgV ausgeglichen.

Bei den batterieelektrischen Bussen sind die Kapitalkosten aufgrund der kostenintensiveren Fahrzeuge, des erforderlichen Batterieaustauschs nach 6 Jahren und der

aufwändigeren Infrastruktur deutlich höher und stellen neben den Fahrpersonalkosten den Hauptbestandteil der Gesamtkosten dar. Der Hauptvorteil der batterieelektrischen Busse ist die hohe Effizienz des Antriebsstrangs und die daraus resultierenden geringen Energieträgerkosten, die im Vergleich zum Dieselsystem um etwa 50 % reduziert sind. Durch den geringen Anteil der Energieträgerkosten an den Gesamtkosten üben die (angenommenen) Mehrkosten für den Bezug von EE-Strom zudem nahezu keinen Einfluss auf die TCO der Elektrobusse aus. Darüber hinaus müssen aufgrund der lokalen Emissionsfreiheit keine Emissionskosten berücksichtigt werden.

Beim Linienbetrieb mit depotladenden Bussen (Batterie Overnight) fallen die Fahrzeug-Kapitalkosten im Vergleich zu den gelegentlichladenden Bussen (Batterie Opportunity) aufgrund der größeren Batteriekapazitäten und des Fahrzeugmehrbedarfs um ca. 81 % höher aus. Die Infrastrukturaufwendungen sind aufgrund der nicht benötigten Schnellladepunkte dagegen um etwa 30 % geringer.

1 Der EE-Anteil im Strommix-Szenario 2020 entspricht mit 39,8 % in etwa dem EE-Anteil des deutschen Nettostrommix im Jahr 2018 (40,2 %) [37]

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der Einsatz von batterieelektrischen Bussen und Brennstoffzellenbussen ist aktuell ohne eine hohe Förderung nicht wirtschaftlich umsetzbar. Gegenüber konventionellen Dieselnissen liegen die Kosten pro gefahrenem Kilometer um 7 % bis 31 % höher. Die Kosten für einen eventuell erforderlichen Stromnetzausbau sind dabei noch nicht berücksichtigt. Gasbusse bieten dagegen schon heute eine umweltfreundliche und ausgereifte Alternative, mit vergleichbaren Kosten zu konventionellen Dieselnissen.

Gegenüber Euro VI-Dieselnissen weisen moderne Gasbusse deutlich geringere Stickoxid-, Partikel- und Lärmemissionen auf. Gleichzeitig können durch den Einsatz von Biomethan die Treibhausgasemissionen um ca. 80 % reduziert werden. Die Mehrkosten bei der Verwendung von Biomethan sind im Vergleich zu fossilem CNG mit ca. 1 % dabei nahezu vernachlässigbar. Mittelfristig steht Gasbussen durch die Bereitstellung von E-Methan zudem ein vollständig treibhausgasneutraler Kraftstoff zur Verfügung, der die zukünftigen Anforderungen an einen klimaneutralen Linienbusbetrieb vollumfänglich erfüllen kann.

