



Wasserstoff und Batteriestrom als alternative Energieträger für den Schwerlastverkehr der Straße

SYSTÖK – Policy Brief

Policy Brief

Wasserstoff und Batteriestrom als alternative Energieträger für den Schwerlastverkehr der Straße

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Verkehrsforschung
Martin Winter, Klaus Jäkel, Gunnar Knitschky

Erstellt im Rahmen des Impulsprojektes:
Strategische Optionen für Energieträger im Verkehr (SYSTÖK)

Die Transformation der Antriebstechnologie leistet einen integralen Beitrag für eine zukunftssichere und klimaverträgliche Wirtschaft. Das DLR-Projekt SYSTÖK analysiert diese Transformation aus techno-ökonomischer Sicht. Das DLR gibt in acht Policy Briefs einen kompakten Überblick über die aktuelle und zukünftige Rolle von wasserstoff-basierten Antrieben und geeigneter Substitute im Straßen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr. Die

Policy Briefs führen die Erkenntnisse aus zahlreichen DLR-Forschungsprojekten und weiteren wissenschaftlichen Quellen zusammen. Die Policy Briefs richten sich an die Politik, Verbände und Unternehmen. Auch der interessierten Öffentlichkeit geben sie in aller Kürze Orientierung zu aktuellen techno-ökonomischen Fragen der klimaverträglichen Mobilität von morgen.

Inhaltsverzeichnis

Management Summary	3
1. Die Notwendigkeit der Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs	4
2. Der Markt für schwere Lkw in Deutschland und Europa – Akteure, Beziehungen und strukturelle Merkmale	5
3. Technisch-ökonomische Eigenschaften von schweren Lkw mit Brennstoffzellen- und batterieelektrischem Antrieb – heute und in absehbarer Zukunft	6
4. Regionale Märkte und Marktstrategien europäischer Lkw-Hersteller	8
5. Politische Handlungsempfehlungen	10
Literaturverzeichnis	12

Management Summary

Angesichts des derzeitigen Anteils von Dieselantrieben von nahezu 100 Prozent und des Weiteren Anstiegs des Güterverkehrsaufkommens ist die Umstellung der Lkw-Flotte auf emissionsfreie Antriebe unumgänglich. Zwei geeignete Technologien sind dafür am Markt verfügbar: Elektroantriebe, deren Stromzufuhr direkt aus Batterien oder indirekt aus Wasserstoff-Brennstoffzellen erfolgt. Beide Technologien erfordern den Aufbau einer entsprechenden Lade- beziehungsweise Betankungsinfrastruktur.

Den Erfolg dieser alternativen Antriebe im Schwerlastverkehr beeinflussen die politischen Rahmenbedingungen und die Marktakteure. Die Fahrzeugalter entscheiden über die Anschaffung der Lkw mit betriebswirtschaftlichem Kalkül – abhängig vom Marktangebot und Einsatzzweck. Aktuell sind deren Anschaffungskosten zwei bis drei Mal so hoch wie für Diesel-Lkw. Das weitaus teuerste Element bei batterieelektrischen Lkw sind die Batteriepakete. Bei Brennstoffzellen-Lkw sind es die Brennstoffzelle und der Wasserstofftank. In Zukunft werden Skaleneffekte und technologische Innovationen diese Kosten senken.

Für die Gesamtkosten eines Lkw mit alternativem Antrieb und damit für die Kaufentscheidung spielen der Wirkungsgrad und die künftigen Preise von Wasserstoff und Ladestrom eine entscheidende Rolle. Brennstoffzellen-Lkw sind zehn bis zwölf Prozent, batterieelektrische Lkw sogar etwa 60 Prozent energieeffizienter als vergleichbare Diesel-Lkw.

Mit derzeit bis zu 1.000 Kilometern Reichweite bieten Brennstoffzellenfahrzeuge eine höhere Reichweite als batterieelektrische Lkw mit circa 760 Kilometern. Die maximale Reichweite eines Fahrzeugs verliert aber an Bedeutung, je kürzer Stopps zum Betanken oder Laden ausfallen. Das Betanken eines Brennstoffzellen-Lkw dauert mit 15 Minuten ähnlich lange wie bei einem Diesel-Lkw. Batterieelektrische Lkw benötigen längere Ladezeiten. Diese können jedoch durch geplante Fahrtunterbrechungen in den Betriebsablauf

integriert werden. Insgesamt sind batteriebetriebene Lkw im Betrieb kostengünstiger, während Brennstoffzellen-Lkw bei längeren Strecken Vorteile haben.

Europäische Hersteller setzen in unterschiedlichem Ausmaß auf batterieelektrische und brennstoffzellenbetriebene Lkw. Diese Strategien spiegeln deutlich die unterschiedlichen regionalen Marktpositionen der Unternehmen sowie die Marktanforderungen und regulatorische Rahmenbedingungen wider. Neue Regulierungen in der EU und den USA erfordern künftig einen hohen Anteil CO₂-neutraler Lkw. In Märkten mit langen Transportdistanzen wie etwa den USA wird mittelfristig (bis 2030/2035) eine Koexistenz beider Antriebssysteme erwartet.

Der Markt für schwere Lkw ist aktuell ein Experimentierfeld für alternative Antriebstechnologien. Der Fahrzeugmarkt bietet Nutzern dieselbetriebener Lkw die Möglichkeit, alternative Antriebe für ihre spezifischen Einsatzzwecke zu testen. Kurze Erneuerungszyklen der Schwerlast-Lkw von circa vier Jahren erleichtern dies. Bestandsfahrzeuge können auf beide alternativen Technologien umgerüstet werden.

