

Ist Wasserstoff die Zukunft des Strassengüterverkehrs in Deutschland?

Dr.-Ing. Alexander Goudz

Lehrstuhl für Transportsysteme und Logistik

Universität Duisburg-Essen

Duisburg

alexander.goudz@uni-due.de

Gülcin Gülecik

Lehrstuhl für Transportsysteme und Logistik

Universität Duisburg-Essen

Duisburg

guelcin.guelecik@stud.uni-due.de

I. Forschungsfrage

In einer arbeitsteiligen Weltwirtschaft wird dem Transport eine hohe Bedeutung beigemessen. Nach Gleißner und Femerling wird der Transport als Kernfunktion für das Funktionieren, die Interaktion und den wirtschaftlichen Erfolg von Volkswirtschaften und des gesamten globalen Gesellschafts-systems angesehen.[1] Ohne Transport hätte die Globalisierung ihr heutiges Ausmaß möglicherweise nicht erreicht.

Damit ist die Güterverkehrsleistung in Deutschland zwischen 1991 und 2019 um 75 % gestiegen.[2] Insbesondere der Straßengüterverkehr hat sich in diesem Zeitraum verdoppelt. Nach aktuellen Prognosen im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr wird die Güterverkehrsleistung bis 2025 um 9,3 % zunehmen.[3] Für den Verkehrsträger Straßengüterverkehr wird für den Zeitraum 2019 bis 2025 ein Wachstum des Transportaufkommens von 4,4 % und der Transportleistung von 10,6 % prognostiziert.[3] Damit ist der Straßengüterverkehr heute und auch zukünftig der dominierende Verkehrsträger.

Die Gründe für diese Entwicklung liegen in einem verstärkten Strukturwandel im Güterverkehr. Laut des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur ist der Strukturwandel im Güterverkehr durch die fortschreitende Globalisierung, die internationale Arbeitsteilung und die veränderten Produktionsprozesse gekennzeichnet.[4] Einer

der Gründe für die Zunahme der Transportströme ist das Bedürfnis nach Konsum- und Produktdifferenzierung.[4] So werden z.B. im Supermarkt neben einheimischen auch nach ausländische Produkte nachgefragt.

Damit ist der Güterverkehr einer der einflussreichsten Treiber des Klimawandels. Laut des Umweltbundesamts ist der Verkehrssektor für etwa 20 % der Gesamtemissionen in Deutschland verantwortlich.[5] Vor dem Hintergrund der Güterverkehrsleistung und des damit verbundenen Anstiegs der Emissionen formuliert die Bundesregierung politische Rahmenbedingungen, um die Emissionen zu reduzieren. Im Jahr 2019 wurde das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) zur Minimierung der Treibhausgasemissionen verabschiedet.[6] Nach diesen sollen die Treibhausgasemissionen schrittweise bis 2030 um 65 % und bis 2040 um 88 % gegenüber 1990 reduziert werden. Bis 2045 wird eine Netto-Treibhausgasneutralität angestrebt, nach 2050 sollen negative Treibhausgasemissionen erreicht werden. Darüber hinaus legt das Klimaschutzgesetz des Bundes die „sektoralen jährlichen Emissionsbudgets bis 2030“ fest.[5] Demnach darf der Verkehrssektor im Jahr 2022 maximal 139 Millionen Tonnen CO₂ ausstoßen. Bis 2030 soll das jährliche Emissionsbudget auf 85 Millionen Tonnen CO₂ gesenkt werden.[7]

Auf der einen Seite ist der Güterverkehr, insbesondere der Straßengüterverkehr, unverzichtbar. Auf der anderen Seite ist jedoch aus klimapolitischen Gründen notwendig den Straßengüterverkehr emissionsfrei zu gestalten. Damit wird die Transportlogistikbranche zum Technologiewechsel gelenkt. Während sich das batterieelektrische Nutzfahrzeug in der Transportbranche etabliert hat und zunehmend im regionalen Verteilerverkehr eingesetzt wird, ist der Wasserstoff in der Transportbranche mit Unsicherheit verbunden.[8, 9] In diesem Zusammenhang erfolgt der wissenschaftliche Artikel unter Betrachtung der Leitfrage: Inwiefern kann sich Wasserstoff in der Zukunft im Straßengüterverkehr in Deutschland etablieren?

II. Methodik

In diesem wissenschaftlichen Artikel wird anhand einer Literaturrecherche aufgezeigt, inwieweit

Wasserstoff die Zukunft des Straßengüterverkehrs in Deutschland sein kann. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden drei Studien herangezogen und analysiert.

III. Stand der Wissenschaft

Der Antriebsstrang des rein batterieelektrischen Nutzfahrzeugs besteht aus den folgenden Hauptkomponenten:

- Elektromotor
- Leistungselektronik
- Akkumulator[10]

Rein batterieelektrische Nutzfahrzeuge werden elektrisch angetrieben. Die elektrische Energie wird im Elektromotor in mechanische (Antriebs-) Energie umgewandelt. Als Akkumulator wird bei Nutzfahrzeugen meist ein Lithium-Ionen-Akkumulator verwendet.

Rein batterieelektrische Nutzfahrzeuge sind emissionsfrei, wenn der geladene Strom aus erneuerbaren Energien gewonnen wurde. Daher müssen bei der Bewertung der Schadstoffbelastung, der durch ein rein batterieelektrisches Nutzfahrzeug verursacht wird, sowohl die Energieerzeugung (Gewinnung des Stroms) als auch die Endproduktmissionen in Bewegung berücksichtigt werden. Diese Gesamtbetrachtung wird als „Well-to-Wheel“-Betrachtung (von Erzeuger bis Verbraucher) bezeichnet.[10] Zudem ist der Elektroantrieb energieeffizient.[10] Da Elektromotoren einen Wirkungsgrad von ca. 90 % aufweisen. Ein Aspekt, der zu einem niedrigen Energieverbrauch beiträgt, ist die Rekuperation. Die Rekuperation ist die Nutzung der Bremsenergie zum Aufladen des Akkumulators.[10] Sie wirkt sich nicht nur positiv auf den Energieverbrauch, sondern auch auf die Lebensdauer der Bremsenanlagen aus. Außerdem arbeitet der Elektroantrieb ruhig und geräuschlos.[10] Damit wird das Problem der Lärmbelastung durch Nutzfahrzeuge in urbanen Räumen bewältigt. Des Weiteren sind rein batterieelektrische Nutzfahrzeuge leicht gebaut und einfach zu bedienen.[10] Beispielsweise ist der elektronische Übergang von Vorwärts- auf Rückwärtsfahrt, ohne dass ein Schaltgetriebe erforderlich ist, wie bei einem herkömmlichen Nutzfahrzeug.

Im Jahr 2023 gibt es insgesamt 80.541 öffentliche Ladepunkte in Deutschland. Davon sind 67.288 Normalladepunkte und 13.253 Schnellladepunkte.[11] An Schnellladepunkten beträgt die Ladedauer eines Fahrzeuges ca. 30 Minuten. Darüber hinaus können batterieelektrische Fahrzeuge in privaten Depots geladen werden. Depots werden auf Betriebshöfe oder Umschlagplätzen positioniert. Auf Betriebshöfen werden batterieelektrische Nutzfahrzeuge über Nacht und am Wochenende aufgeladen und dabei ist eine niedrige bis mittlere Ladeleistungen erforderlich. Auf Umschlagplätzen werden batterieelektrische Nutzfahrzeuge bei der Be- oder Entladung, Reinigung oder während Wartezeiten aufgeladen. Dabei sind mittlere Ladeleistung von 350-500 kW nötig. Das Laden an öffentliche Ladepunkte eignen sich besonders entlang der Hauptverkehrsachsen. Beispielsweise können batterieelektrische Nutzfahrzeuge während der Ruhezeit, der Pausenzeit oder auch außerhalb der Pausenzeit aufgeladen werden. Das Laden bei Ruhezeit erfordert eine niedrige Ladeleistung von 100-150 kW, beim Laden während der Pausenzeit oder außerhalb der Pausenzeit wird eine hohe Ladeleistung von 750 kW-1 MW vorausgesetzt aufgrund der begrenzten Zeit.[12]

Der Antriebsstrang des Wasserstoff-Nutzfahrzeugs besteht aus folgenden Hauptkomponenten:

- Brennstoffzelle
- Wasserstofftank
- Elektromotor
- Akkumulator[10]

Das Wasserstoff-Nutzfahrzeug bezieht seine Antriebsenergie aus dem Wasserstoff. Die Aufgabe der Brennstoffzelle ist es, die chemische Energie, die im Energieträger Wasserstoff gespeichert ist, in elektrische Energie umzuwandeln.[10] Die elektrische Energie wird entweder im Akkumulator zwischengespeichert oder direkt dem Elektromotor zugeführt. Der Wasserstoff wird in Hochdrucktanks mit einem Druck von 700 bar für Personenkraftwagen und 350 bar für Busse und Lastkraftwagen gespeichert. Die hohen Drücke werden zur Kompression des Wasserstoffes verwendet und dienen dazu, den Wasserstoff so zu verdichten, dass die erforderliche Masse an Wasserstoff in einem kleinen,

für mobile Zwecke akzeptable Volumen gespeichert werden kann.[10]

Wasserstoff-Nutzfahrzeuge verfügen über eine hohe Reichweite, es werden Reichweiten von bis zu 600 km erreicht. Ein weiterer positiver Aspekt ist die kurze Betankungszeit, welches vergleichbar mit herkömmlichen Diesel- oder Benzinbetankung ist. Wie bei rein batterieelektrischen Nutzfahrzeugen werden auch bei Wasserstoff-Nutzfahrzeugen Lithium-Ionen-Akkumulatoren eingesetzt. Im Gegensatz zu rein batterieelektrischen Nutzfahrzeugen haben Lithium-Ionen-Akkumulatoren jedoch eine geringe Kapazität. Die Aufgabe des Lithium-Ionen-Akkumulators ist lediglich die Unterstützung des Fahrzeugs beim Hochfahren der Brennstoffzelle, bei schneller Änderung der Leistungsanforderung und bei der Rekuperation.[10]

Marktüberblick: Der Hyundai *XCIENT Fuel Cell* ist eines der ersten kommerziell eingesetzten Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge in Europa.[13] Derzeit wird der Hyundai *XCIENT Fuel Cell* in der Schweiz als *Pay-Per-Use* Modell eingesetzt. Auch in Deutschland bietet Hylane den Hyundai *XCIENT Fuel Cell* als *Pay-Per-Use* Modell an. Das bedeutet, dass vor der Nutzung des Fahrzeugs eine individuell berechnete Kilometerpauschale festgelegt wird.[14] In der Kilometerpauschale ist die Bereitstellung inklusive Zulassung des Fahrzeugs und die Beantragung von Sondergenehmigung, Wartung und Reparaturen, Versicherung, Steuern, Reifenservice sowie Rücknahme enthalten.[14] In der Schweiz sind 50 Hyundai *XCIENT Fuel Cell* im Einsatz und bis 2025 ist der Einsatz von 1600 Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen geplant.[13] Der Hyundai *XCIENT Fuel Cell* hat ein Gesamtgewicht von 36 Tonnen und ein Tankvolumen von 32 kg. Die Betankungszeit beträgt 8-20 Minuten und es wird eine Reichweite von bis zu 400 km erreicht.[13] Der Hersteller Nikola Motors eröffnet 2021 gemeinsam mit IVECO eine Produktionsstätte in Ulm. Damit wird die Markteinführung von Brennstoffzellen-Lkw und batterieelektrische Lkw in Europa erzielt.[15] Der erste Auftrag von 100 Sattelzugmaschinen des Typs *Nikola Tre FCEV* erfolgt durch GP JOULE im Jahr 2023.[16] Die ersten 30 Sattelzugmaschinen sollen 2024 an GP JOULE ausgeliefert werden, die restlichen 70 im Jahr 2025.[16] Für den deutschen