Gasbusse können damit schon heute einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen und zur Verbesserung der Luftqualität in Ballungsgebieten leisten. Durch die geringen Mehrkosten gegenüber modernen Dieselnissen stellen Gasbusse für Busbetreiber und Kommunen derzeit die kosteneffizienteste Minderungsoption für globale und lokale Emissionen im öffentlichen Personennahverkehr mit Bussen dar. Im Vergleich zu batterieelektrischen Bussen sind sie zudem deutlich einfacher in das bestehende Liniensystem zu integrieren.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, „VDV-Statistik 2017“, Okt. 2018. [Online] Verfügbar unter: <https://www.vdv.de/vdv-statistik-2017.pdf?forced=true>. Zugriff am: Apr. 26 2019.
- [2] Zukunft ERDGAS e. V., „Vorfahrt für saubere Technologien: Antriebe für den ÖPNV im Kosten- und Umweltvergleich“, Zukunft ERDGAS e. V., Berlin, 2018. [Online] Verfügbar unter: https://zukunft.erdgas.info/fileadmin/public/PDF/Politischer_Rahmen/Summary_Busstudie-OEPNV.pdf. Zugriff am: Mrz. 26 2019.
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Hg., „Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung“, Nov. 2016.
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und www.bmu.de, „Klimaschutz in Zahlen (2018) – Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik“, 2018.
- [5] M. Heneka, W. Köppel, N. Trudel, S. Bajohr und T. Henrich, „Vergleichende Bewertung von PtX-Prozessen zur Bereitstellung von Kraftstoffen aus erneuerbaren Quellen“, Bonn, 2018.
- [6] Deutsche Energie-Agentur GmbH, Einsatzgebiete für Power Fuels: ÖPNV & öffentliche Flotten. [Online] Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/181123_dena_PtX-Factsheets.pdf.
- [7] MAN Truck & Bus AG, „Handbuch der MAN Gastechologie: Erdgasantrieb - Echtes Know How“, 2014. [Online] Verfügbar unter: www.mantruckandbus.com. Zugriff am: Mrz. 26 2019.
- [8] Umweltbundesamt, Schwere Nutzfahrzeuge: Grenzwerte Schadstoffemissionen LKW Busse. [Online] Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/schwerenutzfahrzeuge>. Zugriff am: Mrz. 01 2018.
- [9] S. Feldpausch-Jägers, N. Lefort, M. Henel, J. Ruf und W. Köppel, „Potentialanalyse LNG - Einsatz von LNG in der Mobilität: Schwerpunkte und Handlungsempfehlungen für die technische Umsetzung“, Bonn, 2016.
- [10] P. Hendrickx, „LNG/LBG ist die einzige nachhaltige und wirtschaftliche Alternative zu Dieselmotoren im Güterfernverkehr“, April 2015.
- [11] LNG Task Force, „LNG Heavy Duty trucks Case Studies: Informal Document for the 104th meeting of group of experts on general safety“, United Nations, Genf, Apr. 2012.
- [12] MAN Truck & Bus AG, Perfekte Technologie: der neue MAN Lion's City. | MAN Bus Deutschland. [Online] Verfügbar unter: <https://www.bus.man.eu/de/de/stadtbusse/lions-city-18/technologie/Technologie.html>. Zugriff am: Jun. 06 2019.
- [13] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., Interaktive Karte „Gas kann grün“. [Online] Verfügbar unter: <https://www.bdew.de/energie/erdgas/interaktive-karte-gas-kann-gruen/>. Zugriff am: Mai. 02 2019.
- [14] Mercedes-Benz, Citaro: Technische Daten. [Online] Verfügbar unter: https://www.mercedes-benz-bus.com/de_DE/models/citaro/facts/technical-data.html. Zugriff am: Mai. 02 2019.
- [15] Wolfgang Tschakert, „Den würde ich sofort nehmen: Mit aufwändiger Euro-6-Technik soll der Mercedes-Bestseller rund acht Prozent weniger als sein Euro-5-Vorgänger verbrauchen – sagt der Hersteller und stellt sich unserem Test.“
- [16] Mercedes-Benz, Citaro NGT: Technische Daten. [Online] Verfügbar unter: https://www.mercedes-benz-bus.com/de_DE/models/citaro-ngt/facts/technical-data.html. Zugriff am: Mai. 02 2019.
- [17] C. Bünnagel, „Erdgas die wirtschaftliche Alternative?“ in Busmagazin.
- [18] Mercedes-Benz, Der neue eCitaro: Technische Daten. [Online] Verfügbar unter: https://www.mercedes-benz-bus.com/de_DE/models/ecitaro/facts/technical-data.html. Zugriff am: Feb. 01 2019.
- [19] Mercedes-Benz, Hg., „Der neue eCitaro: Bereit für die Stadt von morgen“, Stuttgart, 2018. [Online] Verfügbar unter: <https://www.mercedes-benz-bus.com/content/dam/mbo/markets/common/buy/services-online/download-product-brochures/images/content/regular-service-buses/ecitaro/MB-EC-1-DE-0818.pdf>. Zugriff am: Mai. 02 2019.
- [20] K. Müller, F. Schnitzler, S. Skiker und O. Madeline, „Clean Hydrogen in European Cities (CHIC): Final Report“, Feb. 2017.
- [21] R. Pütz, Modell zur ökologischen und ökonomischen Analyse und strategischen Optimierung von Linienbusflotten. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2010. Düsseldorf: Alba-Verl., 2010.
- [22] Alexander W. Kunith, Elektrifizierung des urbanen öffent-

