

Ist der Einsatz von Wasserstoff-Bussen im ÖPNV sinnvoll und zukunftssicher?

Michael Huber, Thomas Seifert, Ramon Briegel, Markus Tittelbach, Otto Hirsch
Scientists for Future Deutschland



Inhaltsverzeichnis

<u>Inhalt.....</u>	<u>1</u>
<u>Zusammenfassung:.....</u>	<u>2</u>
<u>Einleitung.....</u>	<u>3</u>
<u>Ist-Stand und Planungsstand bei Umrüstung der Busflotten Unterschiedliche Entscheidungen</u>	<u>3</u>
<u>Technische Aspekte Batterie-Busse vs. Wasserstoff-Busse</u>	<u>6</u>
Schlechte Energieeffizienz spricht gegen Wasserstoff	6
Die vielzitierte Reichweite ist kein ausschließendes Kriterium mehr	7
Steigfähigkeit und Durchlasshöhe – Wasserstoff-Busse nicht besser als E-Busse	8
Platzbedarf für Batterien bzw. Brennstoffzelle und Wasserstofftank	8
Der Infrastrukturaufwand für Wasserstoff ist eher höher	8
<u>Förderbedingungen begünstigen kurzfristige Entscheidungen</u>	<u>9</u>
<u>Die Versorgungssicherheit mit Wasserstoff ist problematisch</u>	<u>10</u>
<u>Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff- und E-Bussen</u>	<u>11</u>
<u>Quellen</u>	<u>13</u>

Zusammenfassung:

- *Der Ausbau des ÖPNV und seine Umstellung auf CO₂-freien Betrieb muss einen wesentlichen Beitrag zu Energiewende und THG-Null leisten. Eine erste Übersicht zeigt, dass dafür bislang mehr als 10-mal so viel E-Busse mit Batterien als Wasserstoff-Busse mit Brennstoffzelle eingesetzt werden.*
- *Die ÖPNV-Betreiber haben für ihre Entscheidungen für die eine oder andere Technologie sehr unterschiedliche Kriterien. Ein Kriterium ist die Energieeffizienz, wobei wegen der Energieverluste bei der Herstellung des Wasserstoffs mittels Elektrolyse und der Rückverwandlung in Strom in einer Brennstoffzelle der Wasserstoff-Bus deutlich schlechter abschneidet als das Laden und Entladen der Batterie-Busse.*
- *Bis vor kurzem war die mangelhafte Reichweite der E-Busse oft noch ausschlaggebend für eine Entscheidung zugunsten von Wasserstoff-Bussen. Inzwischen haben allerdings die E-Busse dank gesteigerter Batteriekapazität mit den Wasserstoff-Bussen gleichgezogen oder sie sogar überholt. Kommen die Wasserstoff-Busse meist mit einmal Nachtanken pro tägliche Fahrstrecke aus, reicht für aktuelle E-Busse inzwischen eine nächtliche Depotladung.*
- *Bei der Steigfähigkeit gibt es keine Unterschiede. Bei der Durchlasshöhe werden die E-Busse der nächsten Generation sogar im Vorteil sein.*
- *Bei der Einrichtung der technisch nötigen Tank- bzw. Lade-Infrastruktur ist der E-Bus in der Regel weniger aufwändig als der Wasserstoff-Bus.*
- *Bei den Anschaffungskosten ist die Investition in Wasserstoff-Busse derzeit bis zu 20 % höher als in E-Busse. Bei der Wartung und der Erneuerung der Batterien bzw. der Brennstoffzellen-Stacks bleiben die Kosten ungefähr auf derselben Höhe. Allerdings kann, wenn es für den Standort besondere Förderbedingungen gibt, die Umstellung auf Wasserstoff im Sonderfall günstiger sein.*
- *An einigen wenigen Standorten, wo fossiler Wasserstoff sozusagen als Abfallprodukt der Chemie-Industrie anfällt oder derzeit noch überschüssiger grüner Wasserstoff aus subventionierten Pilotprojekten verfügbar ist, ist Wasserstoff bzgl. der Betriebskosten evtl. aktuell noch die günstigere Lösung. Die aktuellen Wasserstoffkosten am freien Markt sind aber bereits jetzt deutlich höher als die aktuellen Stromkosten.*
- *Mittel- und langfristig wird die Versorgung mit 100 % grünem Wasserstoff weder mengenmäßig gesichert noch kostenmäßig bezahlbar sein. Während die Versorgung mit 100% grünem Strom mittel- und langfristig zu relativ günstigen Betriebskosten führen wird.*

Unter dem Strich ist die Umstellung auf E-Busse bezüglich der Betriebskosten die zukunftssichere Lösung bei vergleichbarer Fahrleistung und Einsetzbarkeit wie Wasserstoff-Busse.

Nach aktuellem Erkenntnisstand wäre über eine zielgerichtete Förderung nachzudenken.

Einleitung

Durch Einsparen des Energieverbrauchs und Vermeidung von Treibhausgasemissionen spielt die Verkehrswende für das Erreichen der Klimaziele eine entscheidende Rolle. Dazu muss der ÖPNV als Alternative zum motorisierten Individualverkehr (MIV) und durch Umstellung auf CO₂-freie Verkehrsmittel einen wesentlichen Beitrag leisten. Zur Erreichung der CO₂-Freiheit im ÖPNV galt für die Umstellung von Bussen noch vor einigen Jahren: Für längere Strecken bzw. größere Reichweiten seien nur Wasserstoff-Busse (mit Wasserstofftank, Brennstoffzelle und Elektromotor) und nur für geringere Reichweiten seien E-Busse (Batterien + E-Motor) geeignet. In wie weit sich das geändert hat und welche Kriterien bei der Entscheidung für die eine oder andere Antriebsart berücksichtigt werden müssen, wird im Folgenden dargestellt. Hybrid-Busse (Batterieelektrik + Verbrennung) oder Wasserstoff-Busse mit Verbrennungsmotoren werden dabei außer Acht gelassen. Hybridantrieb fällt inzwischen außer Betracht, da angesichts des immer knapper werdenden Zeitrahmens für die Energiewende inzwischen nicht nur eine Minderung der CO₂-Emissionen, sondern stattdessen eine CO₂-Emissionsvermeidung erreicht werden muss. Die Wasserstoffverbrennung wird wegen der extrem schlechten Energieeffizienz hier nicht berücksichtigt.

Ist-Stand und Planungsstand bei Umrüstung der Busflotten Unterschiedliche Entscheidungen

Laut E-Bus-Radar sind derzeit im deutschen ÖPNV 1617 Batterie-elektrische E-Busse und 145 Brennstoffzellenbusse im Einsatz [1]. Die Kommunen testen oft parallel E-Busse und Wasserstoff-Busse unter Inanspruchnahme von Fördergeldern. Nachfolgend eine exemplarische Übersicht zu Stand und Planung des Einsatzes von Wasserstoff-Bussen, auch auf europäischer Ebene:

Montpellier in Frankreich hat die bereits geordneten 51 Wasserstoff-Busse Anfang 2022 wieder abbestellt und setzt stattdessen auf Elektrobusse. Die Betriebskosten für E-Busse werden im Vergleich zu Wasserstoff-Bussen von Montpellier auf ein Sechstel kalkuliert [2].

ESWE, der Verkehrsbetrieb von **Wiesbaden**, hat den Betrieb von Wasserstoff-Bussen ein Jahr nach Lieferung wieder eingestellt, nachdem die Abfüllstation einen Schaden hatte [3]. Die Busse seien auch zu klein gewesen. ESWE betreibt bereits 120 Batterie-angetriebene E-Busse [4]. Zu schwierig waren auch der nötige Unterhalt einer Werkstatteinfrastuktur für 3 verschiedene Antriebsarten (H₂, Diesel und elektrisch) sowie die hohen Wasserstoff-Preise. Auch hier sprachen wirtschaftliche Gründe gegen den Einsatz von Wasserstoff-Bussen.

In **Mainz** betreibt die Mainzer Mobilität einen Wasserstoff-Bus und wird 5 weitere Busse von Wiesbaden übernehmen. Daneben fahren in Mainz auch 27 elektrische Busse [4].

In **Wien** werden Wasserstoff-Busse getestet und die Stadt plant, 10 Wasserstoff-Busse bis 2025 einzusetzen. Die Ausschreibung läuft. Es werden Vorteile gegenüber Elektrobussen gesehen (Steigfähigkeit, Betrieb bei Kälte, Reichweite) [5]. Die ersten Tests von Wasserstoff-Bussen waren allerdings nicht zufriedenstellend. Wien hatte aufgrund z. T. hügeliger Fahrtstrecken Vorbehalte gegenüber E-Bussen wegen einer angeblichen geringeren Steigfähigkeit im Vergleich zu Wasserstoff-Bussen, doch dieser Vorbehalt beruhte offensichtlich auf Fehlinformationen (siehe dazu im Abschnitt „Technische Aspekte“).