Straßengüterverkehr soll der *Nikola Tre FCEV* ab 2024 zur Verfügung stehen. Der *Nikola Tre FCEV* hat eine Tankgröße von 70 kg und ermöglicht Reichweiten von bis zu 800 km. Das Fahrzeug wird bei einem Druck von 700 bar betankt. Diese Betankungstechnologie wird bisher hauptsächlich bei Pkw eingesetzt. Die Betankungszeit beträgt ca. 20 Minuten.[17] Die Daimler Truck AG entwickelt einen ersten Prototypen des wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen-Lkw Mercedes Benz *GenH2 Truck* mit flüssigem Wasserstoff. Der Vorteil von flüssigem Wasserstoff ist die deutlich höhere volumetrische Energiedichte im Vergleich zu gasförmigem Wasserstoff.[18] Dadurch kann mehr Wasserstoff transportiert werden und eine größere Reichweite erzielt werden. Als Entwicklungsziel für den serienreifen *GenH2 Truck* ist eine Reichweite von bis zu 1.000 Kilometern angestrebt. Damit ist der *GenH2 Truck* für den schweren Fernverkehr ausgelegt. Die Kundenerprobung ist für 2023 geplant und der Beginn der Serienproduktion ist für die zweite Hälfte des Jahrzehnts vorgesehen.[18]

Das Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung sieht vor, dass bis 2030 rund ein Drittel der Fahrleistung im Straßengüterverkehr elektrisch oder mit strombasierten Kraftstoffen wie z.B. Wasserstoff erbracht wird.[19] Aus diesem Anlass fördert die Bundesregierung seit 2021 Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben sowie die Tank- und Ladeinfrastruktur mit dem Förderprogramm nach der „Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und der dazugehörigen Tank- und Ladeinfrastruktur“.[19] Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) stellt bis zum Jahr 2025 rund 1,3 Milliarden Euro für die Förderung der Anschaffung klimafreundlicher Nutzfahrzeuge und 6,3 Milliarden Euro für den Auf- und Ausbau der Tank- und Ladeinfrastruktur zur Verfügung.[20] Das Förderprogramm hat eine Laufzeit bis Ende 2026. Gefördert werden die Anschaffung von Nutzfahrzeugen, Sonderfahrzeugen und umgerüsteten Dieselfahrzeugen mit Batterie- und Brennstoffzellenantrieb sowie Plug-In-Hybrid und Oberleitungshybridantrieben, der Auf- und Ausbau der Tank- und Ladeinfrastruktur

sowie die Erstellung von Machbarkeitsstudien. Antragsberechtigt sind Unternehmen des privaten Rechts, kommunale Unternehmen und Körperschaften sowie Anstalten des öffentlichen Rechts und eingetragene Vereine sowie Leasing- und Vermietungsunternehmen. Bei der Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben wird ein Zuschuss in Höhe von 80 % der Investitionsmehrkosten im Vergleich zu Dieselfahrzeugen, bei der Tank- und Ladeinfrastruktur wird ein Zuschuss in Höhe von 80 % und bei der Erstellung von Machbarkeitsstudien ein Zuschuss in Höhe von 50 % der zwendungsfähigen projektbezogenen Gesamtausgaben gewährt.[21]

Für die Herstellung von Wasserstoff gibt es verschiedene Methoden. In Abhängigkeit von der Art der Herstellung wird der Wasserstoff in verschiedene Farben eingeteilt. Die Farbuordnung des Wasserstoffs dient der Differenzierung der Herstellungsverfahren und gibt Aufschluss über die Klimaneutralität des erzeugten Wasserstoffs.[22] Darüber hinaus bestimmt das Herstellungsverfahren den Preis des Wasserstoffes.[23] Unterschieden wird zwischen grauem, braunem, blauem, türkischem, weißem, grünem und rosa/rot/pinkem Wasserstoff.

Grauer Wasserstoff wird durch chemische Verfahren wie Dampfreformierung und partielle Oxidation aus den fossilen Energieträgern wie Erdgas, Schweröl oder Kohle hergestellt.[22] Die Dampfreformierung (*Steam Reforming*) ist ein etabliertes Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff in der Industrie.[22] Als Ausgangsstoff wird meist Erdgas eingesetzt, welches Methan enthält. Bei beiden Wasserstoffgewinnungsprozessen entsteht als Abfallprodukt Kohlendioxid, das in die Atmosphäre abgegeben wird. Aufgrund der entstehenden Kohlendioxid-Emissionen und der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern wird grauer Wasserstoff nicht als klimaneutral eingestuft.

Die Herstellung von **braunem Wasserstoff** erfolgt durch die Vergasung von Kohle. Dabei entsteht jedoch wie beim grauen Wasserstoff Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid als Nebenprodukte, die in die Atmosphäre freigesetzt werden. Daher ist auch brauner Wasserstoff nicht als klimaneutral zu bezeichnen.[24]

Die Gewinnung von **blauem Wasserstoff** erfolgt wie beim grauem Wasserstoff. Das bei der Wasserstoffproduktion entstehende Kohlendioxid wird jedoch nicht in die Atmosphäre abgegeben, sondern aufgefangen und unterirdisch gespeichert. Dieses Verfahren wird als *Carbon Capture and Storage* (CCS) bezeichnet.[25] Trotz der Einlagerung des Kohlenstoffdioxids im Untergrund ist der blaue Wasserstoff nicht vollständig klimaneutral. Zum einen lassen sich Leckagen beim Transport und der Förderung von Erdgas nicht vermeiden und zum anderen ist die vollständige Abtrennung des Kohlendioxids aus dem Abgas nach der Reformierung des Erdgases nicht gewährleistet. Der Ausbau der Kohlendioxid-Speicherkapazitäten und die Sicherstellung der kontinuierlichen Kohlendioxid-Speicherung sind Voraussetzungen für den blauen Wasserstoff. Blauer Wasserstoff ist laut Umweltbundesamt kein nachhaltiger Energieträger für eine emissionsfreie Energieversorgung.[25]

Türkiser Wasserstoff wird durch Methanpyrolyse[24] hergestellt. Hierbei ist Erdgas das Ausgangsprodukt. Die Methanpyrolyse erfolgt durch die thermische Spaltung von Methan. Dabei entstehen neben dem Wasserstoff fester Kohlenstoff und kein gasförmiges Kohlendioxid wie beim grauen und blauen Wasserstoff, welches in die Atmosphäre entweicht. Der feste Kohlenstoff kann im Untergrund gelagert und in unterschiedlichen Industrien verwendet werden. Um türkisen Wasserstoff als CO₂-neutral einzuordnen zu können, wird die Wärmeversorgung des Hochtemperaturreaktors aus erneuerbaren Energiequellen als auch die dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs vorausgesetzt.[24] Wasserstoff, der in bestimmten Regionen wie Afrika natürlich vorkommt, wird als **weißer Wasserstoff** bezeichnet. Die Gewinnung von weißem Wasserstoff erfolgt durch den Einsatz von Fracking-Technologien. Das Potenzial hierfür wird aufgrund der derzeit geringen Mengen und der Umweltauswirkungen der Fracking-Technologien insgesamt als sehr gering eingeschätzt.[24]

Die Erzeugung von **grünem Wasserstoff** erfolgt durch die Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mittels der Elektrolyse und Strom aus erneuerbaren Energien. Das Verfahren wird auch als Power-to-Gas bezeichnet.[25] Der Aus-

gangsstoff ist hier Wasser. Da Wasser und nicht Erdgas als Ausgangsstoff verwendet wird, entsteht kein Kohlendioxid als Abfallprodukt und das Problem des Methanlecks bei der Erdgasgewinnung entfällt. Als weitere Optionen zur Herstellung von grünem Wasserstoff sieht Gochermann die Vergasung und Vergärung von Biomasse sowie die Reformierung von Biogas.[24] Diese Prozesse sind CO₂-neutral. Der erzeugte Wasserstoff kann daher auch als grüner Wasserstoff bezeichnet werden. Die Nutzung von Strom aus Biomasse wird laut Umweltbundesamt nicht als effizient angesehen, da Biomasse selbst bereits als Energiespeicher fungiert und ein vielseitig einsetzbarer Rohstoff ist.[25] Grüner Wasserstoff ist also klimaneutral, solange der Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt wurde.

Roter/rosa/pinkfarbener Wasserstoff wird, wie beim grünen Wasserstoff, durch die Elektrolyse von Wasser erzeugt. Mit dem Unterschied, dass der benötigte Strom aus Kernkraftwerken stammt.[24] Bei der Betrachtung des Lebenszyklus der Stromerzeugung vom Uranabbau über die Brennelementherstellung, den Bau und Rückbau der Kraftwerke bis zur Endlagerung wird deutlich, dass die einzelnen Schritte des Zyklus zum Teil mit hohem Energieaufwand und Treibhausgasemissionen verbunden sind. Der Strom aus Kernkraftwerken kann nicht als CO₂-neutral bezeichnet werden. Somit ist auch roter/rosa/pinkfarbener Wasserstoff kein emissionsfreier Energieträger.[26]