- lichen Busverkehrs: Technologiebewertung für den kosteneffizienten Betrieb emissionsfreier Bussysteme. Springer Vieweg, 2017.
- [23] Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen: (EG) 443/2009, 2009.
- [24] Europäische Kommission, Saubere Mobilität: Schluss mit umweltschädigenden Lastkraftwagen. Kommission begrüßt erste EU-Norm zur Verringerung der Schadstoffbelastung durch Lastkraftwagen. Brüssel, 2019.
- [25] DIN EN ISO 14040:2009-11, Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO_14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_14040:2006, 2009.
- [26] DIN EN ISO 14044:2018-05, Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Anforderungen und Anleitungen (ISO_14044:2006_ + Amd_1:2017); Deutsche Fassung EN_ISO_14044:2006_ + A1:2018, 2018.
- [27] R. Edwards, J.-F. Larivé, D. Rikeard und W. Weindorf, „Well-to-Tank Report Version 4.a: Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context“, Institute for Energy and Transport, Luxembourg, 2014. [Online] Verfügbar unter: http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/about-jec/files/documents/report_2013/wtt_report_v4_july_2013_final.pdf. Zugriff am: Apr. 18 2017.
- [28] DIN EN 16258:2013-03, Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr); Deutsche Fassung EN_16258:2012, 2013.
- [29] J. Nitsch, „Die Energiewende nach COP 21 - Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung: Kurzstudie für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V.“, Stuttgart, Feb. 2016. [Online] Verfügbar unter: https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Joachim_Nitsch_Energiewende_nach_COP21.pdf. Zugriff am: Mai. 03 2019.
- [30] Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2018. [Online] Verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/Stromerzeugung_2018_3.pdf. Zugriff am: Jun. 13 2019.
- [31] Verordnung über die Vergabe öffentlicher Aufträge: VgV, 2016.
- [32] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., „Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV“, Dez. 2015. Zugriff am: Feb. 14 2019.
- [33] Florian Hacker, Rut von Waldenfels und Moritz Mottschall, „Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen: Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO₂-Minderung“, Öko-Institut e.V., Apr. 2015. Zugriff am: Mrz. 26 2019.
- [34] Patrick Landerl, „Status and Future Perspectives of Electric Buses in Urban Public Transport An assessment of existing projects, state of technology and economic aspects“, 2017.
- [35] S. Altenburg et al., „Nullemissionsnutzfahrzeuge: Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative“, Stuttgart, Okt. 2017. [Online] Verfügbar unter: https://www.e-mobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/PDF_2017/NFZ-Studie.pdf. Zugriff am: Apr. 09 2018.
- [36] M. Schlesinger, D. Lindenberger und C. Lutz, „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“, Basel, Köln, Osnabrück, Aug. 2010. [Online] Verfügbar unter: https://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/100827_Prognos_Studie_Energieszenarien_fuer_ein_energiekonzept_der_Bundesregierung.pdf. Zugriff am: Apr. 23 2018.
- [37] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), „Ein Portfolio von Antriebssystemen für Europa: Eine faktenbasierte Analyse: Die Rolle von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen, Plug-in Hybridfahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen“. Zugriff am: Mrz. 26 2019.
- [38] Roland Berger, „Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe: A Study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking“, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), Sep. 2015. [Online] Verfügbar unter: https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/150909_FINAL_Bus_Study_Report_OUT_0.PDF. Zugriff am: Mrz. 26 2019.