In **Wuppertal** fahren 20 Wasserstoff-Busse und 32 weitere Fahrzeuge sollen angeschafft werden. Der Wasserstoff stammt aus Elektrolyseuren, die mit Strom von der Müllverbrennungsanlage betrieben werden. Der Elektrolyseur läuft aber nicht immer zu 100 %, wodurch teurer Wasserstoff dazugekauft werden muss und es auch zu Busausfällen kommt [6]. Hier muss beachtet werden, dass es sich um ein Projekt handelt, das ohne massive Förderung der Wasserstoff-Infrastruktur wohl nie zustande gekommen wäre [7]. Strom und Wärme aus Müllverbrennungsanlagen werden nämlich i. d. R. in den Klimaschutzkonzepten der Kommunen sinnvollerweise für die lokale Strom- und Fernwärmeversorgung verplant. Die direkte Verwendung des Müllstroms zum Aufladen der Batterien von E-Bussen wäre ohne Förderung die kostengünstigere und in jedem Fall energieeffizientere Lösung.

Duisburg plant die Anschaffung von 100 Wasserstoff-Bussen [8]. Eine nicht veröffentlichte Studie habe ergeben, dass die Betriebskosten geringer seien, als für Batterie-Busse und dass auch weniger CO₂ als bei mit Grünstrom betriebenen Batterie-elektrischen Bussen mit fossilem Zusatzheizer emittiert werde. Die finanziellen Vorteile der Wasserstoff-Busse sollen darin bestehen, dass für eine Batterie-Flotte mehr Busse benötigt werden mit entsprechend mehr Personal und auch die Stromkapazität des Bus-Depots erhöht werden müsste. Die zitierte Studie berücksichtigt dabei die spezifische Duisburger Situation (Logistik-Drehscheibe, Industriestandort, Wasserstoff-Kompetenzzentrum, Topographie etc.) und sei daher nicht auf andere Städte oder Verkehrsgesellschaften übertragbar. Es ist anzunehmen, dass die „finanziellen Vorteile“ auf einem aktuell noch bestehenden Kostenvorteil durch billigen „Abfallwasserstoff“ aus der Chemieindustrie bestehen, das bietet aber keine zukunftssichere Lösung (siehe auch Abschnitt „Versorgungssicherheit mit Wasserstoff“)!

Groß-Gerau erwarb im Jahr 2020 einen gebrauchten Brennstoffzellenbus. Bis 2022/23 sollte in Groß-Gerau eine Wasserstofftankstelle in Betrieb genommen werden. Bis dahin werde der Bus in Höchst betankt. Ob die eigene Tankstelle inzwischen umgesetzt wurde, ist nicht bekannt. Mit einer Tankfüllung habe der Bus eine Reichweite von bis zu 400 Kilometern. Dies sei ein immenser Vorteil gegenüber reinen Elektrobussen, deren Akkus viel zu häufig und lange aufgeladen werden müssen, was den laufenden Betrieb massiv störe, so Winzenhöler von der Firma Hy2ser [9]. Der Reichweitennachteil besteht allerdings bei E-Bussen der neuesten Generation nicht mehr (siehe Abschnitt „Technische Aspekte“). Auch in Groß-Gerau ist anzunehmen, dass die Entscheidung durch den aktuell noch günstig verfügbaren Wasserstoff aus der Chemieindustrie beeinflusst ist (siehe auch oben). Auch der damals versprochene Bundeszuschuss von 80 % der Anschaffungskosten für 15 Wasserstoff-Busse mag mitentscheidend gewesen sein [10].

Der **Kölner** Regionalverkehr (KRV) betreibt mit 72 Fahrzeugen die größte Wasserstoff-Busflotte Europas [11]. Es sind Busse unterschiedlicher Hersteller im Einsatz. Der Wasserstoff wird von einer PVC-Fabrik bezogen, wo der Wasserstoff als Abfallprodukt anfällt. Der Preis wurde mit 36 ct/kg (1,1 Cent/kWh) Wasserstoff angegeben. Köln und Wuppertal kooperieren. Dieser lokal aktuell noch bestehende Kostenvorteil durch billigen „Abfallwasserstoff“ bietet allerdings keine zukunftssichere Lösung (siehe auch Abschnitt „Versorgungssicherheit mit Wasserstoff“)!

In **Frankfurt** [12] fahren zurzeit 13 Wasserstoff-Busse, für 2024 sind 10 und für 2025 weitere 9 Fahrzeuge bestellt. Die Busse werden auf dem Betriebsgelände der Busgesellschaft ICB betankt. Der verwendete Wasserstoff fällt als Nebenprodukt der Chloralkalielektrolyse im Industriepark Höchst [73] an. Die Verwendung dieses „Abfallwasserstoffs“ lässt allerdings an der Zukunftssicherheit der Wasserstoffversorgung Zweifel aufkommen (siehe auch Abschnitt „Versorgungssicherheit mit Wasserstoff“)!

In **Kassel** hat man sich für E-Busse und gegen Wasserstoff- Busse entschieden. Neuere Untersuchungen hatten gezeigt, dass der Wirkungsgrad und die Effizienz von E-Bussen höher ist als der von Wasserstoff-Bussen. Damit punkten vollelektrische Busse auch bei der Wirtschaftlichkeit [13].

Stadt	H ₂ -Busse (im Einsatz/geplant bzw. bestellt)	E-Busse (im Einsatz/geplant)	Entscheidungen für oder gegen H ₂ -Busse
Köln, Bonn, Leverkusen, Bergisch Gladbach	72/20 (+60)		20 Busse sind bestellt, Option für weitere 60 Busse
Krefeld	0/12		
Duisburg	0/100		100 Busse sollen gekauft werden.
Frankfurt	13/19		
Groß-Gerau	1/23		
Mainz	1/5	27/?	
München		25 Gelenk- und 22 Solobusse, weitere geplant	
Wiesbaden	0/0	120/ 0	10 H ₂ -Busse sollen verkauft werden
Wuppertal	20/32		
Montpellier	0/0		51 H ₂ -Busse abbestellt
Wien	0/10		Erste H ₂ -Bus-Tests waren nicht zufriedenstellend
Kassel		12	
Bielefeld	4 im Einsatz (05/22), 25 mit Förderzusage (03/23)		Förderung, damals (!) die Reichweite für die langen Umläufe (400 km) und nur 1 Auftanken
Mailand		/ 340	
Bremen		50 E-Gelenkbusse bestellt	

In **Bielefeld** sind 4 Wasserstoff-Busse im Einsatz und 2025 sollen 25 weitere Busse geliefert werden [14]. Bielefelds längster Busroute kommt am Tag auf 540 Kilometer. Der Wasserstoff kommt von der chemischen Industrie im Ruhrgebiet mittels Tanklastwagen. Der Wasserstoff wird auf dem Industriebetrieb komprimiert und gekühlt. Es ist geplant, wie in Wuppertal, Wasserstoff mithilfe des Stroms aus der Müllverbrennungsanlage vor Ort zu erzeugen. Die Zukunftssicherheit der Wasserstoffversorgung muss allerdings auch hier hinterfragt werden (s. a. Abschnitt „Versorgungssicherheit mit Wasserstoff“).

Mailand: Im vergangenen Herbst hatte das Mailänder Nahverkehrsunternehmen ATM die Beschaffung von insgesamt 340 Batteriebusen ausgeschrieben [15].

München ist ein gutes Beispiel für eine Gegenüberstellung von E-Bussen und H₂-Bussen. Im Zuge des Klimanotstands wurde beschlossen, den ÖPNV von einem Anteil von 24 % auf 30 % am Modal Split zu steigern. Dafür werden 140 U-Bahnzüge, bis zu 210 Trambahnen und 400 Busse eingesetzt. Und es gibt ein ausgedehntes S-Bahn-Netz. Bisher werden 25 E-Gelenkbusse und 22 E-Solobusse eingesetzt und es wurde auch ein Betriebshof für deren Wartung in Betrieb genommen [16, 17].