Für den **Transport** des komprimierten Wasserstoffs zum Verbraucher gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine Alternative ist der Transport von Wasserstoff über ein Gasnetz mit Drücken von 20 bis 100 bar, wie sie heute für Erdgas üblich sind.[10] Dies wäre wirtschaftlich sinnvoll, wenn die Erzeugung und der Verbrauch des Gases weit voneinander entfernt sind. Die technische Funktionsfähigkeit derartiger Gasnetze ist durch bereits existierende H₂-Netze bewiesen.[10] So gibt es bereits ein Netz im Ruhrgebiet, das von AirLiquide betrieben wird, und ein Netz in Ostdeutschland, das von der Linde AG betrieben wird. Die Transportmöglichkeit wird auch von den Gasnetzbetreibern in Deutschland gesehen, die weitgehend auf vorhandene Gasleitungen zurückgreifen und diese umwidmen wollen. Eine

weitere Möglichkeit, Wasserstoff über kurze Distanzen zu transportieren, sind Druckgastrailer, die den Wasserstoff in Druckbehältern bei 200 bis 300 bar speichern und transportieren.[10] Für mittlere Entfernungen wird eine weitere Steigerung der transportierbaren Wasserstoffmenge gegenüber dem Druckgastransport angestrebt. Dabei wird Wasserstoff für den Transport verflüssigt, indem er auf unter minus 253 Grad abgekühlt wird. Der flüssige Wasserstoff wird dann in Kryo Tanks (vakuumisolierte Behälter) mit dem Lkw transportiert. Flüssiger Wasserstoff hat eine höhere volumetrische Energiedichte als gasförmiger Wasserstoff.[27] Somit kann mehr Wasserstoff transportiert werden. Es bleibt jedoch eine große Herausforderung, die Verfügbarkeit von flüssigem Wasserstoff zu gewährleisten, da es derzeit in Europa nur drei Wasserstoffverflüssigungsanlagen gibt. [27] Eine weitere Option, die sich derzeit in der Entwicklung befindet, ist der Transport über die Zwischenstufe Ammoniak (NH₃).[10] Dabei wird der zunächst elektrolytisch erzeugte Wasserstoff mit dem Stickstoff aus der Luft nach dem Haber-Bosch-Verfahren zu Ammoniak umgesetzt. Das entstehende Ammoniakgas lässt sich leichter und kostengünstiger lagern und transportieren. Die Verflüssigung erfolgt bei minus 33 Grad statt bei minus 253 Grad für Wasserstoff und die Energiedichte, bezogen auf das Volumen, ist höher als bei flüssigem Wasserstoff, sodass weniger Volumen für den Transport benötigt wird. Zur Rückgewinnung des Wasserstoffs aus dem Ammoniak für den Verbraucher ist eine Spaltung des Ammoniaks in Wasserstoff und Stickstoff am Verwendungsort erforderlich. Die Technologie hierfür ist prinzipiell ausgereift. Die Technologie zur kostengünstigen Wasserstoffgewinnung, auch in der für den Einsatz in Brennstoffzellen notwendigen Reinheit, befindet sich jedoch noch in der Entwicklung. Zudem ist noch zu untersuchen, ab welcher Transportentfernung der Umweg über Ammoniak wirtschaftlich sinnvoll ist.[10] Die Erzeugung von Wasserstoff vor Ort ist eine weitere Möglichkeit, die bereits heute in der Praxis umgesetzt wird.[10] Dabei entfällt der Transport von der Erzeugung zum Verbraucher.

Nach aktuellem Stand gibt es in Deutschland bereits ca. 100 **Wasserstofftankstellen**. [27] Dabei ist die

Betankung mit gasförmigem Wasserstoff bei 350 oder 700 bar bereits möglich. Zurzeit sind kleinere Stationen mit einem maximalen Wasserstoffdurchsatz von 200 kg pro Tag und mittlere Stationen mit einem maximalen Wasserstoffdurchsatz von 500 kg pro Tag vorhanden, die für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge mit gasförmigem Wasserstoff bei 700 bar, Busse mit gasförmigem Wasserstoff bei 350 bar geeignet sind. In einigen Tankstellen ist auch die Betankung von mittelschweren Nutzfahrzeugen möglich.[27] Der Wasserstoff wird entweder in gasförmiger Form gespeichert und gekühlt getankt oder in flüssiger Form gespeichert und vor dem Betanken des Fahrzeugs erwärmt. Die Bereitstellung und Speicherung von Wasserstoff ist derzeit überwiegend in gasförmiger Form möglich.[27] Laut H2-Mobility wird der Schwerlastverkehr im Jahr 2030 voraussichtlich 80 % des nationalen Wasserstoffbedarfs decken.[27] Dies ist auf die hohen Fahrleistungen und dem damit verbundenen hohen Wasserstoffverbrauch im Transportbereich zurückzuführen. Die Gesamtnachfrage nach Wasserstoff in Deutschland wird auf Basis des prognostizierten Fahrzeugbestandes bis 2030 auf ca. 300.000 Tonnen pro Jahr geschätzt. Wesentliche Wachstumstreiber für die Wasserstoffnachfrage im Mobilitätssektor sind die Verschärfung der Emissionsstandards in der EU für alle Fahrzeugbereiche sowie die allgemein steigende Marktnachfrage nach emissionsfreien Antrieben.[27]

Bei der Betankung mit Wasserstoff werden verschiedene Betankungstechniken eingesetzt, je nachdem, ob der Wasserstoff flüssig oder gasförmig im Fahrzeug gespeichert wird. Wird Wasserstoff in gasförmiger Form im Fahrzeug gespeichert, wird zwischen komprimierten gasförmigen Wasserstoff bei 350 und 700 bar unterschieden. Ein Großteil der Busse und der leichten, mittleren und schweren Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb speichern den Wasserstoff bei einem Druck von 350 bar in Hochdrucktanks. Eine 350-bar-CGH2-Wasserstofftankstelle und 700-bar-CGH2-Wasserstofftankstelle kann sowohl mit gasförmigem als auch mit flüssigem Wasserstoff versorgt werden. Abhängig von der gewählten Transportmöglichkeit wird ein Kompressor oder eine kryogene Pumpe zur Fahrzeugbetankung benötigt. Laut Society of Automotive Engineers (SAE) sind derzeit an einer

350-bar-CGH2-Wasserstofftankstelle Durchflussmengen von bis zu 120 g/s realisierbar.[27] Derzeit speichern Personenkraftwagen gasförmigen Wasserstoff bei 700 bar in Hochdrucktanks mit einer Speicherkapazität von 4 bis 6,5 kg. Abfallsammel-fahrzeuge werden ab 2021 ebenfalls mit einem 700 bar Hochdrucktank ausgestattet und haben eine Speicherkapazität von 16 kg.[27] Im Fahrzeug befinden sich jeweils zwei Tanks mit einer Speicherkapazität von je 8 kg. Wasserstofftankstellen und Fahrzeugtanks für mittlere und schwere Nutzfahrzeuge befinden sich noch in der Validierungsphase.[27] Darüber hinaus besitzt die 700 bar CGH2 Technologie eine höhere volumetrische Energiedichte (1,3 kWh/l) als die 350 bar CGH2 Technologie und bietet somit einen Vorteil hinsichtlich der Fahrzeugtankgröße.[27] Eine weitere Möglichkeit zur Betankung eines Nutzfahrzeugs mit flüssigem Wasserstoff bietet sich die sLH2-Technologie (Subcooled Liquid Hydrogen). Flüssiger Wasserstoff hat eine deutlich höhere volumetrische Energiedichte als gasförmiger Wasserstoff, so dass mehr Wasserstoff im Fahrzeug gespeichert werden kann. Dadurch wird eine wesentlich höhere Reichweite erreicht. Die Wasserstoffversorgung einer sLH2-Tankstelle erfolgt mit flüssigem Wasserstoff, wobei ein Wechseltrailer-Konzept möglich ist. Außerdem ist für jede Zapfstelle eine eigene sLH2-Pumpe erforderlich.[27] Die sLH2-Technologie befindet sich derzeit in einem frühen Entwicklungsstadium.[27]

Für die **wirtschaftliche Bewertung** des Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugs wurden die folgenden drei Studien berücksichtigt:

1. Werkstattbericht: „Antriebswechsel Nutzfahrzeuge“
2. Studie: „Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030“
3. Studie: „Fuel Cells Hydrogen Trucks“

Die Studien vergleichen die wirtschaftlichen Potenziale der Lkw-Antriebstechnologien. Dies erfolgt auf Basis einer Total Cost of Ownership (TCO) - Analyse. Eine TCO-Analyse gibt Aufschluss über die Kosten eines Nutzfahrzeugs während seiner ge-

samen Lebensdauer.[28] Dabei sind Investitionskosten (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) Kostenbestandteile der TCO-Analyse. Die Investitionskosten umfassen die Anschaffungs-, die Infrastruktur- und die Versicherungskosten. Zu den Betriebskosten zählen Kraftstoff- und Energiekosten, Wartungs- und Reparaturkosten, Kfz-Steuer sowie Mautgebühren.[28]

Im Werkstattbericht „Antriebswechsel Nutzfahrzeuge“ wird eine TCO-Analyse für schwere Nutzfahrzeuge für das Bezugsjahr 2030 durchgeführt.[29] Als alternative Antriebstechnologien werden batterieelektrische Nutzfahrzeuge und mit wasserstoffbetriebene Nutzfahrzeuge betrachtet. Für die TCO-Berechnungen wurden folgende Komponenten (in Euro pro Jahr) berücksichtigt:

- Annuität Anschaffungspreis (Fahrzeugpreis mit Zuschuss und mit Sonder-Abschreibung)
- Versicherungskosten
- Kfz-Steuer
- Energiekosten (inklusive EEG-Umlage)
- Energie- und Stromsteuer
- Wartungs- und Reparaturkosten
- Kosten für Ausfalltage
- Mautkosten
- AdBlue (für Diesel)[29]

Im ersten Schritt wird eine TCO-Betrachtung ohne staatliche Steuerungsinstrumente für eine Sattelzugmaschine mit der Größenklasse 40 Tonnen für das Jahr 2030 durchgeführt, um eine reine Technologiekostenbetrachtung vornehmen zu können. Ohne staatliche Steuerungsinstrumente bedeutet, dass Zuschüsse und Abgaben wie Energiesteuer, Stromsteuer, EEG-Umlage in den Energiekosten, Kfz-Steuer und Mautkosten nicht in die TCO-Berechnung berücksichtigt wurde.[29] Dabei wird für das BEV (Battery Electric Vehicle) eine Anschaffung der Ladeinfrastruktur (private 50 kW-Ladestation für 38.300 €) berücksichtigt, um die Auswirkung auf die Kostenrelationen aufzuzeigen. In den folgenden TCO-Analysen werden die Ladeinfra-

strukturkosten für alle alternativen Antriebstechnologien vernachlässigt. Für die Energiekosten wurden folgende Preise verwendet:

Energiekosten	Diesel	Strompreis	Wasserstoffpreis
	61,73 ct/l	5,94 ct/kWh	5,85 €/kg

Tabella 1: Energiekosten 1

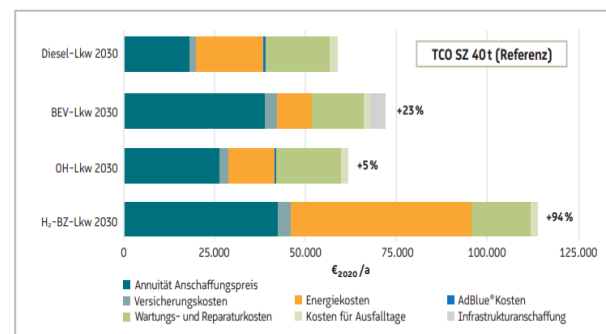


Abbildung 1: TCO ohne staatliche Steuerungsinstrumente (Referenz)

Die TCO ohne staatliche Steuerungsinstrumente zeigen, dass weder batterieelektrische noch wasserstoffbetriebene Nutzfahrzeuge mit dem Diesel-Lkw konkurrieren können. Die TCO der batterieelektrischen Nutzfahrzeuge liegen um 23 % und die des wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeugs um 94 % über denen des Diesel-Lkw. Der Grund für diese hohen TCO des H2-BZ-Nutzfahrzeugs sind auf die hohen Anschaffungskosten und Energiekosten zurückzuführen. Zusätzlich wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wird angenommen, dass die Fahrzeugpreise bis 2030 stärker sinken als im Referenzfall.