KLIMANEUTRAL DURCH AUGSBURG

swa-BUSSE IM EINSATZ von Klaus Röder

Die Busse der Stadtwerke Augsburg (swa) sind klimaneutral unterwegs. Sie fahren mit Biomethan und sind somit CO₂-neutral. Die swa übernehmen damit eine bundesweite Vorreiterrolle. Sie sind in Deutschland der erste großstädtische Verkehrsbetrieb mit einer reinen Gasbusflotte.



Abbildung 1: Biomethanbus in Augsburg (Quelle: Stadtwerke Augsburg)

Bereits im Jahr 1995 wurden die ersten Weichen für den Gasantrieb im damaligen Werkausschuss gelegt. Unterstützt wurde die Entscheidung von einer Initiative der damaligen schwarz-gelben Bundesregierung. Unter dem Titel „Modellhafter Einsatz von Gasfahrzeugen“ im Rahmen des „Investitionsprogramms zur Verminderung von Umweltbelastungen“ sollte in Deutschland der Markt für Gasfahrzeuge angereizt und ausgebaut werden. 47 Städte und Gemeinden hatten sich neben Augsburg damals um die Teilnahme an dem Projekt beworben. In der Kategorie „Verdichtungsraum“ erhielt dann Augsburg den Zuschlag. Und damit begann eine Entwicklung in der Fuggerstadt, die bis heute einmalig in Deutschland ist.

1996 wird Augsburg zur Modellstadt für Busse, die mit Gas betrieben werden. 2006 wird im Rahmen des Luftreinhalteplans eine OB-Verfügung verabschiedet, die die vorrangige Beschaffung von Gasfahrzeugen vorsieht. 2010 ist es dann so weit: in Augsburg fahren die Busse mit 100 Prozent Erdgas, im Jahr darauf zu 100 Prozent mit Biomethan.

Der Übergang von Erdgas zu Biomethan verlief in zwei Schritten. Zunächst wurde eine Beimischung von Biomethan ausprobiert. Nachdem man ein halbes Jahr später keine negativen Auswirkungen auf Betrieb und Instandhaltung festgestellt hatte, wurde das fossile Erdgas komplett gestrichen und die Stadtwerke Augsburg sattelten komplett auf Biomethan um. Seitdem fahren

sämtliche Busse sowie Müllwagen in Augsburg damit.

DEUTSCHLANDS UMWELTFREUNDLICHSTE BUSFLOTTE

Durch die Nutzung von Biomethan fahren die swa-Busse CO₂-neutral. Es wird bei der Verbrennung so viel CO₂ freigesetzt, wie die Pflanze zuvor gebunden hat. Erzeugt wird das in Augsburg genutzte Biomethan aus agrarischen Reststoffen wie Schlempe, Stroh oder Bruchholz. Durch die Nutzung werden Stickoxide in der Luft deutlich verringert und auch keine Rußpartikel in die Umwelt abgegeben. Ein weiterer Vorteil: Die Gasmotoren der swa-Busse sind geräuscharm und erzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Diesel-Bussen weniger Lärmemissionen. Eingespeist wird das Biomethan von der örtlichen Abfallverwertung in das swa-Gasnetz. Zusätzlich erzeugt die Firma Verbio AG Biomethan aus agrarischen Reststoffen, das von den Stadtwerken Augsburg für die Busflotte genutzt wird.