Technische Aspekte Batterie-Busse vs. Wasserstoff-Busse

Bezüglich Energieeffizienz und vor allem Reichweite gibt es im Vergleich zwischen herkömmlichen Dieselbussen, Wasserstoff- und reinen Elektrobussen erhebliche Unterschiede. Die herkömmlichen Dieselbusse werden in den Vergleich nur insoweit mit einbezogen, als sie aufgrund ihrer CO₂-Emissionen durch CO₂-freie Fahrzeuge ersetzt werden sollen, Wasserstoff- oder Elektrobusse deren Funktion also voll ersetzen müssen.

Schlechte Energieeffizienz spricht gegen Wasserstoff

Man muss davon ausgehen, dass bis auf mittlere und tiefe Geothermie sowie Solarthermie Erneuerbarer Strom in Zukunft zu über 90 % Primärenergiequelle sein wird. Deshalb ist ein möglichst direkter Einsatz von grünem Strom ohne verlustbehaftete Umwandelungsschritte anzustreben. Setzen wir also den Energiegehalt von Strom an der Netzentnahmestelle als 100%, so ergeben sich für E-Busse und Wasserstoff-Busse folgende Unterschiede:

E-Bus	
Verluste bei Laden und Entladen der Batterien* ca.	10 %
Verluste des Elektromotors ca.	5 %
Mechanische Umsetzungs- und Übertragungsverluste ca.	5 %
Gesamtwirkungsgrad vor Rad ca. Berechnet durch Multiplikation der obigen Teilwirkungsgrade	80 %

Wasserstoff-Bus	
Verluste bei der Elektrolyse mindestens** ca.	30 %
Verluste bei Speicherung und Transport von komprimiertem Wasserstoff*** ca.	20 %
Verluste bei der Umwandlung von Wasserstoff in Strom mit der Brennstoffzelle im Bus ca.	40 %
Verluste des Elektromotors ca.	5 %
Mechanische Umsetzungs- und Übertragungsverluste ca.	15 %
Gesamtwirkungsgrad vor Rad ca. Berechnet durch Multiplikation der obigen Teilwirkungsgrade	30 %

* Kann bei hoher Lade- und Entladeleistung auch 20% und mehr sein.

** je nach Elektrolyseurtyp und Betriebsbedingungen bis zu 50 % Verlust

*** bei flüssigem Wasserstoff verschlingt allein das Verflüssigen bis zu 28 % der Energie

Hinweis: In der Tabelle wurden nur die Energieverluste des Antriebs bis „vor Rad“ berücksichtigt. Denn bis zur Erzeugung des Vortriebs des Fahrzeugs sind die nachfolgenden Verluste, wie Rollwiderstand und Luftwiderstand mit insgesamt bis zu ca. 20% für alle Antriebsarten gleich. Übrigens, würde der Wasserstoff in Bussen mit Verbrennungsmotor eingesetzt, läge der Gesamtwirkungsgrad vor Rad sogar unter 20 %.

Fazit: Da die Energiewende vor allem auch im Bereich Verkehr, im Vergleich zu heute, erhebliche Energieeinsparungen erfordert, ist die Energieeffizienz ein entscheidendes Kriterium bei der Wahl der Antriebsarten von Verkehrsmitteln auch im ÖPNV. Allein aufgrund der vielen und z. T. stark verlustbehafteten Umwandelungsschritte und der damit verbundenen Energieverluste ist deshalb der Einsatz von Wasserstoff-Bussen mit Brennstoffzelle nach diesem Kriterium bestenfalls zweite Wahl. [83, 84, 85, 86, 87, 88, 89]

Die vielzitierte Reichweite ist kein ausschließendes Kriterium mehr

Die durchschnittliche Fahrleistung der Busse im ÖPNV liegt pro Tag zwischen ca. 200 km und 300 km, es gibt allerdings Einzelfälle von über 500 km. Nur im Sonderfall wird diese Fahrleistung auch mal über 400 km pro Tag liegen. [18, 19]

Aktuelle Reichweiten: Der durchschnittliche Dieselbus benötigt ca. alle 400 km ein Nachtanken. Für Wasserstoff-Busse werden 300 km, im Sonderfall bis 400 km, als Reichweite bis zum Nachtanken angegeben. Die Reichweite der in 2022 in Serie gegangenen Elektrobusse mit Batterie lag bereits zwischen 300 km und 400 km. Ein im ÖPNV des LK Celle in 2021 getestetes Modell (Iveco E-Way), das nominell 300 km Reichweite hatte, erreichte in der Praxis ohne Nachladung sogar bis zu 545 km im gemischten Linienverkehr (Innenstadt und 20 km Außenbereich). MAN kam mit dem Modell Lion's City 12 E auf den Linien 176 und X80 der Münchner Verkehrsgesellschaft (MVG) auf 550 km. Unter anderem liegt das daran, dass sich die Kapazität der verwendeten Batterien in aktuellen E-Bus-Modellen von ca. 200 kWh bis 250 kWh inzwischen auf 500 bis 800 kWh verdoppelt bis verdreifacht hat. [20, 21, 76, 77]

Da im Unterschied zum 12 m langen Standard-E-Bus die 18 m langen Gelenk-E-Busse mit größeren Batterien ausgestattet sind, besteht bzgl. Reichweite kein wesentlicher Unterschied in den Reichweiten verschieden großer E-Busse. Der Urbino 18 von Solaris erreicht mit der 800 kWh Batterie eine Reichweite von 600 km, der Ebusco 2.2 erreicht als 18m Version bis zu 550 km und wurde auch von der Münchner MVG und der Südwestdeutschen Landesverkehrs-GmbH (SWEG) bestellt. Der Verkehrsverbund Bremen/Niedersachsen BSAG bestellte 35 Gelenkbusse von Mercedes-Benz (eCitaro G) sowie 15 Busse des spanischen Herstellers Irizar vom Typ iebus18. [22, 23, 24]

Die Tankzeiten liegen bei Wasserstoff-Bussen bei ca. 10 min, die Ladezeiten für das Depotladen von E-Bussen dauern je nach Leistung der Ladestation und der Batteriekapazität zwischen 2 h bis 6 h. Ein Unterschied, der allerdings bei ausreichender Tagesreichweite der E-Busse keine Rolle mehr spielt. [25, 27]

Wintertauglichkeit, bzw. Reichweite im Winter: Im Winter kann bei Elektrobussen durch erhöhten Stromverbrauch für eine Elektroheizung bei -10 °C Außentemperatur die Reichweite um bis zu 40 % sinken. Dies kann durch Vorheizen der Busse im Depot und Einsatz von Wärmepumpenheizungen deutlich verbessert werden. Auch der Stromverbrauch durch die Klimaanlage in heißen Sommern senkt die Reichweite von Elektrobussen bis zu 20 %, allerdings sinkt dann auch bei Wasserstoff-Bussen die Reichweite. Die praktischen Erfahrungen der bereits reine Elektrobusse einsetzenden ÖPNV-Betreiber zeigten in den letzten Jahren im Jahresschnitt eine Reichweitenminderung durch das Heiz- und Kühlsystem (HVAC-System) in Elektrobussen um ca. 10 %. Da er die Abwärme der Brennstoffzelle nutzen kann, hat diesbezüglich der Wasserstoff-Bus beim Heizen gegenüber dem E-Bus einen Vorteil. Dieser kommt jedoch nur zum Tragen, falls die im jeweiligen Liniennetz tatsächlich benötigten Reichweiten mit dem E-Bus im Winter nicht gegeben wären. Aktuell meldet die Deutsche Bahn als Erfahrung mit ihren E-Bussen in Oberschwaben: Trotz heftiger Minustemperaturen bewältigen die Busse die versprochene Reichweite von 400 Kilometern trotz Innenraumbeheizung. [28, 29, 30, 31]

Fazit: Es gibt inzwischen bzgl. der Reichweiten und der dafür nötigen Tank- bzw. Ladezeiten im Abdeckungsbereich der meisten ÖPNV-Netze keine prinzipiellen Vorteile für den Einsatz von Wasserstoff-Bussen.

Steigfähigkeit und Durchlasshöhe – Wasserstoff-Busse nicht besser als E-Busse

Nachdem in Offenbach drei E-Busse an einer Steigung hängenblieben, ging das durch die gesamte deutschsprachige Presse. Es stellte sich jedoch heraus, dass es sich um einen nicht E-Bus-spezifischen Fehler der Feststellbremsen handelte, der inzwischen behoben wurde. Technisch gesehen wäre ein diesbezüglicher Unterschied zwischen E-Bussen und Wasserstoff-Bussen auch kaum zu erklären, da in beiden Fahrzeugtypen Elektromotoren derselben Leistung und demselben Drehmoment mit Stromquellen jeweils derselben Leistung arbeiten. Im Gegenteil, die Deutsche Bahn lobt sogar die Zuverlässigkeit ihrer E-Busse im hügeligen Oberschwaben. [26, 28]

In manchen Kommunen unterfahren bestimmte Buslinien auch Brücken mit geringer Höhe. Hier machen allerdings die aktuellen Wasserstoff- und E-Busse evtl. Schwierigkeiten, da die Tanks bzw. Batterien auch auf dem Dach untergebracht sind. Die E-Busse der kommenden Generation arbeiten allerdings mit flachen Unterflurbatterien und werden dann Vorteile diesbezüglich haben [32].