Handlungsempfehlungen

- Auf Förderungen von Infrastruktur für alternative Lkw-Antriebe, die weit über das von der Europäischen Union vorgegebene Niveau hinausgehen, sollte vorerst verzichtet werden.
- Der Staat sollte den Markt weiterhin als Experimentierfeld für alternative Antriebstechnologien nutzen. Durch die Beobachtung der dortigen Entwicklungen wird im Zeitverlauf ein besserer Wissenstand erreicht, der zur Konzentration der begrenzten Fördermittel auf die aussichtsreichste Technologie genutzt werden kann.

- Um Planungssicherheit für Unternehmen zu gewährleisten, ist ein langfristig orientierter, verlässlicher regulatorischer Rahmen in der Investitions- und Innovationspolitik notwendig. Das gleiche gilt für mittelfristig ausgerichtete Forschungs- und Förderprogramme zu alternativen Antrieben bei Lkw.

1. Die Notwendigkeit der Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs

Deutschland hat sich mit der vollständigen Dekarbonisierung seines Wirtschaftssystems bis 2045 ein ambitioniertes Ziel gesetzt (Klimaschutzgesetz (BMJV, 2024)). Während in einzelnen Sektoren wie Industrie- und Stromproduktion bereits erhebliche Fortschritte erzielt wurden, stagniert der CO₂-Ausstoß im Straßenverkehr weiterhin auf hohem Niveau. Etwa 30 Prozent der Emissionen im Straßenverkehr stammen vom Schwerlastverkehr (Statistisches Bundesamt, 2022). Technologischer Fortschritt wie effizientere Verbrennungsmotoren und Aerodynamik haben zwar zu Kraftstoff- und damit zu CO₂-Einsparungen geführt, diese wurden jedoch durch größere Fahrtweiten und ein höheres Frachtaufkommen überkompensiert. Zur Erreichung des Dekarbonisierungsziels und angesichts eines erwarteten weiteren Anstiegs des Güterverkehrsaufkommens ist eine Umstellung der Lkw-Flotte auf emissionsfreie Antriebe unumgänglich.

Zwei geeignete Technologien sind dafür am Markt verfügbar: Elektroantriebe, deren Stromzufuhr direkt aus Batterien oder indirekt aus Wasserstoff-Brennstoffzellen erfolgt. Beide Systeme erfordern den Aufbau einer entsprechenden Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur. Prinzipiell wären auch synthetische Kraftstoffe aus erneuerbaren Energiequellen geeignet; allerdings sind deren Herstellungskosten bisher so hoch, dass sie kurzfristig keine wirtschaftliche Alternative darstellen.

Bisherige klimapolitisch begründete Regulierungen des Straßengüterverkehrs auf deutscher und europäischer Ebene folgten der ordnungspolitischen Leitlinie der prinzipiellen Technologieneutralität. Hierzu zählen der nationale Emissionshandel (seit 2021), die neue CO₂-Komponente der deutschen Lkw-Maut (seit 2023) und die europäischen Flottengrenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge. Diese sollen den technischen Wandel hin zu emissionsfreien Antrieben forcieren.

Neben diesen Regulierungen gab es in der Vergangenheit in Deutschland auch umfangreiche Fördermöglichkeiten für die Beschaffung emissionsfreier, auf Wasserstoffbasis oder batterieelektrisch betriebener Lkw und der zugehörigen Betankungs- und Ladeinfrastruktur (BALM, 2023). Diese sollten einen ersten Markthochlauf alternativer Antriebe anstoßen.

2. Der Markt für schwere Lkw in Deutschland und Europa – Akteure, Beziehungen und strukturelle Merkmale

Neben den politischen Rahmenbedingungen sind die Marktakteure bestimmend für den Erfolg einer Markteinführung alternativer Antriebe im Schwerlastverkehr. Die Entscheidung über die Anschaffung von Lkw treffen die Fahrzeughalter mit einem betriebswirtschaftlichen Kalkül – in Abhängigkeit des vorhandenen Marktangebotes und des angestrebten Einsatzzweckes.

Das Angebot schwerer Nutzfahrzeuge

Der europäische Markt für schwere Lkw (über 12 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht) gehört zu den größten weltweit und ist durch wenige große Hersteller geprägt. Aktuell dominieren fünf Unternehmen: Traton (VW, Scania, MAN), Volvo Trucks (Volvo, Renault), Daimler Truck, DAF (Paccar) und Iveco (T&E, 2023).

Diese Hersteller haben das notwendige Know-how und die Produktionskapazitäten über Jahre entwickelt und stehen nun vor der Herausforderung, ihr Fahrzeugangebot auf emissionsfreie Antriebe umzustellen. Diese Transformation ist mit einem hohen Kapitalbedarf und notwendigen Investitionen in Forschung und Entwicklung neuer Antriebskonzepte verbunden. Durch den hohen Kapitalbedarf ergibt sich ein Wettbewerbsvorteil gegenüber neu in den Markt eintretenden Fahrzeugherstellern.

Bereits heute werden schwere Lkw mit Brennstoffzellen- oder Batterieantrieb angeboten. Die aktuell hohe Dynamik auf der Anbieterseite des Marktes

für schwere Lkw in Europa spiegelt zudem die rasche Technologieentwicklung für alternative Antriebe wider.