Seit Dezember 2018 sind sechs neue Biomethanbusse, die auf den Augsburger Straßen im Einsatz sind, noch zusätzlich mit einem Hybridmodul ausgestattet. Ein Elektromotor unterstützt den Verbrennungsmotor beim Anfahren, entlastet somit den Verbrennungsmotor, was zu einer Kraftstoffverbrauchsreduzierung von bis zu 8,5 % führt. Die dafür nötige elektrische Energie liefern zwei zusätzliche Speichereinheiten (Supercaps), die auf dem Dach des Fahrzeugs angeordnet sind. Bei der Bremsverzögerung des Fahrzeugs generiert der Elektromotor elektrische Energie und speichert diese in den beiden Supercaps. Diese neue Funktion macht die sowieso schon umweltfreundlichen Fahrzeuge noch besser. Dass die neuen Busse besonders umweltschonend unterwegs sind, wurde bereits in einer Studie bestätigt. Im Praxistest hatte das Institut für Angewandte Nutzfahrzeugforschung und Abgasanalytik (Belicon) an der Hochschule Landshut deutlich geringere Abgaswerte mit Stickoxiden oder Kohlenstoffdioxid gemessen als bei allen anderen Motortypen.

LANGE LAUFLEISTUNG VON BIOMETHANBUSSEN

Die Erfahrungen in der swa-Buswerkstatt zeigen, dass Biomethanbusse eine bewährte Technik mit sich bringen. Laufleistungen von 700.000 bis 800.000 Kilometer werden

ohne Schäden problemlos erreicht. Die Busse waren zum Teil bis zu 17 Jahre im Einsatz. Die Betankung der 84 Busse ist eine organisatorische Herausforderung, die durch den Einsatz von zwei leistungsstarken CNG-Zapfsäulen (CNG: Compressed Natural Gas) sichergestellt wird. Bis der Tank voll ist dauert es ungefähr fünf bis sieben Minuten. Durch zwei große CNG-Röhrenspeicheranlagen sowie zwei redundante Kompressoren-Stationen, die dafür sorgen, dass der Druck im Speicher nie unter 200 bar fällt, ist dieses Rekordtempo möglich.

BIOMETHAN: SOFORT VERFÜGBARER UMWELTSCHUTZ

Wie die Feinstaubbelastung in der Stadt ohne die Biomethan-Offensive der Stadtwerke Augsburg heute aussehen würde, lässt sich nur spekulieren. Berechnen kann man jedoch wie viele Tonnen CO₂ pro Jahr durch den Einsatz von Biomethan im Vergleich zu einer herkömmlichen Diesel-Flotte eingespart werden: 6.500 Tonnen CO₂. Allein jeder der 84 Busse legt am Tag eine Strecke von 300 bis 400 Kilometer ohne Nachtanken zurück. Hinzu kommen die 200 Service Fahrzeuge der swa, 18 Müllwagen, 34 Fahrzeuge der Stadtreinigung und 50 Taxen.

DIE WELT SCHAUT NACH AUGSBURG

Nachdem Augsburg die einzige Großstadt in Deutschland ist, in der ausschließlich Busse fahren, die mit Biomethan betrieben werden, ist klar, dass die Stadt als Vorbild gilt. Zahlreiche Besuchergruppen von anderen Verkehrsbetrieben aus dem In- und Ausland sind bereits nach Augsburg gekommen, um sich das Modell und die benötigte Infrastruktur erklären zu lassen. Von Nürnberg, Marburg über England, Griechenland, Holland oder gar Abu Dhabi. „Wir sind stolz auf unsere Vorreiterrolle, die wir mit unserer Busflotte über die Stadtgrenze hinaus haben. Wir haben durch die Nutzung von Biomethan die ökologisch bestmögliche, nachhaltigste Antriebsart, die im Moment verfügbar ist“, so swa-Geschäftsführer Dr. Walter Casazza. Mit dem Konzept der Biomethanbusse haben die Stadtwerke Augsburg bereits Umweltpreise gewinnen können: den ADAC-Bayern Mobilitätspreis 2012, den Internationalen Busplaner Nachhaltigkeitspreis 2017 sowie 2017 die

Auszeichnung der Stadt Augsburg als Energie-Kommune durch die Berliner Agentur für Erneuerbare Energien.