Platzbedarf für Batterien bzw. Brennstoffzelle und Wasserstofftank

Im Vergleich zu den Dieseltanks erfordern die Batteriepacks mehr Platz. Das könnte zu Ungunsten des Platzes für die Fahrgäste sein. Da die Batterien bei den meisten E-Bussen auf dem Dach untergebracht werden oder in der nächsten Batterie- und E-Busgeneration sehr flach im Unterboden liegen (wie von BYD [32] bereits angekündigt), ist das nicht zwingend der Fall. Auch der Platzbedarf der Elektromotoren mit ihren minimalen Getrieben ist inklusive Steuerelektronik i. d. R. eher geringer als der von Dieselmotoren samt ihrem Getriebe. In den 12-Meter-Bussen eines namhaften Wasserstoff-Busherstellers mit einer Brennstoffzellen-Leistung von 100 kW sind z. B. acht Wasserstofftanks mit einem Gesamtvolumen von 2100 l verbaut. Der Platzbedarf des Brennstoffzellen-Stacks beträgt 570 l. Dazu kommt noch der Platzbedarf von ca. 450 l für eine 60 kWh Batterie, da auch ein Brennstoffzellen-Bus zum Starten und als Pufferspeicher eine nicht zu kleine Batterie benötigt. [33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42]

Fazit: Was den für die Fahrgäste nutzbaren Platz betrifft, müssen sowohl E-Busse als auch Wasserstoff-Busse keinen Nachteil gegenüber den herkömmliche Dieselnussen haben. Aber es gibt auch keinen Vorteil der Wasserstoff-Busse gegenüber den reinen E-Bussen.

Der Infrastrukturaufwand für Wasserstoff ist eher höher

Wasserstoff-Busse: Die funktionellen Bestandteile einer Wasserstofftankstelle sind Speicher, Verdichter und Zapfsäule. Aus Gründen der Redundanz sollten die genannten Bestandteile doppelt vorhanden sein. Der Druck im Wasserstoffspeicher beträgt i. d. R. bis zu 350 bar. Der Verdichter erhöht den Druck auf 500 bar und muss den Wasserstoff vorkühlen, damit der Wasserstoff in den Tank des Fahrzeugs fließen kann. Im Fahrzeug wird der Wasserstoff mit Drücken unterhalb 350 bar gespeichert. Als Kompromiss zwischen Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit sollte die Speicherkapazität jeder Tankstelle mindestens für 2 Tage ausreichen. Für die Lagerung von Wasserstoff gibt es zusätzlich erhebliche Sicherheitsanforderungen und Genehmigungsbedingungen: Ab 3 Tonnen H₂ ist ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz durchzuführen. Ab 5 Tonnen H₂ gelten weitere Anforderungen der Störfall-Verordnung. Wenn keine eigene Wasserstoff-Tankstelle auf dem Gelände des Fahrzeugdepots eingerichtet wird bzw. werden kann, muss die Benutzung der Tankstelle eines Fremdbetreibers sichergestellt sein [27, 31; 31, 43, 44, 45, 46, 81]. Umfassenden Überblick auch der Sicherheitsaspekte findet man in der VDV-Schrift 825 [43].

E-Busse: Hier kann das Grundproblem mit den Ladestationen in den Depots derzeit noch sein, dass die Anbindung an das Mittelspannungsnetz nicht gegeben oder zu schwach dimensioniert ist. Das Problem der Nachladehäufigkeit der Elektrobusse hat sich dagegen inzwischen i. d. R. erledigt. E-Busse der neuesten Generation kommen in der Regel mit einer Nachladung im Fahrzeugdepot aus (s. Abschnitt zur Reichweite). Zusätzliche Ladestationen oder Pantographen an Endhaltestellen oder sog. Gelegenheitsladestationen sind in der Regel nicht mehr nötig. Prinzipiell ist eine Ladeleistung von ca. 150 kW pro Bus ausreichend, wie sie auch für die Pkw-Schnellladung eingesetzt wird. Nur für „Langstrecken“-Gelenkbusse sind evtl. 300 kW pro Bus erforderlich. [31, 43, 44, 45, 46, 81]

Fazit: In den meisten Fällen ist die Umrüstung der Infrastruktur auf E-Busse technisch gesehen weniger aufwändig als die auf Wasserstoff-Busse. Das wird sich i. d. R. auch auf die Wirtschaftlichkeit auswirken.

Förderbedingungen begünstigen kurzfristige Entscheidungen

Nachdem sich das Problem der Reichweiten weitgehend erledigt hat, haben sich inzwischen andere Entscheidungskriterien in den Vordergrund gedrängt.

Lokale Verfügbarkeit von Wasserstoff: Wenn derzeit (!) eine lokal verfügbare, kostengünstige Quelle für Wasserstoff vorhanden ist, fällt die Entscheidung bei der Umstellung der Fahrzeugflotte im ÖPNV oft zugunsten von Wasserstoff-Bussen. Doch, ob diese Verfügbarkeit mittel- und langfristig noch gegeben sein wird, ist fraglich (siehe weiter unten!).

Förderbedingungen für E-Busse und Wasserstoff-Busse: Da ÖPNV zu den kommunalen Pflichtaufgaben gehört, werden Kommunen und Landkreise bei der Beschaffung der Busse für den ÖPNV mit Zuschüssen unterstützt. Es gibt dabei Unterschiede von Bundesland zu Bundesland. Aber in der Regel beträgt der Zuschuss zunächst 40 % bei der Neuanschaffung von Bussen, gleich welcher Antriebsart, ob Diesel-, Wasserstoff- oder E-Bus. Allerdings gab es zumindest bis Dezember 2023 je nach Bundesland zusätzliche Förderung bei Anschaffung CO₂-freier Busse. In NRW wurden nach Landesgesetz z. B. 60 Prozent des Differenzbetrages sowohl zwischen einem Batterie elektrischen, als auch einem Wasserstoff betriebenen Bus und einem vergleichbaren Dieselbus, bezuschusst. Ähnliche Förderbedingen gab es in Niedersachsen, wo für Dieselbusse maximal 230.000 Euro und für CO₂-freie Busse bis zu 570.000 Euro je Fahrzeug zugeschossen werden. In Hessen wurden z. B. 40 % der Differenzbeträge bezuschusst. Auch gab es in der Vergangenheit Förderprogramme vom Bund und in einzelnen Ländern, die die Neuanschaffung von CO₂-freien Bussen bis zu 80 % bzw. 90 % bezuschussten. [47, 48, 49, 50, 51].

Zu Beginn des Jahres 2024 zeigt sich allerdings, dass die Bundesförderung defacto eingestellt wurde und auch die Landesförderungen unsicher geworden sind bzw. bereits reduziert oder eingestellt wurden. In Niedersachsen z. B. werden Neuanschaffungen von Bussen im ÖPNV nur noch pauschal über aller Antriebsarten Diesel-, Wasserstoff- und E-Bus nur noch mit 40 % bezuschusst. Die Sonderförderung für CO₂-freie Antriebe ist entfallen. Es ist abzuwarten, ob auf Bundes- und Landesebene Nachbesserungen erfolgen oder ob die Preise für E- und Wasserstoff-Busse so sinken, dass eine Förderung überflüssig wird. Angesichts nachlassender Nachfrage der ÖPNV-Betreiber wird Letzteres allerdings schwierig werden. [53, 54, 55, 56]

Allerdings gab es in diversen Bundesländern (z. B. Saarland) einmalige Fördervorhaben des Bundes, die gezielt die Neubeschaffung von Wasserstoff-Bussen bevorzugten [52]. Derartige Förderprogramme erscheinen vor dem Hintergrund fragwürdig, dass der Wasserstoff in Zukunft auch im Saarland vorrangig für die Industrie gebraucht wird, da er dort schwieriger zu substituieren ist als im Verkehr. (siehe auch Absatz „Die Versorgungssicherheit mit Wasserstoff ist problematisch“).