Die Nachfrage nach schweren Nutzfahrzeugen

Im Gegensatz zur Angebotsseite ist die Nachfrage nach schweren Nutzfahrzeugen in Europa stark fragmentiert und heterogen. Dies führt dazu, dass die einzelnen Nutzer über keine Marktmacht gegenüber den Herstellern verfügen. Die Nutzer reichen von kleinen Einzelunternehmern über Kommunen bis hin zu großen Logistikdienstleistern.

Der gewerbliche Straßengüterverkehr, als Hauptnutzer schwerer Lkw, ist durch viele kleine und mittelgroße Unternehmen geprägt, die Teil eines kompetitiven Marktes sind. Die Investitionen in alternative Antriebe müssen sich für die Betreiber betriebswirtschaftlich rechnen; dies stellt angesichts der hohen Wettbewerbsintensität und geringer Umsatzrenditen eine Herausforderung dar.

Mit Marktanteilen nahe 100 Prozent dominieren konventionelle Diesel-Lkw bislang den Nutzfahrzeugmarkt (ICCT, 2024). Aktuelle effizienzgetriebene Logistiksysteme sind auf deren spezifische Eigenschaften hinsichtlich Nutzlast, Betankung und Reichweite abgestimmt. Davon abweichende Charakteristika alternativ angetriebener Lkw können einen organisatorischen Anpassungsbedarf erfordern, der durch Einsparungen im Betrieb auszugleichen ist.

Die große Heterogenität in den bisherigen Einsatzprofilen schwerer Lkw spricht dafür, dass Brennstoffzellen- und batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge schon heute für bestimmte Nutzungszwecke ihre spezifischen Vorteile ausspielen können und bei künftigen Kostensenkungen der Markthochlauf gelingen kann.

(Neue) Mittler zwischen Angebot und Nachfrage

Mit der Einführung neuer Antriebstechnologien entstehen neue Geschäftsmodelle zur Fahrzeug-

beschaffung. Zum Beispiel bieten Pay-per-Use-Modelle ein Bündel von Leistungen gegen eine Kilometerpauschale an, welche die Fahrzeugbereitstellung, die Wartung, die Betankung und die Übernahme der Energiekosten beinhaltet. Dies minimiert die Unsicherheiten der Betreiber hinsichtlich der neuen Technologien und ermöglicht eine verlässlichere Kalkulation der Betriebskosten.

Infrastrukturbetreiber im Technologieverbund

Eine zuverlässige Lade- und Betankungsinfrastruktur ist für den Einsatz von Lkw mit alternativen Antrieben essentiell. Der Aufbau dieser Infrastruktur erfolgt sowohl durch staatliche Förderung als auch durch privatwirtschaftliche Investitionen. Die EU-Verordnung 2023/1804 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) legt dabei Mindestanforderungen für deren räumliche Abdeckung fest (EU, 2023).

Mit der Förderung klimaverträglicher Nutzfahrzeuge und dazugehöriger Infrastruktur im Rahmen der nationalen Förderrichtlinie KsNI waren in Deutschland bis Ende 2023 maximal 80 Prozent der Mehrausgaben für derartige Infrastruktur technologie-neutral förderfähig (BALM, 2023). Darüber hinaus hat die Bundesregierung im Masterplan Ladeinfrastruktur II den Aufbau eines initialen Schnellladenetzes für batterieelektrische Lkw entlang der Fernverkehrsstrecken beschlossen (Bundesregierung, 2022).

Unternehmen aus komplementären Geschäftsfeldern wie der Energieversorgung oder der Fahrzeugproduktion bauen in Kooperationen technologiespezifische Infrastruktur auf, um gemeinsam eine bestimmte Antriebstechnologie zu forcieren. Beim flächenhaften Infrastrukturaufbau kooperieren auch Wettbewerber wie Lkw-Hersteller miteinander. Ziel ist es jeweils, im Verbund von einer neuen Technologie zu profitieren und Vorteile eines frühen Markteintritts zu nutzen.

3. Technisch-ökonomische Eigenschaften von schweren Lkw mit Brennstoffzellen- und batterieelektrischem Antrieb – heute und in absehbarer Zukunft

Die hohe Wettbewerbsintensität im Straßengüterverkehr führt zu einem stark kostenorientierten Nachfrageverhalten. Entscheidend für den Kauf von Lkw mit alternativen Antrieben im Vergleich zu dieselbetriebenen Fahrzeugen sind deren TCO (Total Costs of Ownership), die aus den Anschaffungs- und Betriebskosten resultieren, sowie (mögliche) Einschränkungen in deren Nutzung.

Anschaffungs- und Betriebskosten

Aktuell liegen die Anschaffungskosten sowohl für batterieelektrische als auch für Brennstoffzellen-Lkw gegenüber konventionellen Diesel-Lkw noch um den Faktor 2 bis 3 höher (Affeld, 2024). Zukünftige Größenvorteile in der Produktion und technologische Innovationen werden diese Kosten voraussichtlich senken. Die Studie „Transformation der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie in Baden-Württemberg durch Elektrifizierung, Digitalisierung und Automatisierung“ aus dem Jahr 2023 prognostiziert bis 2030 Kostensenkungen von rund 27 Prozent für batterieelektrische und 24 Prozent für Brennstoffzellen-Lkw, während die Kosten für konventionelle Diesel-Fahrzeuge leicht steigen werden (e-mobil BW, 2023). Das weitaus teuerste Element bei batterieelektrischen Lkw sind die Batteriepakete, bei Brennstoffzellen-Lkw sind es die Brennstoffzelle und der Wasserstoff-Tank. Künftige Kostensenkungen in diesen Bereichen sind entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit alternativer Antriebe.