GAS ZAHLT SICH AUS

Viele Fahrzeughersteller bieten Gasfahrzeuge ab Werk an – die Auswahl ist also größer, als mancher vielleicht vermutet. Und sie sind nicht wesentlich teurer als Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben – und diese Mehrkosten sind dank der Ersparnis an der Zapfsäule schnell wieder drin. Mindestens bis zum Jahr 2026 tankt man weiterhin günstig, denn der ermäßigte Steuersatz für Erdgas wurde bis dahin verlängert.

Es zahlt sich in mehrerlei Hinsicht aus, mit komprimiertem Erdgas zu fahren, auch wenn es auf den ersten Blick nicht gleich ersichtlich ist. Da Erdgaspreise an der Tankstelle in Kilogramm und nicht wie gewohnt in Litern angegeben werden, kann man nicht einfach 1:1 vergleichen. Außerdem muss man den Energiegehalt der einzelnen Kraftstoffe in die Rechnung einbeziehen.

Ein Kilogramm des überwiegend verkauften H-Gases hat beispielsweise einen Energiegehalt von etwa 13,3 kWh, ein Liter Diesel etwa 9,9 kWh, ein Liter Superbenzin etwa 8,6 kWh und ein Liter Autogas etwa 6,8 kWh. Damit entspricht der Energiegehalt von einem Kilogramm Erdgas etwa 1,5 Litern Benzin, ungefähr 1,3 Litern Diesel beziehungsweise rund 1,9 Litern Autogas. Nimmt man an, dass ein Liter Super 1,35 Euro kostet, dann kostet Erdgas umgerechnet 0,68 Euro – also etwa die Hälfte.

BIOMETHAN GUT FÜR KLIMASCHUTZZIELE

Die Biomethanbusse der swa helfen der Stadt Augsburg, die lokalen Klimaschutzziele zu erreichen und leisten einen wichtigen Beitrag zur Luftreinhaltung. Auch entfällt bei Biomethan das Thema Flächenkonkurrenz, da es aus agrarischen Reststoffen hergestellt wird. Die Umstellung auf Biomethan ist Teil eines umfassenden Klimaschutzengagements der Stadt Augsburg. 1998 trat die Stadt Augsburg dem Klima-Bündnis bei und verpflichtete sich so zu einer kontinuierlichen Reduktion ihrer CO₂-Emissionen für den weltweiten Klimawandel. 2003 wurde in Augsburg eine eigene Klimaschutzabteilung eingerichtet. Sie stellt die Umsetzung des CO₂-Minderungskonzeptes sicher.

Zwischen 2008 und 2013 wurde es dann noch konkreter in Augsburg: es wurde ein eigenes Klimaschutzprogramm mit einem 9-Punkte-Plan entworfen und auch umgesetzt. Im Jahr 2011 wurde das regionale Klimaschutzkonzept entwickelt, an das das neue Klimaschutzprogramm 2020 anknüpft.

swa – DRITTGRÖSSTES KOMMUNALES VERSORGUNGSUNTERNEHMEN BAYERNS

Die Stadtwerke Augsburg sind in Bayern das drittgrößte kommunale Versorgungsunternehmen. Von den insgesamt 1.870 Mitarbeitern sind 860 im Bereich Verkehr beschäftigt. Neben dem Thema Energie beschäftigen sich die Stadtwerke Augsburg außerdem mit den Bereichen Wasser und Mobilität. Die Fahrgastzahlen sind in den letzten Jahren stetig angestiegen. Im Jahr 2017 wurden insgesamt rund 62 Millionen Fahrgäste befördert.

Autor:

Klaus Röder

Geschäftsbereichsleiter Fahrzeuge

Prokurist Stadtwerke Augsburg Verkehrs-GmbH

Tel.: 0821/6500-5900

klaus.roeder@sw-augsburg.de

ABSTRACT

Durch die Nutzung von Biomethan fahren die swa-Busse CO₂-neutral. Es wird bei der Verbrennung so viel CO₂ freigesetzt, wie die Pflanze zuvor gebunden hat. Erzeugt wird das in Augsburg genutzte Biomethan aus agrarischen Reststoffen wie Schlempe, Stroh oder Bruchholz. Durch die Nutzung werden Stickoxide in der Luft deutlich verringert und auch keine Rußpartikel in die Umwelt abgegeben. Ein weiterer Vorteil: Die swa-Busse fahren mit einem geräuscharmen Gasmotor und erzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Bussen weniger Lärm.