Förderbedingen für die Infrastruktur der E-Busse und Wasserstoff-Busse: Auch hier gab es in den obengenannten Länder- und Bundesprogramme, die sowohl für E-Busse als auch Wasserstoff-Busse die Investitionskosten für Lade-, bzw. Betankungs- und Wartungsinfrastruktur zwischen 40 % und 80% bezuschussen. Wie weit die derzeit wirksamen Kürzungen und Einstellungen der Förderung zurückgenommen werden, bleibt abzuwarten.

Fazit: Abgesehen von Einzelfällen gibt es bezüglich der Förderung bei den Investitionen sowohl in die Fahrzeuge als auch in die Infrastruktur keine generellen Vorteile für den E-Bus oder den Wasserstoff-Bus.

Die Versorgungssicherheit mit Wasserstoff ist problematisch

Mittel- und langfristig wird es nicht genug grünen Wasserstoff für Verkehrszwecke geben: Die chemische Industrie braucht für eine ganze Reihe von chemischen Prozessen Wasserstoff als Grundstoff. Dieser Prozess-Wasserstoff wird derzeit noch nahezu vollständig aus Erdgas gewonnen. Aus dieser fossilen Wasserstoff-Produktion lässt sich zu relativ geringen Kosten Wasserstoff abzweigen, der lokal für Verkehrszwecke zur Verfügung gestellt werden kann. In einigen Fällen baut die Industrie auch erste Elektrolyseure zur Erzeugung von Wasserstoff auf, die dann in Zukunft mit erneuerbarem Strom betrieben grünen Wasserstoff liefern können. Aufgrund von Wasserstoff-Förderprojekten und da die Industrie diesen Elektrolyse-Wasserstoff derzeit noch nicht wirklich braucht, steht evtl. auch aus dieser Quelle Wasserstoff für den Verkehr zur Verfügung. Das heißt, in Gebieten mit entsprechender Chemieindustrie kann heute noch aus den Überschüssen oder als „Abfallprodukt“ der chemischen Industrie ggf. ein gewisser Wasserstoffbedarf des Verkehrssektor bedient werden. Doch alle Szenarien, Studien und Planungen, die seriöser Weise ohne teuren Fernimport von Wasserstoff auskommen, gehen davon aus, dass in 2045 nur 300 TWh/a bis 600 TWh/a an grünem Wasserstoff im deutschen Kernnetz zur Verfügung stehen werden [57, 58, 59, 60, 61]. Übrigens, würden die Investitionskosten für den Ausbau der Kapazität des Wasserstoff-Kernnetzes für die Aufnahme größerer Fernimportmengen den Wasserstoffpreis zusätzlich verteuern. Kurzum, grüner Wasserstoff wird nur als Grundstoff für die Chemie- und Stahlindustrie sowie als Reservekraftstoff für die Residualkraftwerke bei EE-Strommangel und Dunkelflauten zur Verfügung stehen. Überschüssiger fossiler Wasserstoff wird über kurz oder lang entfallen. Das heißt, die Versorgung mit grünem Wasserstoff ist mittel- und langfristig zumindest für den Verkehr mengenmäßig, kostenmäßig und logistisch ungesichert. Wasserstoff oder seine Derivate, wie Ammoniak oder Methanol, werden als Treibstoff voraussichtlich nur für wenige Bereiche wie Schiffsverkehr und Flugverkehr und nur für beschränkte Bereiche des Schwerlastverkehrs zur Verfügung stehen. Für den Massenverkehr und auch den ÖPNV wird es keine größeren Kontingente geben. Eine weitere Frage ist, ob der grüne Wasserstoff über den oben beschriebenen Mindestbedarf hinaus überhaupt zu bezahlbaren Preisen verfügbar sein wird.

(Aktuelle Angaben zu den voraussichtlichen Preisen für grünen Wasserstoff finden Sie unter „Betriebskosten für E-Busse und Wasserstoff-Busse“).

Fazit: Der derzeit noch lokal oder regional anfallende graue Wasserstoff als Überschuss oder Abfallprodukt aus der fossilen chemischen Industrie wird über kurz oder lang entfallen. Auch der Wasserstoff aus hochsubventionierten Pilotprojekten zur Elektrolyse wird mittel- und langfristig nicht mehr zur Verfügung stehen. Das heißt, die Versorgung mit grünem Wasserstoff ist mittel- und langfristig mengenmäßig, kostenmäßig und logistisch noch ungesichert. (siehe dazu auch im Abschnitt „Wirtschaftliche Aspekte“).

Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff- und E-Bussen

Investitionskosten für die Busse: Während Standard-Dieselbusse (12 m Standardbus) bei ca. 200.000 bis 270.000 € liegen, liegen E-Busse je nach technischer Ausstattung, Hersteller und Beschaffungsland bei ca. 450.000 bis 600.000 €. Für E-Gelenkbusse liegen die Kosten zwischen 700.000 und 850.000 €. Die Preise für Wasserstoff-Busse liegen 10% bis 20% höher als die der batterieelektrischen Busse. **Fazit:** Bei den derzeitigen Förderbedingungen sind die bloßen Anschaffungskosten i. d. R. kein Kriterium für die Entscheidung für die Antriebsart. [62, 31]

Investitionskosten für Infrastruktur und Logistik bei E-Bussen: Hier müssen neben den Anschaffungskosten für die Ladeinfrastruktur sämtliche weiteren Kosten für einen leistungsmäßig ausreichend dimensionierten Anschluss der Ladegeräte an das Stromnetz inkl. Einrichtung eines Transformatorraums berücksichtigt werden. Für Ladeinfrastrukturen inkl. Anschlusskosten kann überschlägig mit 750 bis 1.000 €/kW Leistung gerechnet werden, davon 500-800 €/kW reine Anschaffungskosten der Ladegeräte [62]. Für Schnellladesäulen mit 450 kW sind Investitionen in Höhe von ca. 325.000 bis 450.000 € inkl. Anschluss erforderlich [31]. Dies sollte bei E-Bussen der jüngsten Generation nicht mehr nötig sein, für sie reicht i. d. R. Übernachtladung im Depot an Doppelladesäulen mit 150 kW pro Bus aus (s. a. Abschnitt zur Technik). Zu berücksichtigen ist allerdings auch der Flächenbedarf für die Ladestationen, der ggf. kostenträchtige Umbauten im Busdepot nötig macht.

Investitionskosten für Infrastruktur und Logistik bei Wasserstoff-Bussen: Bei einer geringen Anzahl an Fahrzeugen sind die Kosten einer Wasserstofftankstelle pro Bus vergleichsweise hoch, das verringert sich bei einer größeren Anzahl an Fahrzeugen. Zwischen 10 und 50 Fahrzeugen liegen die Kosten für die Tankstelle zwischen 100.000 € und 200.000 € pro Bus [30]. Ohne die Kosten für Baumaßnahmen kommen andere Studien auf 70.000 € bis 120.000 € pro Bus [63]. Werden stattdessen öffentliche Tankstellen genutzt, sind die dortigen investiven Kapitalkosten im Wasserstoffpreis mit zu bezahlen. Zu berücksichtigen ist allerdings auch der Flächenbedarf für die Wasserstofftankstellen, der ggf. kostenträchtige Um- bzw. Zubauten auf dem Busdepotgelände nötig macht (s. a. Abschnitt „Der Infrastrukturaufwand für Wasserstoff ist eher höher“).

Fazit zu Investitionskosten für Infrastruktur und Logistik: Bei Einrichtung einer eigenen Wasserstofftankinfrastruktur dürften die Investitionskosten bei Wasserstoff-Bussen i. d. R. höher liegen als bei E-Bussen.

Betriebskosten für die Wartung von E-Bussen und Wasserstoff-Bussen: Laut dem Informationsportal Elektromobilität des Landes NRW liegen die Wartungskosten für Batterie-Busse aufgrund der geringeren Komplexität des elektrischen Antriebsstranges und der insgesamt niedrigeren Wartungsaufwände (z. B. Entfall des Ölwechsels für Motor und Getriebe, sowie weniger mechanische Bauteile) niedriger als bei Dieselbussen. Allerdings schlägt der etwa alle 6

Jahre bis 15 Jahre nötige Austausch der Batterien kostenmäßig erheblich zu Buche. Für die Brennstoffzellen-basierten Fahrzeugkonzepte sind aufgrund der zusätzlichen, gasführenden Komponenten im Vergleich zum Dieselbus annähernd gleiche und im Vergleich zum E-Bus höhere Wartungskosten zu erwarten. Der nach bisherigem Stand der Technik auch alle ca. 6 Jahre nötige Austausch des Brennstoffzellen-Stacks liegt auf demselben Kostenniveau oder eher etwas über dem für den Austausch der E-Bus-Batterien. [62, 64, 65]

Fazit: Es ergeben sich keine signifikanten Vor- oder Nachteile für eine der beiden Antriebsarten. Allerdings existiert für E-Busse bereits eine größere Breite an Langzeiterfahrungen.