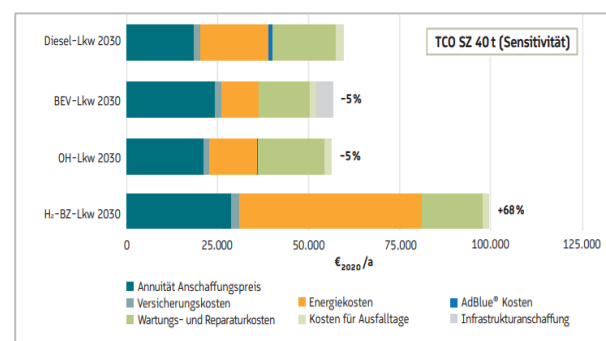


Abbildung 2: TCO ohne staatliche Steuerungsinstrumente (Sensitivität)

Trotz dieser Annahme liegen die TCO des batterieelektrischen Nutzfahrzeugs nur 5 % unter denen des Diesel-Lkw. Mit einem TCO von 68 % über den des Diesel-Lkw weist das H2-BZ-Nutzfahrzeug weiterhin deutlich höhere TCO als der Diesel-Lkw auf, das wiederum auf die hohen Energiekosten zurückzuführen sind.

Im nächsten Schritt wird eine TCO-Analyse mit staatlichen Steuerungsinstrumenten für das Jahr 2030 durchgeführt.[29] Zu den staatlichen Steuerungsinstrumenten zählen Zuschüsse auf Investitionszulage und die Sonderabschreibung für Abnutzung, die Energie- und Stromsteuer, die EEG-Umlage in den Energiekosten, die Kfz-Steuer und die Mautkosten. Für die TCO-Berechnung wurden folgende Komponenten berücksichtigt:

- Anschaffungspreise mit 80 % Förderung der Investitionsmehrkosten und Sonder-Afa (50 %) für BEV und H2-BZ-Lkw
- Energiekosten (mit EEG-Umlage)
- Energiesteuer und Stromsteuer (ohne Mehrwertsteuer (MwSt.))
- Kfz-Steuer (Kfz-Steuerbefreiung für ZE-Nfz)
- Mautkosten mit CO₂-gespreizter Maut
 - CO₂-Preis: 100 €/t CO₂
 - Infrastrukturkomponente der Maut: derzeit je nach Gewichtsklasse 11,5 bzw. 17,4 ct/km; Abschlag der Infrastrukturkomponente für ZE-Nfz: 75 %,
 - Zuschlag für Luftverschmutzung: 1,1 ct/km (Diesel Euro VI),
 - Zuschlag für Lärmbelästigung: 0,2 ct/km (alle Antriebe)[29]

Für die realen Energiekosten (Referenzpreis mit EEG-Umlage, Energiesteuer und Stromsteuer separat ausgewiesen) wurden folgende Preise verwendet:

Energiekosten	Diesel	Strompreis	Wasserstoffpreis
	61,73 ct/l	12,01 ct/kWh	8,71 €/kg

Tabelle 2: Energiekosten 2

Bei der realen Energiesteuer und Stromsteuer (ohne MwSt.) wurde zwischen der Energiesteuer von 40,53 Cent/l und der Stromsteuer von 1,32 Cent/kWh unterschieden. Für den Endverbraucherpreis von H2 wurde keine zusätzliche Energiebesteuerung vorgenommen (bei der Herstellung ist die Stromsteuer enthalten).[29]

Hier wurden die TCO für Nutzfahrzeuge der Fahrzeuggrößenklasse >12t bis <20t, Nutzfahrzeuge der Fahrzeuggrößenklasse >20t bis <Sattelzug, Sattelzug der Fahrzeuggrößenklasse 40 t ermittelt.

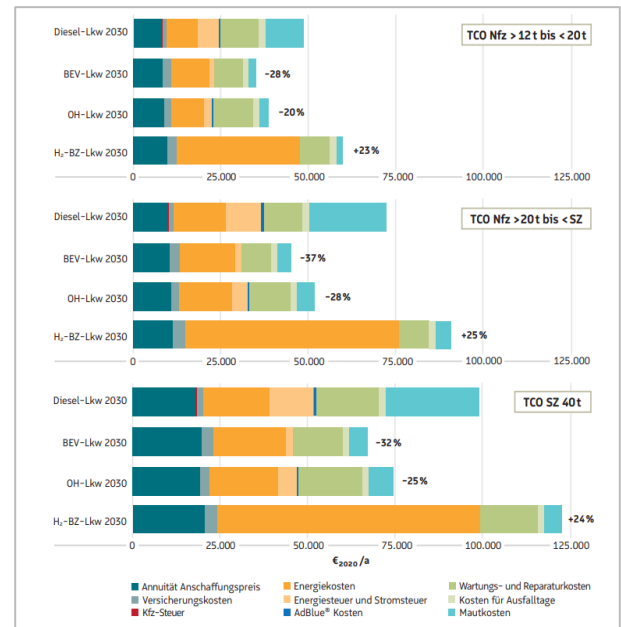


Abbildung 3: Referenzszenario mit staatlichen Steuerungsinstrumenten

In der Fahrzeuggrößenklasse >12t bis <20t liegen die TCO des BEV-Lkw um 28 % unter denen des Diesel-Lkw. Der H2-BZ-Lkw hat dagegen eine um 23 % höhere TCO als der Diesel-Lkw. Auch in der Fahrzeuggrößenklasse >20t bis <Sattelzug hat der BEV-Lkw eine deutlich geringere TCO als der Diesel-Lkw. Der H2-BZ-Lkw hat dagegen wieder eine höhere TCO als der Diesel-Lkw. Auch in der letzten betrachteten Fahrzeuggrößenklasse weist der BEV-Lkw eine geringere und der H2-BZ-Lkw eine höhere TCO als der Diesel-Lkw auf. Die hohen TCO des H2-BZ-Lkw sind auf die deutlich hohen Energiekosten zurückzuführen.

Zusammenfassend zeigt die TCO-Analyse, dass BEV-Lkw im Bezugsjahr 2030 deutlich geringere TCO-Ergebnisse aufweisen als Diesel-Lkw. Insbesondere staatliche Steuerungsinstrumente haben einen entscheidenden Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit alternativer Antriebstechnologien. Darüber hinaus hängt die Höhe der TCO des H2-BZ-Lkw stark von der Höhe der Energiekosten ab. Bei deutlichen niedrigeren Energiekosten wäre die TCO der H2-BZ-Lkw mit der des BEV-Lkw vergleichbar.

Die Studie „Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030“ vergleicht die wirtschaftlichen Potentiale verschiedener Lkw-Antriebstechnologien für das Jahr 2030. Mit Hilfe der TCO-Analyse wird ermittelt, welche der betrachteten Antriebstechnologien im Vergleich zum Dieselantrieb im Jahr 2030 die geringsten Kosten verursacht. Damit kann festgestellt werden, für welche Anwendungsfälle sich welche Antriebstechnologie eine Alternative für den Lkw-Betreiber darstellt. Als alternative Antriebstechnologien wurden der batterieelektrische Antrieb und der Brennstoffzellenantrieb (und Oberleitung-Lkw) betrachtet.

FCEV	3,5-7,5 t	7,5-12 t	12-18 t
Fahrzeugpreis 2030	49.800 €	71.200 €	89.100 €
Mautsätze	0	8,2 ct/km	11,7 ct/km
Sonstige Fixkosten in €/a	12.860	14.880	15.640
Sonstige variable Kosten in ct/km	42,9	44,3	43,3

FCEV	18-26 t	>26 t
Fahrzeugpreis 2030	118.700 €	144.800 €
Mautsätze	16,2 ct/km	17,6 ct/km
Sonstige Fixkosten in €/a	16.330	18.320

Sonstige variable Kosten in ct/km	43,0	39,0
-----------------------------------	------	------

Tabelle 3: Kostenannahmen FCEV

BEV	3,5-7,5 t	7,5-12 t	12-18 t
Fahrzeugpreis 2030 BEV 100*	31.400 € (+ 7.900 €)	44.700 € (+ 8.400 €)	59.300 € (+ 9.500 €)
Mautsätze	0	8,2 ct/km	11,7 ct/km
Sonstige Fixkosten in €/a	12.860	14.880	15.640
Sonstige variable Kosten in ct/km	42,9	44,3	43,3

BEV	18-26 t	>26 t
Fahrzeugpreis 2030 BEV 100*	77.000 € (+ 10.800 €)	90.200 € (+ 13.000 €)
Mautsätze	16,2 ct/km	17,6 ct/km
Sonstige Fixkosten in €/a	16.330	18.320
Sonstige variable Kosten in ct/km	43,0	39,0

Tabelle 4: Kostenannahmen BEV

*Preise für Fahrzeuge mit 100 km Reichweite, in Klammern der angenommene zusätzliche Kaufpreis je weitere 100 km Reichweite

Bei der Ermittlung der Fahrzeugpreise für das Jahr 2030 wurden keine Förderinstrumente für alternative Antriebe berücksichtigt, daher keine Kaufprämie und keine Sonderabschreibung.[30] Die Mautsätze wurden auf Basis der heute geltenden Mauttabelle unverändert fortgeschrieben. Dabei entfällt der Luftverschmutzungszuschlag für emissionsfreie Antriebe.[30] Der Grund für diese Annahme liegt darin, dass das Bezugsjahr 2030 als Massenmarkt angenommen wird und die derzeitige Mautermäßigung bzw. Mautbefreiung für alternative Antriebe als unwahrscheinlich angesehen wird.

Zu den sonstigen Fixkosten zählen Kfz-Steuer, Haupt- und Abgasuntersuchung; Sicherheitsprüfung; Kfz- und Kaskoversicherung; Wartung; Instandhaltung und Pflege (Fixkostenanteil); Fuhrparkverwaltung; Unterstellung, Garage; Auflieger und Anhänger (Fixkostenanteil).[30] Zu den sonstigen variablen Kosten zählen Schmierstoffe; Stromabnehmer (Schleifleiste); Wartung, Instandhaltung und Pflege (variable Kostenanteil); Harnstoff; Auflieger und Anhänger (variable Kostenanteil); Fahrer.[30]

Dieselpreis	Strompreis (Mittelspannung)	H ₂ -Preis (Elektrolyse DE)	H ₂ -Preis (Import)
1,36 €/Liter	16,6 ct/kWh	9,45 €/kg	4,57 €/kg

Tabelle 5: Angenommene Energiepreise (ohne USt) für das Referenzjahr 2030

Die Energiepreise setzen sich aus den Gestehungskosten, den Transportkosten sowie den Abgaben und Umlagen zusammen. Die Kosten für den Aufbau öffentlicher Infrastruktur zur Energieversorgung sind nicht Bestandteil der Energiepreise.