Der energetische Wirkungsgrad batterieelektrischer Lkw ist deutlich höher als bei Brennstoffzellenfahrzeugen: Brennstoffzellen-Lkw sind 10 bis 12 Prozent energieeffizienter als vergleichbare Diesel-Lkw, während batterieelektrische Lkw etwa 60 Prozent effizienter sind (Basma und Rodríguez, 2022). Neben dem Wirkungsgrad spielen die künftigen Preise von Wasserstoff und

Ladestrom eine entscheidende Rolle für die TCO eines Lkw mit alternativem Antrieb und damit für die Kaufentscheidung der Nachfrager. Der gegenüber batterieelektrischen Lkw geringere Wirkungsgrad von Brennstoffzellenfahrzeugen könnte durch günstige Wasserstoff-Importe kompensiert werden. Zurzeit kostet das Kilogramm nicht regenerativ erzeugter („grauer“) Wasserstoff an der Tankstelle zwischen 8 und 12 Euro (Stand Juli 2024); erforderlich für das Erreichen einer Kostenparität mit dieselbetriebenen Fahrzeugen wären Preise von 3 bis 5 Euro pro Kilogramm (Basma und Rodríguez, 2022). Unklarer ist die Studienlage, wie Brennstoffzellen-Lkw hinsichtlich ihrer

Gesamtkosten (TCO) gegenüber batterieelektrischen Lkw abschneiden (Abbildung 1). Bei Depotladung und Gewerbestrompreisen von 0,21 bis 0,25 Euro pro Kilowattstunde sind batterieelektrische Lkw bereits heute günstiger im Betrieb. Bei einem batterieelektrisch betriebenen Lkw mit 40 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht, der sowohl im Depot als auch unterwegs geladen wird, besteht aktuell über eine Distanz von 500 Kilometern ein Nachteil in den variablen Kosten von circa 15 Prozent gegenüber Diesel-Lkw. Mit steigenden CO₂-Steuern auf den Dieselpreis könnte sich dieses Verhältnis umkehren.

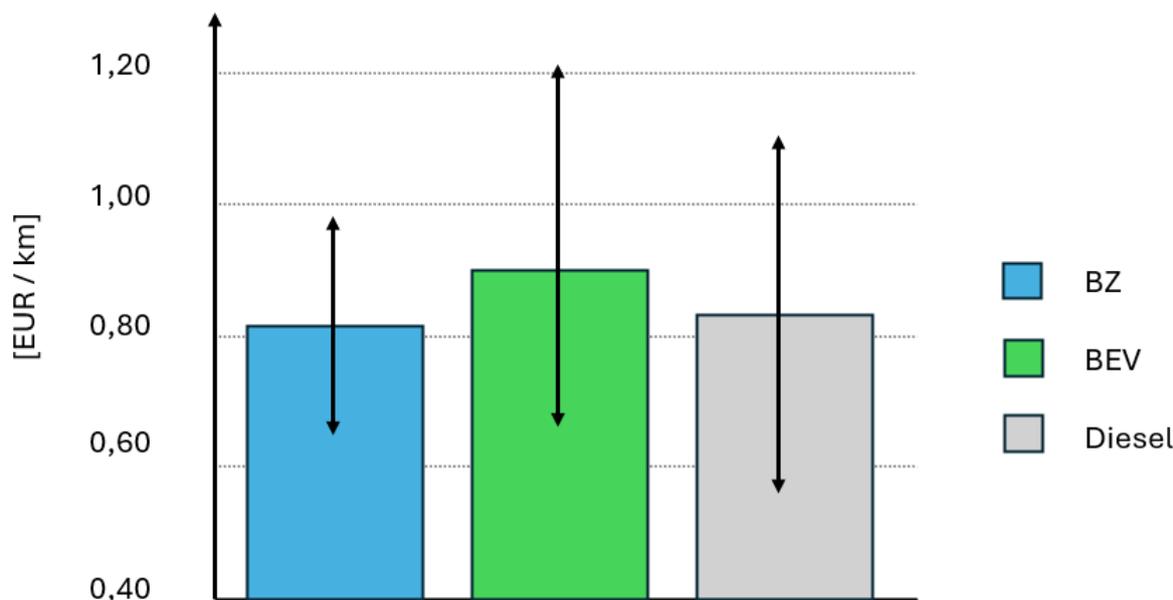


Abbildung 1: Spannweite von Schätzungen zu den Total Costs of Ownership (TCO) für verschiedene Antriebsarten bei schweren Lkw im Jahr 2030. Quelle: Metastudie VDI/VDA (2022)

Reichweite, Betankungsvorgang und Infrastrukturbedarf

Neben den Anschaffungs- und Betriebskosten sind weitere Spezifika von CO₂-neutralen Lkw für einen wirtschaftlichen Betrieb relevant:

Brennstoffzellenfahrzeuge bieten mit derzeit bis zu 1.000 Kilometern (Schaal, 2024 und Voith, 2024) eine höhere Reichweite als batterieelektrische Lkw mit circa 760 Kilometern (Design-

werk, 2024). Die maximale Reichweite eines Fahrzeuges verliert aber an Bedeutung, je kürzer ein sonst entbehrlicher oder ungeplanter Stopp zur Betankung oder zum Laden ausfällt. Die Betankung eines Brennstoffzellen-Lkw benötigt mit etwa 10 bis 15 Minuten ähnlich lange wie bei einem Diesel-Lkw. Batterieelektrische Lkw benötigen längere Ladezeiten, die jedoch durch geplante Fahrtunterbrechungen aufgrund der Lenk- und Ruhezeiten und dem Einsatz von Mega-

watt-Chargern (zum Beispiel 700 Kilowatt Ladeleistung bei einer Ladezeit von 30 Minuten) in den Betriebsablauf integriert werden können (Werwitzke, 2024).