Energetische Betriebskosten für E-Busse: Da Elektromotoren effizienter arbeiten als Dieselmotoren, liegen die Stromverbrauchskosten von E-Bussen deutlich unter den Treibstoffverbrauchskosten von Diesel-Bussen. Seit dem Krieg in der Ukraine gab es sowohl beim Diesel als auch beim Strom erhebliche Preissprünge. Mittel- bis langfristig wird jedoch der teure fossile Strom durch günstigeren Grünstrom ersetzt werden (die EE-Strom Gestehungskosten liegen inzwischen 4 bis 6 Cent/kWh). Insofern kann man bei E-Bussen auch in Zukunft auf eine zukunftssichere, relativ kostengünstige Energieversorgung setzen.

Energetische Betriebskosten für Wasserstoff-Busse: In 2023 steht Wasserstoff an öffentlich zugänglichen privatwirtschaftlichen Tankstellen zwischen 27 Cent/kWh und 45 Cent/kWh zur Verfügung [66]. Der Preis für derzeit in Einzelfällen als „Abfallprodukt“ aus der chemischen Industrie für wenige Cent/kWh angebotenen Wasserstoff muss als mengenmäßig und zeitlich begrenztes Angebot bewertet werden. Kostengünstigen grünen Wasserstoff wird es in Deutschland nur geben, wenn zu dessen Erzeugung nur überschüssiger Wind- und Solarstrom verwendet wird, der sonst abgeregelt würde. Mit diesem Strom zu 0 – 2 Cent/kWh lässt sich dann (ohne Steuern und Abgaben) Wasserstoff für ca. 4 Cent/kWh bis 6 Cent/kWh erzeugen. Zu diesen Preisen wäre ggf. auch Wasserstoffimport aus der dänischen und norwegischen Nordsee möglich. Doch dieser preisgünstige Wasserstoff wird nur in einer Gesamtmenge von 300 TWh bis 600 TWh zur Verfügung stehen. Das reicht für die Industrie und die Residualstromerzeugung, aber nicht für größere Anteile im Verkehr [57, 58, 59, 60, 61]. Auch der vielzitierte billige Wasserstoff aus Brasilien, Namibia, Australien usw. erweist sich inzwischen als Wunschdenken. Arthur D. Little [67] prognostizierte, dass Wasserstoff aus Saudi-Arabien bis zu 6-mal teurer wäre als Diesel. Beim Import aus dem politisch instabilen Nordafrika kommt z. B. Fraunhofer ISE in einer aktuellen Studie auf ca. 13 Cent/kWh [68]. Beim Fernimport aus Australien etc. kommt eine aktuelle Studie der Boston Consulting Group „Turning the European Green H₂-Dream into Reality“ durch die hohen Transportkosten auf bis zu 24 Cent/kWh [69]. Vor diesem Hintergrund ist es nicht erstaunlich, dass z. B. in Frankreich die Stadt Montpellier die Bestellung ihrer Wasserstoff-Busse wegen zu hoher Wasserstoffkosten storniert hat [70]. In Dänemark brach die Wasserstoffversorgung für den Verkehrsbereich wegen fehlender Wirtschaftlichkeit zusammen [71]. Und in Japan erklärte der weltgrößte Wasserstoffversorger Air Liquide Wasserstoff im Verkehr für unwirtschaftlich [72].

Fazit Energieversorgung von E-Bussen und Wasserstoff-Bussen: Eine relativ kostengünstige Versorgung mit Strom scheint bei den E-Bussen kurz-, mittel- und langfristig gesichert. Abgesehen von langfristig nicht gesicherten Sonderfällen (günstiger Wasserstoff aus der Industrie oder aus hochsubventionierten Pilotprojekten) erscheint die Versorgung mit kostengünstigem grünem Wasserstoff in ausreichender Menge für den ÖPNV völlig ungesichert.

Quellen

1. E-Bus-Radar 2023; (2023); Partner, Infrastructure & Mobility, PwC Germany; <https://www.pwc.de/de/branchen-und-markte/oeffentlicher-sektor/e-bus-radar.html>
2. Collins L. (Recharge, 12 January 2022); French city drops order for 51 hydrogen buses after realising electric ones six times; <https://www.rechargenews.com/energy-transition/french-city-drops-order-for-51-hydrogen-buses-after-realising-electric-ones-six-times-cheaper-to-run/2-1-1143717>;
3. German city to retire its one-year-old hydrogen fuel-cell buses after €2.3m filling station breaks down; (16.12.2022); Hydrogen Insight; <https://www.hydrogeninsight.com/transport/german-city-to-retire-its-one-year-old-hydrogen-fuel-cell-buses-after-2-3m-filling-station-breaks-down/2-1-1375568>;
4. Verkehr – Mainz: Pilotprojekte für klimaschonende Busse und Bahnen im Land; (04.06.2023); SZ; <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/verkehr-mainz-pilotprojekte-fuer-klimaschonende-busse-und-bahnen-im-land-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-230604-99-934131>;
5. Wiener Linien testen neue Wasserstoffbusse; (14.07.2023); ORF; <https://wien.orf.at/stories/3215937/>;
6. Wuppertaler Stadtwerke planen 32 Wasserstoffbusse mehr bis 2025; (17.07.2023); WZ; https://www.wz.de/nrw/wuppertal/wuppertaler-stadtwerke-planen-32-wasserstoffbusse-mehr-bis-2025_aid-93944353;
7. Wie in Wuppertal aus Müll Mobilität wird; (11.2020); AWG Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH Wuppertal; <https://awg-wuppertal.de/ueber-uns/muell-macht-mobil.html>
8. 100 Wasserstoffbusse für die DVG; (11.2022); DVG; <https://www.dvg-duisburg.de/wasserstoffbusse>;
9. Mit Wasserstoff statt Diesel; (10.09.2021); FNP; <https://www.fnp.de/lokales/kreis-gross-gerau/wasserstoff-statt-diesel-13775628.html>;
10. Groß-Gerau: Bundeszuschuss für 15 Brennstoffzellen-Busse; (07.07.2022); Echo; <https://www.echo-online.de/lokales/kreis-gross-gerau/landkreis-gross-gerau/gross-gerau-bundeszuschuss-fuer-15-brennstoffzellen-busse-1934730>;
11. RVK Köln – die lange Geschichte ihrer Wasserstoffbusse; (04.01.2023); Urban-Transport-Magazine; <https://www.urban-transport-magazine.com/rvk-koeln-die-lange-geschichte-ihrer-wasserstoffbusse/>;
12. Geld vom Land Hessen: Weitere Wasserstoffbusse in Frankfurt; (05.10.2023); FR; [https://www.fr.de/frankfurt/geld-vom-land-hessen-weitere-wasserstoffbusse-in-frankfurt-92560338.html#:~:text=Die%20Busse%20haben%20eine%20Reichweite,auf%20der%20Buslinie%20M36%20Unterwegs](https://www.fr.de/frankfurt/geld-vom-land-hessen-weitere-wasserstoffbusse-in-frankfurt-92560338.html#:~:text=Die%20Busse%20haben%20eine%20Reichweite,auf%20der%20Buslinie%20M36%20Unterwegs;);
13. Die E-Busse der KVG; (2023); KVV; <https://www.kvvs.de/services/presse/detail/die-e-busse-der-kvg-1/>
14. Christian Marquardt; Bielefelds Wasserstoffbusse; (21.08.2023); Urban-Transport-Magazine; <https://www.urban-transport-magazine.com/bielefelds-wasserstoffbusse/>;
15. Schaal S.; Iveco und Solaris gewinnen wohl Mailänder E-Bus-Ausschreibung; (2023); electrive; (<https://www.electrive.net/2023/08/11/iveco-bus-und-solaris-gewinnen-wohl-mailaender-e-bus-ausschreibung/>)
16. Mobilität in Deutschland – Stadt München, Münchner Umland und MVV-Verbundraum; (2019); infas; <https://www.muenchen-transparent.de/dokumente/5499206/datei>;
17. 21 neue E-Busse im Netz der MVG im Einsatz; (12.09.2023); MVG; <https://www.mvg.de/ueber/presse-print/presse-meldungen/2023/september/21-neue-E-Busse.html>;
18. E-Bus-Standard – Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse; (2017); Fraunhofer IVI; https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-04/Abschlussbericht_E-Bus-Standard.pdf;
19. Anschaffungskosten und Laufleistungen von Kraftomnibussen; (11.2023); Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag; <https://www.bundestag.de/resource/blob/942420/23f2bfaed565bee2be1b2c0b7d2bb2ce/WD-5-011-23-pdf-data.pdf>
20. Leise surrend unterwegs: Ein neuer Elektrobus; (06.12.2021); CZ; <https://www.cz.de/celle/celle/klimaschonende-e-busse-cebus-testet-weiteren-elektrobus-celle-und-region>;
21. MAN setzt Messlatte in puncto Reichweite: Elektrobus knackt 550 Kilometer-Marke; (19.05.2021); MAN Newsroom; <https://press.mantruckandbus.com/corporate/de/man-setzt-messlatte-in-puncto-reichweite-elektrobus-knackt-550-kilometer-marke/>
22. Busworld: Solaris mit Urbino 18 electric und hydrogen vor Ort; (12.10.2023); busplaner; https://www.busplaner.de/de/news/busworld-europe-elektromobilitaet-e-mobilitaet-wasserstoff_busworld-solaris-mit-urbino-18-electric-und-hydrogen-vor-ort-84755.html;