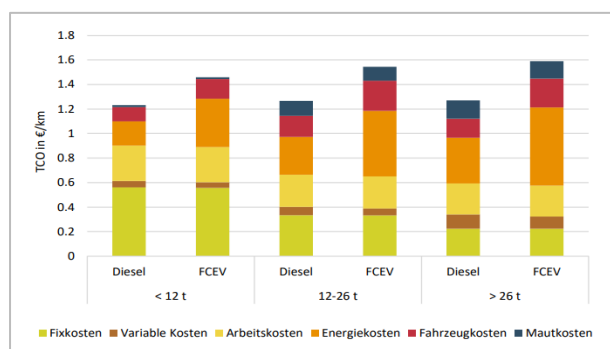


Abbildung 4: Vergleich der TCO von Brennstoffzellen-Lkw und Diesel-Lkw

Beim Vergleich der TCO von Brennstoffzellen-Lkw gegenüber Diesel-Lkw in den betrachteten Größenklassen für das Bezugsjahr 2030 werden zwei Fälle für den Wasserstoffpreis betrachtet. [30] Zum einen wird der Wasserstoffpreis (9,45 €/kg) durch die Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse in Deutschland angenommen. Zum anderen wird der Wasserstoffpreis (4,57 €/kg) durch den Import von Wasserstoff berücksichtigt. Die TCO-Ergebnisse für den ersten Fall zeigen, dass die TCO in der

Größenklasse <12 Tonnen um 18,4 % höher liegen als beim Dieselantrieb. In der Größenklasse 12-16 Tonnen liegen die TCO des Brennstoffzellenantriebs um 22 % über denen des Dieselantriebs und in der Größenklasse >26 Tonnen ist der Wert um 25,1 % über denen des Diesel-Lkw. Damit liegen die TCO des Brennstoffzellen-Lkw in allen betrachteten Größenklassen über denen des Diesel-Lkw.[30]

Unter der Annahme eines Wasserstoffpreises von 4,57 €/kg durch Wasserstoffimport ergibt sich ein verändertes Bild des wirtschaftlichen Potenzials im Vergleich zum Dieselantrieb. In der Größenklasse ab 12 t erreicht der Brennstoffzellenantrieb weitgehend Kostenparität. In den Größenklassen 12-26 t und >26 t wird sogar ein Kostenvorteil erreicht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich bei derart niedrigen Wasserstoffpreisen ein Energiekostenvorteil gegenüber dem Dieselantrieb einstellt. Der Energiekostenvorteil wird mit zunehmender Fahrleistung besonders deutlich.[30]

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei hohen Wasserstoffpreisen der Brennstoffzellenantrieb gegenüber dem Dieselantrieb nicht konkurrenzfähig ist. Bei deutlich niedrigeren Wasserstoffpreisen hingegen erreicht der Brennstoffzellenantrieb insbesondere bei hohen Fahrleistungen einen Kostenvorteil gegenüber dem Dieselantrieb. Somit ist der Brennstoffzellen-Lkw bei niedrigen Wasserstoffpreisen und hohen Fahrleistungen gegenüber dem Diesel-Lkw wirtschaftlich wettbewerbsfähig.[30]

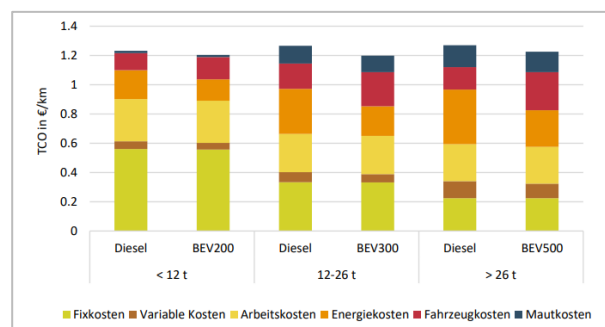


Abbildung 5: Vergleich der TCO von rein batterieelektrischen Lkw und Diesel-Lkw

Die TCO des BEV-Lkw in der Größenklasse <12 Tonnen liegen um 2,3 % unter denen des Diesel-Lkw. In der Größenklasse 12-16 Tonnen liegen die TCO um 5,3 % unter denen des Dieselantriebs und in der Größenklasse >26 Tonnen ist der Wert um 3,5

% unter denen des Dieselantriebs.[30] Damit liegen die TCO des BEV-Lkw in allen betrachteten Größenklassen unter denen des Diesel-Lkw.

Batterie-Lkw haben hohe Betriebskostenvorteile. Diese resultieren aus der effizienten Energieumwandlung. Höhere Reichweiten erfordern höhere Batteriekapazitäten. Dies ist wiederum mit hohen Kosten verbunden. Damit eignet sich der Batterie-Lkw für den Kurzsegmentbereich.[30]

In der Studie „Fuel Cells Hydrogen Trucks“ wird das Marktpotenzial für wasserstoffbetriebene Nutzfahrzeuge im Europa auf Basis einer Total Cost of Ownership (TCO) Analyse untersucht.[28]

Die Marktpotenzialanalyse wurde anhand von drei Anwendungsfällen durchgeführt.[28]

Im ersten Anwendungsfall wird eine Sattelzugmaschine mit einem Anhänger mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 Tonnen betrachtet, die das Langstreckensegment mit einer jährlichen Fahrleistung von 110.000 bis 160.000 km darstellt.

Im zweiten Anwendungsfall wird eine Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 27 Tonnen betrachtet, die den Mittelstreckenbereich mit einer jährlichen Fahrleistung von 50.000 bis 150.000 km repräsentiert.

Im dritten Anwendungsfall wird ein Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 18 Tonnen betrachtet, die den Kurzstreckenbereich mit einer jährlichen Fahrleistung von 40.000 bis 85.000 km darstellt.

In jedem betrachteten Anwendungsfall wird der Diesel-Verbrennungsmotor als Referenztechnologie mit einem batterieelektrischen Nutzfahrzeug und einem wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeug verglichen. Da es unterschiedliche Möglichkeiten der Wasserstoffspeicherung im Fahrzeug gibt, wird das wasserstoffbetriebene Nutzfahrzeug in drei Kategorien unterteilt. Betrachtet werden Nutzfahrzeuge mit gasförmigem Wasserstoff bei 350 bar und 700 bar. Außerdem Nutzfahrzeuge mit einem sLH2-Speichertechnologie.

Für die TCO-Analyse wurden folgende Annahmen getroffen:

- Lkw- und technologiespezifische Angaben wie Fahrzeugkonfiguration und Nutzlast, Kosten zu den einzelnen Fahrzeugkomponenten,

- Energie- und Infrastrukturkosten,
- Betriebs- und Wartungskosten,
- Kfz-Steuer
- Versicherungskosten
- Mautgebühren[28]

Darüber hinaus wird angenommen, dass die betrachteten Nutzfahrzeuge eine Lebensdauer von insgesamt 10 Jahren haben. Dabei werden die 10 Jahre in das erste und zweite Nutzungsjahr aufgeteilt. Das erste Nutzungsjahr umfasst 5 Jahre und das zweite Nutzungsjahr um 10 Jahre in Kombination mit dem ersten Nutzungsjahr. Um die Vergleichbarkeit zwischen dem konventionellen Diesel-Nutzfahrzeug und den alternativen Antriebstechnologien zu gewährleisten, wird angenommen, dass die alternativen Antriebstechnologien die gleiche Tagesleistung erbringen wie ein konventionelles Diesel-Nutzfahrzeug. Schließlich wird für die Kostenentwicklung der alternativen Antriebstechnologien nicht von den heutigen Prototypenkosten ausgegangen, sondern von einer Nischentechnologie im Jahr 2023 bis hin zu einem Massenmarktszenario im Jahr 2030.[28]

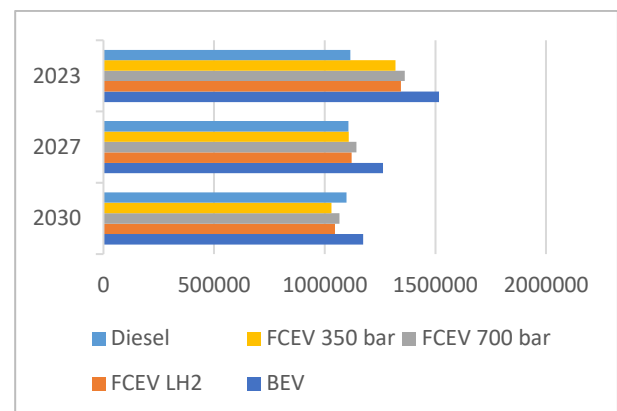


Abbildung 6: TCO-Bewertung für Anwendungsfall I

Im ersten Anwendungsfall, dem Fernverkehr, wird erwartet, dass wasserstoffbetriebene Nutzfahrzeuge im Jahr 2030 sowohl gegenüber dieselbetriebenen als auch gegenüber batterieelektrischen Nutzfahrzeugen geringere TCO-Werte aufweisen. Im Jahr 2023 ist jedoch noch mit einem Kostenaufschlag von 18 bis 22 % zu rechnen. Dagegen ist im Jahr 2027 bereits eine Annäherung der TCO-Werte des wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeugs an die des Diesel-Nutzfahrzeugs zu beobachten.[28]

Batterieelektrische Nutzfahrzeuge weisen dagegen einen höheren Kostenaufschlag von 36% gegenüber Diesel-Nutzfahrzeugen auf. Dies wird vor allem durch die Batteriekosten begründet. Darüber hinaus beschränken Größe und Gewicht der Batterie die maximale Nutzlast schwerer Nutzfahrzeuge. Je größer und schwerer die Batterie ist, desto geringer ist die maximale Nutzlast eines batterieelektrischen Nutzfahrzeugs. Aus diesem Grund wird der Einsatz von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen im Fernverkehr als gering eingeschätzt. Außerdem wird auf Basis der TCO-Berechnungen deutlich, dass batterieelektrische Nutzfahrzeuge bei einer Größenklasse von 40 Tonnen bis zum Jahr 2030 keine Kostenwettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu dieselbetriebenen Nutzfahrzeugen erreichen werden.[28]

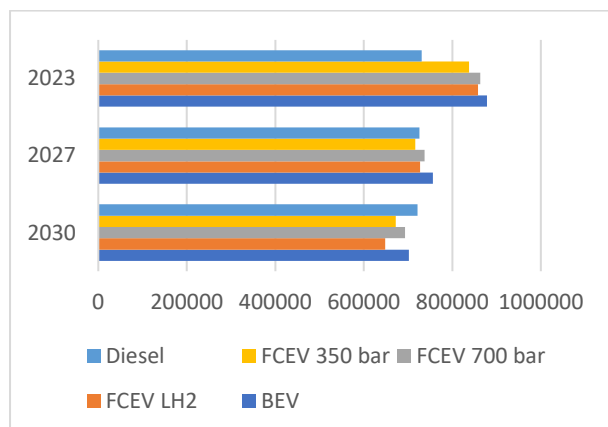


Abbildung 7: TCO-Bewertung für Anwendungsfall 2

Im zweiten Anwendungsfall, der den Mittelstreckenbereich repräsentiert, wird erwartet, dass das wasserstoffbetriebene Nutzfahrzeug bei einer Jahresfahrleistung von 95.000 km bereits im Jahr 2027 konkurrenzfähige TCO gegenüber dem Diesel-Nutzfahrzeug aufweist. Im Jahr 2023 ist allerdings noch mit Mehrkosten von bis zu 18 % zu rechnen. Im Jahr 2030 liegen die TCO des wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeugs schließlich deutlich unter denen des dieselbetriebenen und des batterieelektrischen Nutzfahrzeugs.[28]

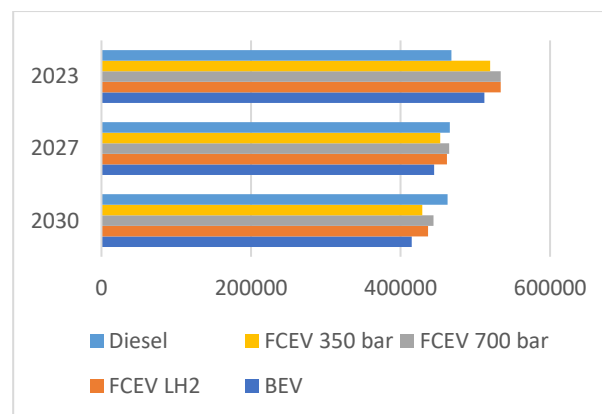


Abbildung 8: TCO-Bewertung für Anwendungsfall 3

Die TCO-Ergebnisse im dritten Anwendungsfall, der Regionalverkehr, zeigen, dass die FCEV-Technologie im Jahr 2023 einen Kostenaufschlag von 11 % gegenüber dem Diesel-Nutzfahrzeug aufweist. Darüber hinaus ist ab dem Jahr 2027 ein Kostenreduktionspotenzial der FCEV-Technologie gegenüber dem Diesel-Nutzfahrzeug zu beobachten.