Die hohen Reichweiten der Brennstoffzellen-Lkw erlauben für eine flächendeckende Wasserstoff-Versorgung ein vergleichsweise dünnes Tankstellennetz, während für batterieelektrische Lkw eine dichtere Ladeinfrastruktur benötigt wird. Langfristig könnte die Diversifikation von Energiequellen und eine kombinierte Nutzung von Wasserstoff- und Batterieinfrastruktur die Resilienz des Gesamtsystems Straßengüterverkehr erhöhen. Insgesamt sind batteriebetriebene Lkw im Betrieb aufgrund des höheren Wirkungsgrades kostengünstiger, während Brennstoffzellen-Lkw bei längeren Fahrtstrecken insbesondere aufgrund der hohen Reichweite Vorteile haben.

Innovationsdynamik in der Brennstoffzellen- und Batterietechnik

Sowohl die Brennstoffzellen- als auch die Batterietechnologie verzeichnen erhebliche Fortschritte. Neue Entwicklungen in der Batterietechnik, wie Feststoffbatterien, bieten das Potenzial einer höheren Energiedichte und kürzerer Ladezeiten (Schmaltz, 2023). In der Brennstoffzellentechnik sind fortschrittliche Tanksysteme mit höherer Kompression wesentliche Innovationsfelder (HGF, 2021). Die Innovationsdynamik wird durch hohe Investitionen und eine starke Wettbewerbslandschaft angetrieben.

Innovationen bei der Brennstoffzellentechnik werden von Unternehmen aus Japan, Südkorea, den USA und Deutschland dominiert (e-mobil BW, 2023). Eine Grundlage hierfür ist eine intensive Förderung dieses Antriebssystems durch die jeweilige nationale Politik, in den USA auch wegen der Größe des heimischen Lkw-Marktes. Insgesamt weist die Batterietechnik aber eine deutlich höhere Innovationsdynamik auf als die Brennstoffzellentechnik. Die Analyse der Strukturstudie BW kommt für den Zeitraum 2010 bis 2022 auf 150.790 Anmeldungen internationaler Patente zu Innovationen bei Batterietechnologien als Fahrzeuganwendung (e-

mobil BW, 2023). Das ist rund das Sechsfache der Anmeldungen zu Brennstoffzellentechnik im selben Zeitraum. Das lässt auf eine höhere Innovationsdynamik in diesem Bereich schließen.

4. Regionale Märkte und Marktstrategien europäischer Lkw-Hersteller

Die europäischen Hersteller schwerer Nutzfahrzeuge agieren weltweit, mit regional unterschiedlichem Engagement und Erfolg. Die drei europäischen Unternehmen Daimler Truck, Traton und Volvo Trucks zählen zu den Top 10 der (nach Anzahl abgesetzter Fahrzeuge) größten Lkw-Hersteller der Welt; Daimler Truck ist Weltmarktführer.

Die geographische Verteilung der Lkw-Produktion ist stark auf bestimmte Wirtschaftsregionen konzentriert. China ist zwar der größte Markt für schwere Lkw, wird aber von einheimischen Herstellern beherrscht. Einen Zugang haben europäische Hersteller dort nur über lokale Produktionsstätten. In Westeuropa und Nordamerika dominieren hingegen die europäischen Hersteller den Markt für schwere Lkw.

Charakteristika bedeutender regionaler Teilmärkte für europäische Lkw-Hersteller

Nordamerika ist neben Westeuropa der profitabelste Markt für schwere Lkw. Prognosen zeigen, dass im Jahr 2030 in diesen beiden Regionen 65 Prozent der weltweiten Gewinne im Nutzfahrzeuggeschäft erzielt werden (McKinsey & Company, 2018). Nach Übernahmen dominieren europäische Hersteller diesen Markt. Insgesamt wurden in den USA im Jahre 2023 rund 475.000 schwere Lkw neu zugelassen (St. Louis Fed, 2024). Eine Besonderheit des nordamerikanischen Lkw-Marktes ist seine geographische Ausdehnung mit weiten Transportdistanzen, insbesondere zwischen den wirtschaftlich starken Metropolen an der Ost- und Westküste. Darüber hinaus weichen die gesetzlichen Regelungen zu Lenk- und Ruhezeiten von denen der EU ab. In den USA dürfen 8 Stunden ohne Pause gefahren werden,

nach einer Pause von 30 Minuten sind insgesamt 11 Stunden Lenkzeit in einem Zeitfenster von 14 Stunden möglich (FMCA, 2024). Diese Regelung ermöglicht deutlich längere tägliche Fahrzeiten als in der EU. Die Charakteristika des nordamerikanischen Marktes bieten sich damit besonders an, die spezifischen Vorteile der Brennstoffzellentechnologie zu nutzen.

In dem ebenfalls sehr profitablen westeuropäischen Markt verkauften die Hersteller im Jahr 2022 rund 300.000 schwere Lkw (ACEA, 2023). Die polyzentrische Wirtschaftsstruktur des Europäischen Wirtschaftsraums mündet in eine gleichmäßigere Verteilung der wirtschaftlichen Aktivitäten und damit kürzere Tagesfahrweiten als in den USA. Die europäischen Lenk- und Ruhezeiten sehen deutlich längere Standzeiten der schweren Lkw als in den USA vor. So muss nach einer Lenkzeit von 4,5 Stunden eine Pause von 45 Minuten eingelegt werden (EG, 2006), die auch als Ladestopp genutzt werden kann. Hieraus ergibt sich ein Marktvorteil für batterieelektrische Nutzfahrzeuge.