23. Elektromobilität: MVG bestellt E-Gelenkbusse bei Ebusco; (19.01.2022); OMNIBUSREVUE; <https://www.omnibusrevue.de/nachrichten/technik/elektromobilitaet-mvg-bestellt-e-gelenkbusse-bei-ebusco-3119088>;
24. SWEG bestellt bis zu 25 Busse vom Typ Ebusco 2.2; (10.07.2023); Nahverkehrspraxis; <https://www.nahverkehrspraxis.de/sweg-bestellt-bis-zu-25-busse-vom-typ-ebusco-2-2/>;
25. Batterie- Linienbus; (19.10.2023); mobil.nrw ; <https://infoportal.mobil.nrw/technik/busse-mit-elektrischem-antrieb/batterie-linienbus.html>;
26. Offenbach: Drei Elektrobusse bleiben an Steigung hängen: (02.07.2021); FR; <https://www.fr.de/rhein-main/drei-offenbacher-elektrobusse-bleiben-an-steigung-haengen-90836926.html>;
27. Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV; (11.2018); NOW; https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2018/12/NOW-Broschuere_Wasserstoffbusse-im-OePNV.pdf
28. Hohe Reichweite trotz Kälte: Bahn mit E-Bussen zufrieden; (6.12.2023), SWR; <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/friedrichshafen/elektrobusse-in-oberschwaben-laufen-auch-bei-kaelte-gut-100.html>;
29. Dominic Jefferies*, Tu-Anh Ly, Alexander Kunith, Dietmar Göhlich; Energiebedarf verschiedener Klimatisierungssysteme für Elektro-Linienbusse; (2015); TU Berlin; https://www.researchgate.net/publication/285396879_Energiebedarf_verschiedener_Klimatisierungssysteme_fur_Elektro-Linienbusse;
30. Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; (2020); sphaera im Auftrag Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV); <https://www.vdv.de/emissionsfreie-energie-und-antriebskonzepte-fuer-stadtbusse.pdfx>;
31. Dekarbonisierung des ÖPNV im Landkreis Celle – Gutachten zum künftigen Einsatz von sauberen Bussen auf Linien in Aufgabenträgerschaft des Landkreises; (07.2022); KCW Berlin im Auftrag des LK Celle; darf aus Copyrightgründen nicht weitergegeben werden;
32. BYD zeigt Blade-Batterie für Elektro-Busse; (09.2022); BYD; <https://www.electrive.net/2022/09/20/byd-zeigt-blade-batterie-fuer-elektro-busse/>
33. Fuel Cell Power for Medium Duty Applications; (2023); Data Sheet der Ballard Power Systems; https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/spc5111379-0a.pdf?sfvrsn=8210de80_6;
34. Solaris Urbino 18 hydrogen – Technische Daten; (2023); Solaris; https://www.solarisbus.com/public/assets/Biuro_prasowe/2022_09_14_Premiera_Urbino_18_hydrogenST/Tec hnische_Daten_Urbino_18_hydrogen.pdf.pdf;
35. Technische Daten sonnenBatterie 10; (2023); Datenblatt der sonnen GmbH; <https://sonnen.de/stromspeicher/sonnenbatterie-10/>;
36. Elektrobusse; (2024); EBUSCO; <https://www.ebusco.com/de/elektrobusse/>;
37. EBUSCO 2.2; (2024); EBUSCO; https://www.ebusco.com/wp-content/uploads/Trifold-Ebusco-2.2_2021_DU.pdf;
38. Der eCITARO – Alle technischen Daten und Ausstattungen im Überblick; (2024); Mercedes Benz; https://www.mercedes-benz-bus.com/de_DE/models/ecitaro/facts/facts-ecitaro.pdf;
39. eCITARO FUEL CEL – Alle technischen Daten und Ausstattungen im Überblick; (2024); Mercedes Benz; https://www.mercedes-benz-bus.com/de_DE/models/ecitaro-fuel-cell/facts/facts-ecitaro-fuel-cell.pdf;
40. MAN LION'S CITY 18 E; (2024); MAN; https://www.man.eu/ntg_media/media/de/content_medien/doc/bw_master/bus_1/datenblaetter/20201110_Bus_Datenblatt_18E.pdf;
41. MAN LION'S CITY 12 E; (2024); MAN; https://www.man.eu/ntg_media/media/de/content_medien/doc/bw_master/bus_1/datenblaetter/man_datenblatt_lionscity_12e.pdf;
42. ICB ordert 13 Solaris Wasserstoffbusse; (05.2021); Bus Blickpunkt; <https://www.busnetz.de/icb-ordert-13-solaris-wasserstoffbusse/>;
43. Anforderungen an Betriebshöfe und Werkstätten beim Einsatz von Linienbussen mit sauberen und/oder emissionsfreien Antrieben; VDV; <https://knowhow.vdv.de/documents/825/>;
<https://knowhow.vdv.de/documents/825/>
44. Elektrifizierung von KMU-Busunternehmen; (2023), VDE; <https://www.vde.com/resource/blob/2252636/1c9de42d04df887d82cff860f5368e16/lbo-studie-2023-data.pdf>;