Im Vergleich zu wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeugen weisen batterieelektrische Nutzfahrzeuge im regionalen Verteilerverkehr geringere TCO auf. Dies ist auf die geringere jährliche Fahrleistung von 60.000 km zurückzuführen. Auch im Vergleich zu Diesel-Nutzfahrzeugen weist die BEV-Technologie in den Jahren 2027 und 2030 geringere TCO-Ergebnisse auf. Somit ist der Einsatz von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen aufgrund der geringen Gesamtreichweite für den Regionalverkehr geeignet.[28]

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in allen drei Anwendungsfällen ein deutliches Kostenreduktionspotenzial der FCEV-Technologie ab 2027 erkennbar ist. Insbesondere zeigen die Ergebnisse, dass die FCEV-Technologie bei hohen Tages- und Jahresfahrleistungen einen deutlichen Vorteil gegenüber der BEV-Technologie aufweist. Batterieelektrische Nutzfahrzeuge sind hingegen deutlich im Vorteil, wenn keine Gesamtreichweitenflexibilität und hohe Nutzlasten gefordert sind. Denn höhere Reichweiten erfordern den Einsatz einer größeren Batterie und begrenzen damit die maximale Nutzlast eines schweren Nutzfahrzeugs. Es wird daher erwartet, dass die BEV-Technologie ihren Einsatz im Regionalverkehr mit begrenzter Reichweite finden wird und die FCEV-Technologie im mittleren bis schweren Strecken-

bereich. Um das prognostizierte Kostensenkungsszenario zu erreichen, ist es notwendig, die Fahrzeugnachfrage zu stimulieren und eine Massenproduktion zu gewährleisten sowie das Wasserstofftankstellennetz auszubauen.[28]

Die Studien „Antriebswechsel Nutzfahrzeuge“ und „Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030“ betrachten die Gesamtbetriebskosten eines Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugs in Deutschland für das Bezugsjahr 2030.[29,30] Die Studie „Fuel Cells Hydrogen Trucks“ führt hingegen eine TCO-Analyse für Europa für die Jahre 2023, 2027 und 2030 durch.[28] Die Studienergebnisse von „Antriebswechsel Nutzfahrzeuge“ zeigen, dass Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge sowohl mit als auch ohne Förderinstrumente keine Wettbewerbsfähigkeit gegenüber den Diesel-Nutzfahrzeugen erreichen. Grund hierfür ist die Annahme eines hohen Wasserstoffpreises. Im Gegensatz dazu zeigen die Studienergebnisse von „Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030“ und „Fuel Cells Hydrogen Trucks“ eine Kostenparität des Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugs gegenüber dem Diesel-Nutzfahrzeug. Während in der Studie „Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030“ die Kostenparität des Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugs gegenüber dem Diesel-Nutzfahrzeug im Jahr 2030 erreicht wird, wird diese in der Studie „Fuel Cells Hydrogen Trucks“ bereits im Jahr 2027 erreicht. Die entscheidenden Kostenkomponenten für das Erreichen einer wettbewerbsfähigen TCO des Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugs sind dabei die Energiekosten und die Anschaffungskosten. Im Ergebnis zeigen die Studien „Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030“ und „Fuel Cells Hydrogen Trucks“ dass Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge mit einer hoher Nutzlast und damit hohen Tages- und Jahresfahrleistungen gegenüber batterieelektrischen Nutzfahrzeugen einen deutlichen Vorteil haben. Es wird daher erwartet, dass Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge im Schwerlast- und Langstreckensegment gegenüber den Diesel-Nutzfahrzeugen als auch gegenüber batterieelektrischen Nutzfahrzeugen wirtschaftlich sein

werden. Batterieelektrische Nutzfahrzeuge haben deutlich positive Gesamtbetriebskosten bei geringerer Nutzlast und geringerer Tages- und Jahresfahrleistung. Der Einsatz von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen ist daher vor allem im Regionalverkehr mit geringen Reichweiten zu erwarten.

IV. Erläuterung des Problems

Eine der Herausforderungen ist der Wirkungsgrad von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen. Der Wirkungsgrad gibt an, welcher Anteil der zugeführten Energie in Nutzenergie umgesetzt wird.[31] Eine Brennstoffzelle allein hat einen Wirkungsgrad von 83 %.[31] Wird jedoch die gesamte Prozesskette betrachtet, von der Wasserstoffherzeugung bis hin zur Umwandlung in elektrische Energie, so liegt der Wirkungsgrad bei ca. 30%. Das bedeutet, dass 70% der Energie für die Erzeugung, den Transport und die Speicherung des Wasserstoffs verbraucht werden. Der Wirkungsgrad eines rein batterieelektrischen Nutzfahrzeugs liegt bei 64%, der eines Nutzfahrzeugs mit einem Dieselantrieb bei 45%.[31] Damit weist das Brennstoffzellen-Nutzfahrzeug einen deutlich geringeren Wirkungsgrad auf als das rein batterieelektrische Nutzfahrzeug und das Diesel-Nutzfahrzeug.

Trotz des hohen Wirkungsgrades der rein batterieelektrischer Nutzfahrzeuge haben rein batterieelektrische Nutzfahrzeuge eine geringe Reichweite, hohe Anschaffungskosten und lange Ladezeiten. Neben der geringen Reichweite führt beispielweise die Verwendung von Klimaanlage oder Fahrzeugheizungen zu weiteren Reichweitenverlusten. Außerdem sind die hohen Anschaffungskosten auf die hohen Preise des Lithium-Ionen-Akkumulators zurückzuführen. Darüber hinaus haben rein batterieelektrische Nutzfahrzeuge eine lange Ladezeit. Das Aufladen bei herkömmlichen Steckdosen kann mehrere Stunden in Anspruch nehmen.[10]

Im Vergleich zu rein batterieelektrischen Nutzfahrzeugen haben Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge eine größere Reichweite und kürzere Betankungszeiten. Problematisch ist jedoch, dass die Verfügbarkeit von Wasserstoff-Nutzfahrzeugen derzeit sehr gering ist. Beispielsweise ist in Deutschland der Hyundai *XCIENT Fuel Cell* mit einer Reichweite

von 400 km verfügbar.[13] Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge mit größeren Reichweiten befinden sich noch in der Entwicklung. Um einen Hochlauf von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen zu gewährleisten, müssen Herausforderungen wie hohe Energie- und Anschaffungskosten bewältigt werden.

Darüber hinaus ist die Wasserstofftankstelleninfrastruktur mit nur ca. 100 Wasserstofftankstellen nicht ausreichend.[27] Die derzeitige Wasserstofftankstelleninfrastruktur ist hauptsächlich für den Pkw mit gasförmigen Wasserstoff bei 700 bar, Busse mit gasförmigem Wasserstoff bei 350 bar ausgerichtet. Laut Society of Automotive Engineers (SAE) sind derzeit Durchflussmengen von bis zu 120 g/s realisierbar.[27] Für den gewerblichen Einsatz und um mehrere Betankungen hintereinander mit geringen oder keinen Wartezeiten zu gewährleisten, sind jedoch höhere Durchflussraten erforderlich.[27] Wasserstofftankstellen und Fahrzeugtanks für mittlere und schwere Nutzfahrzeuge befinden sich noch in der Validierungsphase.[27] Die Entwicklung von Wasserstoff-Fahrzeugtanks mit bis zu 100 kg Speicherkapazität wird angestrebt. Derzeit ist es jedoch noch nicht möglich, Tanks mit einem hohen Fassungsvermögen zu betanken. Dazu müssen geeignete Betankungsprotokolle entwickelt werden und kürzere Betankungszeiten von 10-15 Minuten ermöglicht werden.[27] Die sLH2-Technologie befindet sich derzeit sowohl auf der Fahrzeug- als auch auf der Tankstellenseite in einem frühen Entwicklungsstadium.[27] Die Schwierigkeiten bestehen derzeit darin, die Lebensdauer der Bestandteilen zu erhöhen, die den kryogenen Temperaturen des Flüssigwasserstoffs unterliegen und die Boil-off-Verluste – das Verdampfen des tiefkalten Flüssigwasserstoffs aus dem Tank – zu minimieren, die bei längeren Stillstandzeiten auftreten. Außerdem gibt es keine Synergien mit der bestehenden CGH2-Infrastruktur.[27]

Damit das Brennstoffzellen-Nutzfahrzeug nicht nur im Fahrbetrieb emissionsfrei ist, sondern auch der eingesetzte Wasserstoff, bedarf es der Verwendung von grünem Wasserstoff. Grüner Wasserstoff ist klimaneutral, wenn zur Herstellung von Wasserstoff Strom aus erneuerbaren Energien verwendet wird. Die Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energien und die hohen Preise für grünem Wasserstoff stellen jedoch eine große Herausforderung dar.

Aus diesem Grund wird derzeit die Dampfreformierung oder die Elektrolyse mit dem Strommix in Deutschland zur Wasserstoffherzeugung genutzt. Die Dampfreformierung verursacht jedoch sehr hohe Treibhausgasemissionen, die nicht im Einklang mit Ziel der Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs stehen. Ob in Zukunft blauer oder türkiser Wasserstoff als Alternative zum grünen Wasserstoff eine Rolle spielen wird, kann derzeit nicht eindeutig abgeschätzt werden. Zum einen sind Leckagen beim Transport und der Förderung von Erdgas nicht zu vermeiden und zum anderen ist die vollständige Abtrennung des Kohlendioxids aus dem Abgas nach der Reformierung des Erdgases nicht gewährleistet. Darüber hinaus ist der Ausbau der Kohlendioxid-Speicherkapazitäten und die Sicherstellung einer kontinuierlichen Kohlendioxidspeicherung erforderlich.[25] Beim türkisen Wasserstoff besteht die Problematik darin, dass die Wärmeversorgung des Hochtemperaturreaktors aus erneuerbaren Energiequellen sowie die dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs vorausgesetzt werden.[24] Ob diese Probleme zukünftig gelöst werden können, ist derzeit schwer zu beurteilen.