Sowohl in den USA als auch in Europa bestehen regulatorische Vorgaben zur Minderung von CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge. Im März 2024 veröffentlichte die zuständige US-amerikanische Behörde Environmental Protection Agency (EPA) neue verbindliche CO₂-Grenzwerte für verschiedene Klassen schwerer Lkw. Der CO₂-Ausstoß pro Transportleistungseinheit (Tonne pro Meile) soll bis zum Jahr 2032 je nach Fahrzeugklasse um 25 bis 60 Prozent (bezogen auf das Basisjahr 2021) reduziert werden (EPA, 2024). Neue Flottengrenzwerte für CO₂-Emissionen wurden im April 2024 auch in der EU festgelegt, die drastische CO₂-Reduktionen bis 2040 vorsehen. In drei Stufen steigen die Minderungsziele im Vergleich zu 2019 von 45 Prozent (2030-2034) auf 90 Prozent ab 2040 (EU, 2024). Diese Regulierungen zwingen die Lkw-Hersteller letztendlich zur Produktion emissionsfreier Fahrzeuge für beide Märkte.

Die Marktstrategien europäischer Lkw-Hersteller

Europäische Hersteller wie Daimler Truck, Traton und Volvo Trucks setzen in unterschiedlichem Ausmaß auf batterieelektrische und brennstoffzellenbetriebene Lkw. Diese Strategien spiegeln die unterschiedlichen regionalen Marktpositionen der Unternehmen sowie die Marktanforderungen und regulatorische Rahmenbedingungen wider.

Batterieelektrische Fahrzeuge sind bereits in Großserie von allen europäischen Herstellern verfügbar. Insbesondere Daimler Truck hat durch frühere Forschung auch erhebliches Know-how in der Brennstoffzellentechnologie erworben (e-mobil BW, 2023). Bei der Weiterentwicklung des Potenzials zur Marktreife für geeignete Märkte wie den USA kooperiert Daimler Truck auch mit dem schwedischen Konkurrenten Volvo Trucks (Daimler Truck, 2021). In absehbarer Zeit ist damit zu rechnen, dass auch Großserienfahrzeuge mit Brennstoffzellentechnik auf dem Markt verfügbar sind.

Gestützt auf die starke Position des Mutterkonzerns VW in der gesamten Batterielieferkette fokussiert sich Traton hingegen ausschließlich auf batterieelektrische Antriebe. Diese Lieferkette wurde mit Blick auf die VW-Pkw-Sparte aufgebaut und bietet jetzt Synergien für die Lkw-Fertigung (T&E, 2023).

Europäische Hersteller müssen sich an regionale regulatorische Vorgaben anpassen und werden in der EU dazu gezwungen sein, ab 2030 einen höheren Anteil emissionsfreier Lkw zu verkaufen. Unter Beibehaltung der regulatorischen Vorgaben gehen Prognosen davon aus, dass bis 2030 mindestens 31 Prozent und bis 2040 über 77 Prozent der neu verkauften Lkw und Busse in Europa emissionsfrei sein werden (T&E, 2024). Verstöße gegen diese Vorgaben führen zu erheblichen Strafzahlungen, die auch etablierte Unternehmen existenzbedrohend treffen könnten (Mullholland, 2024).

Der Markt für schwere Lkw als Experimentierfeld für alternative Antriebe

Der Markt für schwere Lkw ist aktuell ein Experimentierfeld für alternative Antriebs-technologien. Unternehmen können insbesondere mit der Batterie- und Brennstoffzellentechnik anwendungsbezogene Erfahrungen sammeln. Batterieelektrische Fahrzeuge verfügen aufgrund ihres höheren Technology Readiness Levels (TRL) über einen Vorteil und werden von allen bedeutenden Herstellern in der Großserie eingesetzt. Es bleibt abzuwarten, ob serienreife Brennstoffzellenfahrzeuge ihre potenziellen Vorteile ausspielen können oder ob die Weiterentwicklung der Batterieelektrik die Brennstoffzellen-Lkw auf Nischenanwendungen beschränken wird.

In den internationalen Märkten mit langen Transportdistanzen und angesichts der Pläne vieler Lkw-Hersteller, Brennstoffzellenfahrzeuge in Großserie anzubieten, wird für den mittelfristigen Zeithorizont (2030/2035) eine Koexistenz beider Antriebssysteme erwartet. Neue Regulierungen in der EU und den USA erfordern künftig einen hohen Anteil von CO₂-neutralen Lkw. Die Umsetzung der AFIR-Richtlinie in der EU soll bis 2030 ein grundlegendes Netz an Tank- und Ladeinfrastruktur schaffen.

Bereits das derzeitige Angebot bietet Nutzern dieselbetriebener Lkw die Möglichkeit, alternative Antriebe auf ihre Eignung für spezifische Einsatzzwecke zu testen. Kurze Erneuerungszyklen der Lkw im Schwerlastverkehr – circa vier Jahre (KBA, 2022) – erleichtern diese Tests. Umrüstkits für beide Technologien ermöglichen es auch, Bestandsfahrzeuge emissionsfrei zu machen.

Insgesamt schafft ein Zusammenspiel aus Regulierungen, Infrastrukturentwicklung und marktorientierten Systemen, wie Pay-per-Use-Modelle, ein Umfeld, in dem beide Antriebstechnologien erprobt und genutzt werden können.