Augsburg ist die einzige Großstadt in Deutschland, in der Busse fahren, die ausschließlich mit Biomethan betrieben werden, und das seit 2011. Die Erfahrungen in der swa-Buswerkstatt zeigen, dass Biomethanbusse eine bewährte Technik mit sich bringen. Laufleistungen von 700.000 bis 800.000 Kilometer werden ohne Schäden problemlos erreicht. Pro Jahr werden durch den Einsatz von Biomethan bei den swa-Bussen 6.500 Tonnen CO₂ im Vergleich zu einer herkömmlichen Diesel-Flotte eingespart.

BISHER IN DIESER REIHE ERSCHIENEN

No. 151	EU-Beihilfenrecht in der kommunalen Praxis	6/2019
No. 150	Vielfalt leben – Anregungen und Praxisbeispiele für das Älterwerden und Teilhaben im Quartier	3/2019
No. 149	Wasser in der Stadt – Planungsinstrumente, Risikomanagementsysteme und Entwicklungskonzepte aus der BMBF-Fördermaßnahme ReWaM	1/2019
No. 148	Mobilfunk – Gestern-Heute-Morgen	6/2018
No. 147	Bezahlbaren Wohnraum schaffen – Kommunale Instrumente der Baulandmobilisierung	3/2018
No. 146	Genossenschaften und Kommunen – Erfolgreiche Partnerschaften	1/2018
No. 145	Elektromobilität bei kommunalen Nutzfahrzeugen – Einsatzfelder, Anwendungsbeispiele und vergaberechtliche Anforderungen	11/2017
No. 144	Auslaufende Konzessionsverträge – Ein Leitfaden für die kommunale Praxis – 3. Auflage	10/2017
No. 143	Kommunale Beleuchtung – wirtschaftliche, technische und rechtliche Rahmenbedingungen	9/2017
No. 142	Perspektiven des Breitbandausbaus – Ziele, Strategie, Technik	6/2017
No. 141	Veranstaltungen sicher machen – Kultur und Freizeit vor Ort schützen	6/2017
No. 140	WIR schaffen das! KOMMUNEN gestalten Integration Rahmenbedingungen verbessern, Überforderung vermeiden Bilanz 2016 und Ausblick 2017 der deutschen Städte und Gemeinden	1/2017
No. 139	Wasser, Abwasser, Energie – Übergreifende Lösungen und Modellvorhaben zur Integration der Infrastrukturen	11/2016
No. 138	Bundeswehr und Kommunen	11/2016
No. 137	Förderung des Radverkehrs in Städten und Gemeinden Neuauflage 2016	6/2016
No. 136	Deutschland umbauen: Reformen umsetzen, Integration gestalten – Bilanz 2015 und Ausblick 2016 der deutschen Städte und Gemeinden	1-2/2016
No. 135	Kommunale Entwicklungszusammenarbeit	12/2015
No. 134	Szenario-Management für Städte und Gemeinden Leitfaden und Anwendungsbeispiele	11-12/2015
No. 133	Starkregen und Hitzewellen: Die Stadt im Klimawandel fordert die kommunale Wasserwirtschaft heraus	11-12/2015
No. 132	Gemeinden mit Aussicht	6/2015
No. 131	Mit starken Kommunen die Energiewende zum Erfolg führen!	5/2015

Diese und frühere Dokumentationen stehen im Internet unter www.dstgb.de > Publikationen zum Download zur Verfügung.



DStGB
Deutscher Städte-
und Gemeindebund
www.dstgb.de

Marienstraße 6 · 12207 Berlin
Telefon 030 77307-0
Telefax 030 77307-200
dstgb@dstgb.de
www.dstgb.de