Für den Transport des Wasserstoffs vom Erzeuger zum Verbraucher gibt es verschiedene Möglichkeiten. Etabliert ist der Transport in gasförmigem Zustand in Lkw-Trailern. Im gasförmigen Zustand hat Wasserstoff jedoch eine geringere volumetrische Energiedichte und damit eine geringere Speicherdichte.[27] Daher können keine großen Mengen an Wasserstoff transportiert werden und es sind mehrere Lieferzyklen erforderlich. Problematisch für den Transport von Wasserstoff in flüssigem Zustand ist, dass es derzeit nur drei Anlagen zur Verflüssigung von Wasserstoff in Europa gibt.[27] Für den Transport per Pipeline müssen bestehende Gasleitungen umgerüstet werden oder neue Pipelines gebaut werden, was wiederum mit hohen Kosten verbunden ist.

V. Realisierung

Transportkosten sind ein entscheidender Wettbewerbsfaktor für Unternehmen in der Transport- und Logistikbranche.[32] Daher ist die Erzielung wettbewerbsfähiger Gesamtbetriebskosten für alternative Antriebstechnologien von großer Bedeutung,

denn nur wenn alternative Antriebstechnologien die Gesamtbetriebskosten konventioneller Diesel-Nutzfahrzeuge unterbieten können, werden sie sich durchsetzen. Um eine Kostenparität des Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugs gegenüber dem Diesel-Nutzfahrzeug zu erreichen, wird eine Senkung der Energiekosten und der Anschaffungskosten vorausgesetzt.[28,30]

Das Förderprogramm der Bundesregierung gewährt bis 2026 eine Kaufprämie für alternative Antriebstechnologien, um die Mehrkosten bei der Anschaffung eines Nutzfahrzeugs mit alternativem Antrieb zu kompensieren.[21] Damit wird eine Grundlage zur Reduktion der Anschaffungskosten geschaffen und der Hochlauf der Produktion von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen gefördert.

Die klimaneutralste Methode zur Herstellung von Wasserstoff ist eindeutig die Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien.[25] Die Elektrolyse selbst verursacht keine Emissionen. Eventuell auftretende Emissionen sind auf den eingesetzten Strom zurückzuführen. Aus ökologischer Sicht ist es daher notwendig, grünen Wasserstoff als Energieträger in Nutzfahrzeugen einzusetzen. Aus ökonomischer Sicht ist grüner Wasserstoff in der Herstellung relativ teuer. Die Senkung der Energiekosten erfordert daher den Ausbau von Elektrolyseanlagen und erneuerbaren Energien. Darüber hinaus zeigt die Studie „Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030“, dass bei einem Wasserstoffpreis von 4,57 €/kg Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge wettbewerbsfähig gegenüber Diesel-Nutzfahrzeuge sein können.[30] Die Studie zeigt auch, dass der Wasserstoffpreis von 4,57 €/kg nur durch den Import von Wasserstoff erreicht werden kann.

Eine Möglichkeit, einem Unternehmen den Technologiewechsel zu erleichtern und erste Unsicherheiten zu überwinden, ist das *Pay-Use-Modell*. Vor der Nutzung des Fahrzeugs wird zunächst eine individuell berechnete Kilometerpauschale festgelegt.[14] Im Rahmen der Kilometerpauschale ist die Bereitstellung inklusive Zulassung des Fahrzeugs und die Beantragung von Sondergenehmigungen, Wartung und Reparaturen, Versicherung, Steuern, Reifenservice sowie Rücknahme enthalten.[14] Das *Pay-Use-Modell* übernimmt das Risiko des Techno-

logiewechsels. Der/die Kunde/in hat keine Investitionskosten und es fallen keine zusätzlichen Kosten an.[14] Damit hat der/die Kunde/in die Möglichkeit, die neue Antriebstechnologie zunächst zu testen.

Der Hochlauf von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen setzt vor allem eine flächendeckende Wasserstofftankstelleninfrastruktur voraus. Daher ist ein Ausbau des Wasserstofftankstellennetzes erforderlich. Insbesondere für mittlere und schwere Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge. Da zu erwarten ist, dass Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge zukünftig im Schwerlastbereich und im Langstreckensegment eingesetzt werden.[28] Deswegen wird zur Betankung von schweren Nutzfahrzeugen eine XXL-Konfiguration mit einem durchschnittlichen Wasserstoffdurchsatz von 2,5 Tonnen/Tag erforderlich sein. Unter der Annahme, dass durchschnittlich 60 kg Wasserstoff pro Betankungsvorgang benötigt werden, könnten mehr als 40 LKW pro Tag und Tankanlage betankt werden. Mit dieser Konfiguration könnten bis zu acht schweren Nutzfahrzeugen pro Stunde betankt werden. Die angestrebte Betankungszeit würde sich auf 10 bis 15 Minuten belaufen.[27] Darüber hinaus wird der Aufbau einer flächendeckenden Wasserstofftankstelleninfrastruktur auch durch die Kaufprämie der Bundesregierung gefördert.[21]

Für den Transport von Wasserstoff vom Erzeuger zum Verbraucher ist der Transport in flüssiger Form einer der vielversprechendsten Optionen, da Wasserstoff im flüssigen Zustand eine höhere volumetrische Energiedichte und damit eine höhere Speicherdichte aufweist. Dadurch können größere Mengen an Wasserstoff transportiert und die Lieferzyklen verkürzt werden.[27] Damit der Transport in flüssigem Zustand in Zukunft vermehrt erfolgen kann, ist jedoch der Ausbau der Wasserstoffverflüssigungsanlagen erforderlich. Bei größeren Distanzen ist der Transport per Pipeline eine kostengünstige Alternative. Neben der Transportfunktion des Gasnetzes hat die Speicherung von Wasserstoff in diesen Pipelines noch einen weiteren Vorteil, nämlich die Erhöhung der gleichmäßigen Versorgungssicherheit.[10] Eine weitere Möglichkeit ist die Elektrolyse-vor-Ort. Hierbei entfällt der Transport von der Erzeugung zum Verbraucher.[10]

Welche dieser Optionen sich in der Zukunft durchsetzen wird oder ob es möglicherweise zu einer Kombination aller drei Optionen kommen wird, ist derzeit schwer abzuschätzen.

Auch in Bezug auf die Betankungstechnologien stehen verschiedene Optionen zur Verfügung. Am vielversprechendsten ist die sLH₂-Technologie, da flüssiger Wasserstoff eine höhere volumetrische Energiedichte als gasförmiger Wasserstoff aufweist und somit mehr Wasserstoff im Fahrzeug gespeichert werden kann. Dadurch kann eine wesentlich höhere Reichweite erzielt werden. Darüber hinaus soll eine höhere Speicherkapazität im Fahrzeug, eine schnellere Betankung und eine höhere Energieeffizienz durch die Betankung mit tiefkaltem flüssigem Wasserstoff ermöglicht werden.[27]

VI. Interpretation der Ergebnisse

Die Auseinandersetzung mit der Fragestellung, ob Wasserstoff die Zukunft des Straßengüterverkehrs in Deutschland ist, hat zum Ergebnis geführt, dass es noch Hindernisse gibt, die in Zukunft noch zu überwinden sind.

Zum einen ist es aus Sicht der Unternehmen wichtig, dass Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge vergleichbare Energie- und Anschaffungskosten wie konventionelle Diesel-Nutzfahrzeuge aufweisen. Darüber hinaus wird eine flächendeckende Wasserstofftankstelleninfrastruktur vorausgesetzt. Weiterhin wird eine mit Diesel-Nutzfahrzeugen vergleichbare Gesamtreichweitenflexibilität und Nutzlast erwartet.

Zum anderen ist es aus Sicht der Bundesregierung wichtig, dass Nutzfahrzeuge in Zukunft keine Emissionen erzeugen.

Um sicherzustellen, dass Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge sowohl im Fahrbetrieb als auch der eingesetzte Wasserstoff emissionsfrei sind, ist der Einsatz von grünem Wasserstoff als Energieträger anzustreben. Problematisch ist jedoch, dass grüner Wasserstoff derzeit noch relativ teuer in der Herstellung ist. Um eine Reduktion der Energiekosten zu erreichen, ist der Ausbau von Elektrolyseanlagen und erneuerbaren Energien entscheidend. Um eine Kostenparität des Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugs gegenüber dem Diesel-Nutzfahrzeug zu

erreichen, ist ein Wasserstoffpreis von unter 5 €/kg ist anzustreben.[30] Außerdem ist die Senkung der Anschaffungskosten eine weitere Voraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit des Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugs gegenüber dem Diesel-Nutzfahrzeug. Durch die Kaufprämie der Bundesregierung wird dies bereits realisiert. Damit werden die Mehrkosten, die durch die Anschaffung eines Nutzfahrzeugs mit alternativem Antrieb entstehen, kompensiert. Die Kaufprämie wird auch für den Aufbau einer flächendeckende Wasserstofftankstelleninfrastruktur gewährt. Diese ist derzeit jedoch nicht ausreichend und primär auf Pkw und Busse ausgerichtet. Da aber erwartet wird, dass Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge im Schwerlastbereich und im Langstreckensegment in Zukunft eingesetzt werden, ist der Ausbau des Wasserstofftankstellennetzes insbesondere für mittlere und schwere Nutzfahrzeuge erforderlich. Daher wird bereits der Ausbau der Wasserstofftankstelleninfrastruktur für mittlere und schwere Nutzfahrzeuge angestrebt.