5. Politische Handlungsempfehlungen

Handlungsempfehlung 1: hohe Umsetzungs-kompetenz in marktlichen Lösungen unterstützen

Die rapide, sowohl staatlich als auch marktlich getriebene Entwicklung der Batterietechnik in den letzten Jahren einerseits und das Entstehen privatwirtschaftlicher Kooperationen, bestehend aus Brennstoffzellen-Lkw und entsprechender Tankinfrastruktur andererseits, waren so nicht vorhersehbar. Dies zeigt das starke Interesse und die hohe Umsetzungs-kompetenz des privaten Sektors für marktliche Lösungen zur angestrebten Dekarbonisierung des Schwerlastverkehrs. Beide Entwicklungen können als Erfolg der begleitenden staatlichen Förderprogramme gesehen werden; diese sollten entsprechend weitergeführt werden.

Handlungsempfehlung 2: Markt als technologieneutrales Experimentierfeld nutzen

Der bisherigen Förderung schwerer Nutzfahrzeuge und der dazugehörigen Infrastruktur in Deutschland lag wesentlich das Prinzip der Technologie-neutralität zugrunde. Auch die entsprechenden Regulierungen auf europäischer Ebene, etwa zu Flottengrenzwerten, folgten diesem ordnungspolitischen Grundsatz. Bei der Begrenztheit von Haushaltsmitteln stellt sich jedoch die Frage, ab welchem Technologielevel und unter welchen Bedingungen eine Konzentration knapper staatlicher Mittel auf die aussichtsreichste Technologie zielführender wäre. Für derartige staatliche Entscheidungen kann der Markt als Experimentierfeld aufzeigen, wie künftige Förderregimes ausgestaltet werden sollten.

Handlungsempfehlung 3: Infrastruktur-förderung beschränken

Der vom Staat zu verantwortende Aufbau eines flächendeckenden Grundnetzes an Betankungs- und Ladeinfrastruktur für beide Technologien ist mit der AFIR-Verordnung festgeschrieben. Während das Ladenetz für schwere Lkw bereits 2025 in Betrieb gehen soll, ist das entsprechende Wasserstoff-Tankstellennetz erst für das Jahr 2030 geplant. Diese zeitliche Reihenfolge reflektiert die aktuellen Unterschiede in der Marktreife beider

Antriebstechniken. Deshalb wird empfohlen, zunächst auf weit über das AFIR-Niveau hinausgehende Förderungen von Infrastruktur für alternative Lkw-Antriebe zu verzichten. Insbesondere der Brennstoffzellenantrieb benötigt in der Markthochlaufphase nur wenige Tankstellen in weiten Abständen und muss seine Eignung für den wirtschaftlichen Betrieb im kostengetriebenen Güterverkehr erst noch unter Beweis stellen. Falls sich zu einem späteren Zeitpunkt ein höherer Bedarf an Wasserstoff-Infrastruktur zeigt, kann die Notwendigkeit der staatlichen Förderung erneut geprüft werden.

Handlungsempfehlung 4: langfristig orientierten, verlässlichen Rahmen der Investitionspolitik sicherstellen

Hohe Unsicherheit besteht aktuell noch hinsichtlich der künftigen Energiepreise für Wasserstoff. Diese bestimmen zwar den möglichen wirtschaftlichen Erfolg der jeweiligen Technologie im Schwerlastverkehr der Straße maßgeblich mit, sie unterliegen aber nur bedingt staatlichem Einfluss. Für niedrige Energiepreise ist einerseits der weitere Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sowie der entsprechende Umbau der Stromnetze entscheidend; andererseits hängt die Wettbewerbsfähigkeit der Brennstoffzellentechnologie von der Umsetzung der staatlichen Pläne für eine künftige grüne Wasserstoffwirtschaft mit günstigen Wasserstoff-Preisen ab. Hier erzeugt eine langfristig orientierte, verlässliche Investitionspolitik des Staates Planungssicherheit für Privatunternehmen, die hohe Investitionskosten zu tragen haben. Das gleiche gilt für mittelfristig ausgerichtete Forschungs- und Förderprogrammen zu alternativen Lkw-Antrieben:

Zugesicherte Förderprogramme sollten planmäßig durchgeführt werden. Die Entscheidung über den Erfolg von Brennstoffzellen- und batterieelektrischen Antrieben im Schwerlastverkehr treffen aber diejenigen, die die wirtschaftlichen Konsequenzen ihres Handelns tragen müssen: die Anbieter und Nachfrager auf dem Markt für schwere emissionsfreie Lkw.

Literaturverzeichnis

Allgemeine Deutsche Automobil-Club e.V. ADAC (2024): Feststoffbatterie: Ist das die Zukunft im Elektroauto? <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/feststoffbatterie/>

Affeld, D. (2024): Interview von electrive.net mit Dennis Affeld, Vorsitzender der Geschäftsführung MAN Truck & Bus Deutschland vom 19.03.2024. <https://www.electrive.net/2024/03/20/emobility-in-sights-5-wie-kommt-der-e-lkw-ohne-foerderung-auf-die-strasse/>

Basma, D., Rodríguez F. (2022): The role of hydrogen in decarbonizing the heavy-duty vehicle sector in Europe. https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/09/Webinar_FCET_TCO.pdf

Bundesamt für Logistik und Mobilität BALM (2023): Förderprogramm Klimaschonende Nutzfahrzeuge und Infrastruktur (KsNI). 2. Förderaufruf. https://www.balm.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Foerderprogramme/KsNI/2_Foerderaufruf/KsNI_FAQ_Foedergegenstand_KsN.html;jsessionid=5DDB64B02A1F9307D1C3A15F4203B2BD.live11313?nn=3688112