45. Kommunale Elektromobilitätskonzepte – Motivation und Hemmnisse bei der Einführung von Elektrobussen; (2021); NOW; https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/09/210921_Kommunale-Elektromobilitaetskonzepte-Programmbegleitforschung-Innovative-Antriebe-im-strassengebundenen-OePNV.pdf;
46. Wolfgang Reitmeier; Der Busbetriebshof im Wandel zum E-Busbetriebshof; (2022); bdo 15 „Trends und Innovationen“, VDV; https://www.wbo.de/images/22Akt_V/220217_Anlage_Der_Busbetriebshof_im_Wandel_zum_E-Busbetriebshof_bdo_10022022.pdf;
47. Förderung von ÖPNV-Linienbussen; (Dezember 2023); Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen (LNVG); nicht mehr verfügbar;
48. Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr – Fahrzeuge und Infrastruktur; (05.2023); PtJ; <https://www.ptj.de/projektfoerderung/busfoerderung/beschaffung>;
49. <https://www.erneuerbar-mobil.de/foerderprogramme/foerderprogramm-fuer-die-anschaffung-von-elektrobussen-im-oeffentlichen-Personennahverkehr>; BMWK; <https://www.erneuerbar-mobil.de/foerderprogramme/foerderprogramm-fuer-die-anschaffung-von-elektrobussen-im-oeffentlichen>;
50. NRW-Förderung (Gesetz über den öffentlichen Personennahverkehr in Nordrhein-Westfalen nach §13 Absatz 1 Nr. 6 ÖPNVG NRW); ElektroMobilitätNRW; <https://www.elektromobilitaet.nrw/foerderprogramme/elektrobusse/>;
51. Förderung von Elektrobussen und für den Betrieb erforderlicher Infrastruktur; Innovationsförderung Hessen; (2023); <https://www.innovationsfoerderung-hessen.de/elektrobusse>;
52. 16,6 Millionen Euro für klimafreundliche Busse und Wasserstoffforschung im Saarland; (04.2023); BMDV; <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2023/033-klimafreundliche-busse-und-wasserstoffforschung-im-saarland.html>;
53. Förderung von ÖPNV-Linienbussen; (Ende Januar 2024); Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen (LNVG); <https://www.lnv.de/foerderung/oepnv-foerderung/oepnv-linienbusse>;
54. E-Busse: „Fordern ohne Fördern funktioniert nicht“; (03.01-2024); VDV; <https://www.vdv.de/240103-pm-e-busfoerderung.pdf>;
55. E-Busse: VDV fordert verlässliche Bundesförderung; (12.01.2024); busblickpunkt; <https://www.busnetz.de/e-busse-vdv-fordert-verlaessliche-bundesfoerderung/>;
56. Busförderung: Nur 23 Unternehmen kommen zum Zug; (14.11.2023); OMNIBUSREVUE; <https://www.omnibusrevue.de/nachrichten/management/busfoerderung-nur-23-unternehmen-kommen-zum-zug-3453900>;
57. Klimaneutrales Deutschland 2045; (2021), AGORA; https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_01_DE_KNDE2045/KNDE2045_Langfassung.pdf;
58. Langfristszenarien 3 – Wissenschaftliche Analysen zur Dekarbonisierung Deutschlands; (2022), Fraunhofer ISI; <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>;
59. Netzentwicklungsplan Strom; (2023); Bundesnetzagentur; <https://www.netzentwicklungsplan.de/>
60. Kurzanalyse zum geplanten Wasserstoff-Kernnetz und der damit verbundenen Importinfrastruktur; AURORA ENERGY RESEARCH; https://energien-speichern.de/wp-content/uploads/2024/01/20240104_Aurora_Kurzanalyse_zum_Wasserstoffkernnetz.pdf;
61. FAQ zum Wasserstoff-Kernnetz; (15.11.2023); BMWK; <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/FAQ/Wasserstoff-Kernnetz/faq-wasserstoff-kernnetz.html>;
62. Leitfaden für Busse mit alternativen Antrieben; (2021); NOW; https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/03/Leitfaden-fuer-Busse-mit-alternativen-Antrieben_NOW.pdf;
63. Machbarkeitsstudie: HyExperts – Lastverkehr mit grünem Wasserstoff – Future Mobility; (2021); HYEXPERTS im Auftrag des LK Osterholz; https://www.hy.land/wp-content/uploads/2022/03/abschlussbericht_hyexperts_osterholz.pdf;
64. Am E-Bus geht kein Weg mehr vorbei; (2023); IAA Transportation des VDA; <https://www.iaa-transportation.com/de/newsroom/e-bus>;
65. Elektromobilität im ÖPNV; (12.10.2023), Infoportal mobil.nrw; <https://infoportal.mobil.nrw/technik/elektromobilitaet.html>;
66. H₂ Mobility stellt auf neues Preismodell um; (04.10.2023); electrive.net; <https://h2.live/news/3139/>;
67. Matthias von Bechtolsheim; Wasserstoff-Strategie erforderlich Wo und wie sollten sich Energieversorger beim Wasserstoff engagieren?; (2020); Arthur D. Little; <https://www.adlittle.com/de-de/HydrogenStrategy>;

68. Christoph Hank, Marius Holst, Connor Thelen, Christoph Kost, Sven Längle, Achim Schaadt, Tom Smolinka; *Site-specific, comparative analysis for suitable Power-to-X pathways and products in developing and emerging countries*; (08.2023); Fraunhofer ISE; <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-H2Global-Study-Power-to-X-Country%20Analysis.pdf>;
69. *Turning the European Green Hydrogen Dream into Reality: A Call to Action*; (10.2023), Boston Consulting Group <https://media-publications.bcg.com/Turning-the-European-Green-H2-Dream-into-Reality.pdf>;
70. *Stadt storniert Wasserstoff-Busse – Bei der Kalkulation der Betriebskosten hat sich gezeigt, dass Elektro-Busse sechsmal effizienter sind als Wasserstoff-Busse*; (14.01.2022); futurezone.at; <https://futurezone.at/digital-life/stadt-montpellier-storniert-wasserstoff-busse-e-busse-effizienter-betriebskosten-anschaffung/401870861>;
71. *Hydrogen vehicles in Denmark left without fuel as all commercial refuelling stations shuttered*; (19.09.2023); Hydrogen Insight; <https://www.hydrogeninsight.com/transport/hydrogen-vehicles-in-denmark-left-without-fuel-as-all-commercial-refuelling-stations-shuttered/2-1-1519914>;
72. *Foolish business owners who push forward with hydrogen vehicles will be fired by their shareholders': H2 taxi operator*; (24.07.2023); Hydrogen Insight ; <https://www.hydrogeninsight.com/transport/foolish-business-owners-who-push-forward-with-hydrogen-vehicles-will-be-fired-by-their-shareholders-h2-taxi-operator/2-1-1490482>;
73. *Wasserstoff*; (2024); LEA Hessen; <https://www.lea-hessen.de/energiewende-in-hessen/wasserstoff/>;
74. *Batterie – Linienbus*; (10.2023); mobil.nrw; <https://infoportal.mobil.nrw/technik/busse-mit-elektrischem-antrieb/batterie-linienbus.html>;
75. *Brennstoffzellen – Linienbus*; (10.2023); mobil.nrw; <https://infoportal.mobil.nrw/technik/busse-mit-elektrischem-antrieb/brennstoffzellen-linienbus.html>;
76. *BSAG bestellt 50 batteriebetriebene Gelenkbusse*; (05.2023); Verkehrsverbund Bremen/Niedersachsen GmbH (VBN); <https://www.vbn.de/vbn/presse-news/presse/die-bsag-bestellt-50-batteriebetriebene-gelenkbusse>;
77. *IVECO E-WAY: 543 KILOMETER MIT NUR EINER LADUNG*; (2023); Iveco Pressemitteilung (2021); <https://cloudfront.cdn.iveco.com/germany/presse/veroeffentlichungen/pages/iveco-e-way-reichweite.aspx>
78. *Die E-Busse der KVG*; (2023); KVV; <https://www.kvvs.de/services/presse/detail/die-e-busse-der-kvg-1/>;
79. *Martin Schmitz, Wolfgang Reitmeier; EBUS aktueller Stand und Ausblick*; (21.06.2023); Jahrestagung des VDV in Leipzig; <https://www.vdv.de/martin-schmitz-wolfgang-reitmeier-vdv-e-bus-aktueller-stand-und-ausblick-pdf.pdf>;
80. *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht*; (2018); infas et al im Auftrag des BMVD; https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/archive/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf;
81. *Planung von Elektrobuslinien und ihrer Infrastruktur*; (2019); BPV Consult GmbH – Gesellschaft für Beratung und Projektmanagement im Verkehr, https://www.traffiq.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Vergaben/2019/traffiQ_Technisches_Handbuch_Buendel_A_2019_06_28.pdf;
82. *VDV Statistik für 2019*; (2020); Verband Deutscher Verkehrsunternehmen VDV; <https://www.vdv.de/vdv-statistik-2020.pdf?forced=true>;
83. *Elektrolyse von Wasser zur Herstellung von Wasserstoff*; (2023); TÜV Nord: <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/herstellung/elektrolyse-von-wasser/>;
84. *Wie wird (grüner) Wasserstoff durch Elektrolyse erzeugt?*; (2023); FH Münster; https://www.fh-muenster.de/equ/fue/fue_gebiete/sectorenkopplung/hymat/FRAGEDESMONATSDEZ.php;
85. *Wirkungsgrad – Elektrolyse – Whitepaper*; (2020); Siemens; <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:a5fa8257-6c71-496f-a324-454241f1df71/version:1626344342/white-paper-effizienz-de.pdf>;
86. *Ulf Bossel; Wasserstoff löst keine Energieprobleme*; (2006); European Fuel Cell Forum; <https://www.tatup.de/index.php/tatup/article/view/1229/2324>;
87. *Thermodynamik und Kinetik der Brennstoffzelle*; (2023); ingenieurbuch.de; https://www.ingenieurbuch.de/media/blfa_files/9783658149345-Leseprobe.pdf;
88. *Wasserstoff-Brennstoffzelle: Funktion & Arten*; (2023); TÜV Nord; <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/wasserstoff-brennstoffzelle/>;

89. Jens Clausen; *Das Wasserstoffdilemma: Verfügbarkeit, Bedarfe und Mythen*; (2022), Berlin: Borderstep Institut; <https://www.borderstep.de/publikation/clausen-j-2022-das-wasserstoffdilemma-verfuegbarkeit-bedarfe-und-mythen-berlin-borderstep-institut/>;