Für den Transport des Wasserstoffs zu den Wasserstofftankstellen hat sich derzeit der Transport des gasförmigen Wasserstoffs mittels Lkw-Trailer etabliert. Gasförmiger Wasserstoff hat jedoch eine geringere volumetrische Energiedichte als flüssiger Wasserstoff.[27] Dadurch ist die Speicherdichte begrenzt und es können nur geringe Mengen an Wasserstoff transportiert werden. Aus diesem Grund ist der Transport von Wasserstoff in flüssigem Zustand per Lkw-Trailer vielversprechend. Darüber hinaus kann flüssiger Wasserstoff sowohl eine CGH₂-Wasserstofftankstelle als auch eine LH₂-Wasserstofftankstelle versorgen. Um jedoch mehr Wasserstoff in flüssigem Zustand transportieren zu können, muss die Anzahl der Wasserstoffverflüssigungsanlagen erhöht werden. Bei größeren Entfernungen ist der Transport über eine Pipeline wirtschaftlich, bei der Elektrolyse-vor-Ort entfällt der Wasserstofftransport. Alle Transportoptionen sind bereits in der Praxis möglich.[27]

Auch bei den Betankungstechnologien gibt es keine eindeutige Lösung. Derzeit ist die CGH₂-Technologie bei 700 bar für Pkw und die CGH₂-Technologie bei 350 bar für Busse und Nutzfahrzeuge etabliert. In der Entwicklung befinden sich aber auch Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge, die gasförmigen Wasserstoff bei 700 bar speichern, z.B. *Nikola Tre*

FCEV, oder flüssigen Wasserstoff, z.B. Mercedes Benz *GenH2 Truck*. Der Vorteil der Speicherung von Wasserstoff im flüssigen Zustand im Fahrzeug ist, dass eine höhere Speicherkapazität im Fahrzeug erreicht wird und dadurch kann eine wesentlich höhere Reichweite erzielt werden. Allerdings befindet sich die sLH2-Technologie sowohl auf der Fahrzeugseite als auch auf der Wasserstofftankstellen-seite noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Es ist daher schwer zu beurteilen, welche Transportoption, welche Speichertechnologie und damit auch welche Betankungstechnologie sich in Zukunft durchsetzen wird. Es besteht ein Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist der Einsatz von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen im Schwerlast- und Langstreckensegment zu erwarten, da sie bei hoher Nutzlast und hohen Tages- und Jahresfahrleistungen positive Gesamtbetriebskosten aufweisen.[28] Dies ist auch aufgrund des Antriebsstrangs des Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugs sinnvoll, denn bei Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen wird die Reichweite und Nutzlast nicht wie bei batterieelektrischen Nutzfahrzeugen durch die Größe und das Gewicht des Akkumulators begrenzt.[30] Aus diesem Grund und basierend auf den Ergebnissen der TCO-Analyse wird der Einsatz von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen vor allem im Regionalverkehr mit geringen Reichweiten erwartet.[28] Zusammenfassend ist es zu erwarten, dass Wasserstoff die Zukunft des schweren Straßengüterverkehrs sein kann. Die Förderung von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen und Wasserstofftankstellen wird bereits angestrebt. Allerdings nur unter der Voraussetzung, dass eine deutliche Senkung der Energie- und Anschaffungskosten erreicht wird und eine flächendeckende Wasserstofftankstelleninfrastruktur gewährleistet ist. Darüber hinaus besteht Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf bei der Speicher- und Betankungstechnologie. Wie schnell sich die Wasserstofftechnologie im Transportsektor entwickeln wird, ist abhängig von der Entwicklung der Voraussetzungen und Bewältigung der Hindernissen.

Literaturverzeichnis

- [1] Gleißner, Harald et al. (2016): Kompakt Edition: Transport. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S.5
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2021): Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik. URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool_s/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2021_bf.pdf, S. 37.
- [3] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2022): Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr - Mittelfristprognose Winter 2021/22. URL: [Gleitende Mittelfristprognose Winter 2021-22.pdf;jsessionid=EF8A8281A1849F566DDF1A92F6F8247F.live21303 \(bund.de\)](https://www.bmdv.de/SharedDocs/DE/Presse/Mittelfristprognose_Winter_2021-22.pdf;jsessionid=EF8A8281A1849F566DDF1A92F6F8247F.live21303_bund.de), S. 39.
- [4] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016): Status quo des Güterverkehrsystems in Deutschland – eine Metastudie unter besonderer Betrachtung der Vernetzung des Verkehrs. URL: [Verbesserung der Führung des LKW-Verkehrs \(bund.de\)](https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/DE/Presse/Verbesserung_der_Fuehrung_des_LKW_Verkehrs_bund.de), S.28-30
- [5] Umweltbundesamt (2022): Klimaschutz im Verkehr. URL: [Klimaschutz im Verkehr | Umweltbundesamt](https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/klimaschutz)
- [6] Bundesministerium der Justiz (2019): Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). URL: [KSG - Bundes-Klimaschutzgesetz \(gesetze-im-internet.de\)](https://www.gesetze-im-internet.de/ksg)
- [7] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2021): Klimaschutzziele und Beschlüsse. URL: [BMDV - Klimaschutzziele und Beschlüsse \(bund.de\)](https://www.bmdv.de/SharedDocs/DE/Presse/BMDV_-_Klimaschutzziele_und_Beschluesse_bund.de)
- [8] NOW (2023): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Strassengüterverkehr. URL: [Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr \(klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de\)](https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de)
- [9] Fraunhofer (2022): Chancen der Brennstoffzellentechnologie im Schwerlastverkehr. URL: [Positionspapier: Chancen der Brennstoffzellentechnologie im Schwerlastverkehr \(fraunhofer.de\)](https://www.fraunhofer.de/SharedDocs/DE/Presse/Positionspapier_Chancen_der_Brennstoffzellentechnologie_im_Schwerlastverkehr_fraunhofer.de)

- [10] Karle, Anton (2021): Elektromobilität. Grundlagen und Praxis. 5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser. S.17, S.11-12, S.42-44, S.27-28, S.39
- [11] Bundesnetzagentur (2023): Elektromobilität: Öffentliche Ladeinfrastruktur. URL: [Bundesnetzagentur - E-Mobilität](#)
- [12] NPM (2021): Ladeinfrastruktur für batterieelektrische LKW. URL: [NPM_AG5_Ladeinfrastruktur_ELkw.pdf \(plattform-zukunft-mobilitaet.de\)](#)
- [13] Hyundai aktuell: Die ersten schweren Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge Hyundai XCIENT Fuel Cell sind unterwegs nach Europa. URL: [Die ersten schweren Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge Hyundai XCIENT Fuel Cell sind unterwegs nach Europa - aktuell](#)
- [14] hylane (2023): Klimaneutrale Mobilität zur Miete. URL: [hylane - Klimaneutrale Mobilität zur Miete](#)
- [15] IVECO (2021): IVECO und NIKOLA eröffnen in Ulm gemeinsames Produktionswerk für batterieelektrische und brennstoffzellenbetriebene Lkw. URL: [IVECO und NIKOLA eröffnen gemeinsames Produktionswerk](#)
- [16] IVECO (2023): GP JOULE plant, 100 Nikola Tre FCEV zu bestellen. URL: [GP JOULE plant, 100 Nikola Tre FCEV zu bestellen \(iveco.com\)](#)
- [17] IVECO (2022): IAA TRANSPORTATION 2022: IVECO und Nikola präsentieren europäische Version der batterieelektrischen Sattelzugmaschine Nikola Tre BEV. URL: [03_PI_IVECO_Nikola_IAA.docx](#)
- [18] Daimler Truck (2022): Entwicklungsmeilenstein erreicht: Daimler Truck testet Brennstoffzellen-Lkw mit Flüssigwasserstoff. URL: [Entwicklungsmeilenstein erreicht: Daimler Truck testet Brennstoffzellen-Lkw mit Flüssigwasserstoff - Daimler Truck Media Site](#)
- [19] Richtlinie KsNI (2021): Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur. URL: [Foerderrichtlinie.pdf \(klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de\)](#) S.1
- [20] Klimafreundliche Nutzfahrzeuge (2022): Förderung von klimafreundlichen Nutzfahrzeugen wird bis 2026 verlängert. URL: [Förderung von klimafreundlichen Nutzfahrzeugen wird bis 2026 verlängert - Klimafreundliche Nutzfahrzeuge \(klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de\)](#)
- [21] Klimafreundliche Nutzfahrzeuge (2021): Förderrichtlinie. URL: [Förderrichtlinie - Klimafreundliche Nutzfahrzeuge \(klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de\)](#)
- [22] Quaschnig, Volker; Quaschnig, Cornelia (2022): Energierevolution jetzt! Mobilität, Wohnen, grüner Strom und Wasserstoff: Was führt uns aus der Klimakrise - und was nicht? München: Hanser. S.121-122
- [23] Töpler, Johannes; Lehmann, Jochen (2017): Wasserstoff und Brennstoffzelle. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. S.16-17
- [24] Gochermann, Josef (2021): Halbzeit der Energiewende? Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. S.245, 249, 258
- [25] Umweltbundesamt (2022): Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem. URL: [Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem | Umweltbundesamt](#)
- [26] Umweltbundesamt (2019): Ist Atomstrom wirklich CO2-frei? URL: [Ist Atomstrom wirklich CO2-frei? | Umweltbundesamt](#)
- [27] H2-Mobility (2021): Wasserstoffbetankung von Schwerlastfahrzeugen – die Optionen im Überblick. URL: [H2M_Ueberblick_BetankungsoptionenLNFS_NF_TankRast_2021-10-21.pdf \(h2-mobility.de\)](#)
- [28] Roland Berger (2020): Fuel Cells Hydrogen Trucks. Heavy-Dutys High Performance Green Solution.
- [29] NPM (2020): Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge. URL: [20201221-NPM-](#)

[Bericht-AG1-NFZ-final-wrz.indd \(plattform-zukunft-mobilitaet.de\)](#)

[30] Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg; PTV Group (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030.

URL: [2022-02-04 - My eRoads - Potentiale Lkw-Antriebstechnologien - final_01.pdf \(ifeu.de\)](#)

[31] TÜV Nord: Wirkungsgrad.

URL: [Wirkungsgrade von Elektroautos | TÜV NORD Mobilität \(tuev-nord.de\)](#)

[32] Öko-Institut e.V. (2018): Oberleitung-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. URL: [normal Öko-Institut \(oeko.de\)](#) S.40

Abbildungsverzeichnis

[1] Abbildung 1: TCO ohne staatliche Steuerungsinstrumente (Referenz). NPM (2020): S.22

[2] Abbildung 2: TCO ohne staatliche Steuerungsinstrumente (Sensitivität). NPM (2020): S.24

[3] Abbildung 3: Referenzszenario mit staatlichen Steuerungsinstrumenten. NPM (2020): S.26

[4] Abbildung 4: Vergleich der TCO von Brennstoffzellen-Lkw und Diesel-Lkw. Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg und PTV Group (2022): S.43

[5] Abbildung 5: Vergleich der TCO von rein batterieelektrischen Lkw und Diesel-Lkw. Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg und PTV Group (2022): S.37

[6] Abbildung 6: TCO-Bewertung für Anwendungsfall 1. Eigene Darstellung in Anlehnung an Roland Berger (2020): S.27

[7] Abbildung 7: TCO-Bewertung für Anwendungsfall 2. Eigene Darstellung in Anlehnung an Roland Berger (2020): S.27

[8] Abbildung 8: TCO-Bewertung für Anwendungsfall 3. Eigene Darstellung in Anlehnung an Roland Berger (2020): S.28

Tabellenverzeichnis

[1] Tabelle 1: Energiekosten 1. Eigene Darstellung in Anlehnung an NPM (2020): S.22

[2] Tabelle 2: Energiekosten 2. Eigene Darstellung in Anlehnung an NPM (2020): S.25

[3] Tabelle 3: Kostenannahmen FCEV. Eigene Darstellung in Anlehnung an Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg und PTV Group (2022): S.31-34

[4] Tabelle 4: Kostenannahmen BEV. Eigene Darstellung in Anlehnung an Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg und PTV Group (2022), S.31-34

[5] Tabelle 5: Angenommene Energiepreise (ohne USt) für das Referenzjahr 2030. Eigene Darstellung in Anlehnung an Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg und PTV Group (2022)

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/78733

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20230706-171152-6

Alle Rechte vorbehalten.