Bundesministerin der Justiz und für Verbraucherschutz BMJV (2024): Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 235). https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR_251310019.html

Bundesregierung (2022): Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur-2.pdf?blob=publicationFile>

Daimler Truck (2021): Daimler Truck AG and the Volvo Group complete creation of fuel-cell joint venture: cellcentric. <https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/daimler-truck-ag-and-the-volvo-group-complete-creation-of-fuel-cell-joint-venture-cellcentric-49138301>

Designwerk Technologies AG (2024): HIGH CAB Der E-LKW für weite Strecken. <https://www.designwerk.com/elektro-lkw-high-cab/>

e-mobil BW (Hrsg.) (2023): Strukturstudie BW 2023. Transformation der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie in Baden-Württemberg durch Elektrifizierung, Digitalisierung und Automatisierung. Stuttgart. https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobil_BW_Structurstudie_BW_2023.pdf

Europäische Gemeinschaft EG (2006): Verordnung (EG) Nr. 561/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. März 2006 zur Harmonisierung bestimmter Sozialvorschriften im Straßenverkehr und zur Änderung der Verordnungen (EWG) Nr. 3821/85 und (EG) Nr. 2135/98 des Rates sowie zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 3820/85 des Rates. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R0561>

Europäische Union EU (2023): Verordnung (EU) 2023/1804 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. September 2023 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1804>

Europäische Union EU (2024): Verordnung (EU) 2024/1610 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Mai 2024 zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1242 im Hinblick auf die Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und die Einbeziehung von Meldepflichten, zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/858 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) 2018/956. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1610>

European Automobile Manufacturers' Association ACEA (2023): Fact Sheet Trucks. https://www.acea.auto/files/ACEA_truck_fact_sheet.pdf

Federal Motor Carrier Safety Administration FMCSA (2024): Summary of Hours of Service Regulations. <https://www.fmcsa.dot.gov/regulations/hours-service/summary-hours-service-regulations>

Federal Reserve Bank of St. Louis St. Louis Fed (2024): Motor Vehicle Retail Sales: Heavy Weight Trucks. <https://fred.stlouisfed.org/series/HTRUCKSNSA>

Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e. V. HGF (Hrsg.) (2021): Batterie vs. Brennstoffzelle „Das Thema ist hochpolitisch!“ Interview mit Martin Winter, Gründungsdirektor des Helmholtz-Instituts Münster für Ionenleiter in der Energiespeicherung am Forschungszentrum Jülich, und Thomas Klassen, Leiter des Instituts für Wasserstofftechnologie am Helmholtz-Zentrum Hereon in Geesthacht. <https://www.helmholtz.de/newsroom/artikel/das-thema-ist-hochpolitisch>

Hoffmann, J. (2024): 330.000 km elektrisch – im Jahr. <https://www.eurotransport.de/artikel/trans-partner-logistics-330-000-kilometer-mit-dem-lkw-elektrisch-im-jahr-unterwegs-11237772.html>

International Council on Clean Transportation ICCT (2024): European Heavy-Duty Vehicle Market Development Quarterly (January–December 2023). https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/03/ID-125-%E2%80%93-EU-R2Z-2023_final-1.pdf

Kraftfahrt-Bundesamt KBA (2022): Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter 1. Januar 2022. https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ15/fz15_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=5

McKinsey & Company (2018): Route 2030 – A Regional View of Truck Industry Profit Pools. <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/a%20regional%20view%20of%20truck%20industry%20profit%20pools/a-regional-view-of-truck-industry-profit-pools-web-final.pdf>

Mullholland, E. (2024): The revised CO2 standards for heavy-duty vehicles in the European Union. ICCT Policy Update. https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/05/ID-130-%E2%80%93-EU-CO2_policy_update_final.pdf

Schaal, S. (2024): Daimler Truck und Linde zeigen Tanklösung für Flüssigwasserstoff. <https://www.electrive.net/2024/02/07/daimler-truck-und-linde-zeigen-tankloesung-fuer-fluessigwasserstoff/>

Schmaltz, T. (2023): Feststoffbatterien: Potenziale und Herausforderungen auf dem Weg zum Massenmarkt. <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/feststoffbatterien-markt-potenziale-herausforderungen-materialien-komponenten-zellkonzepte.html>

Statistisches Bundesamt Destatis (2022): Straßenverkehr: EU-weite CO2-Emissionen seit 1990 um 24 % gestiegen. https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/CO2_Strassenverkehr.html

Strom-Report (2024): Strompreis Gewerbe. <https://strom-report.com/strompreis-gewerbe/>

Transport & Environment T&E (2023): Ready or Not Who are the frontrunners in the global race to clean up trucks and gain technology leadership? https://www.transportenvironment.org/uploads/files/202306_truckmakers_ZE_readiness_report-1.pdf

Transport & Environment T&E (2024): Europaabgeordnete bestätigen Klimaziele für schwere Nutzfahrzeuge. <https://www.transportenvironment.org/te-deutschland/articles/europaabgeordnete-bestatigen-klimaziele-fur-schwere-nutzfahrzeuge>

United States Environmental Protection Agency EPA (2024): Final Rule: Greenhouse Gas Emissions Standards for Heavy-Duty Vehicles – Phase 3. <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/final-rule-greenhouse-gas-emissions-standards-heavy-duty>

Verein Deutscher Ingenieure e.V. VDI / Verband der Automobilindustrie VDA (Hrsg.) (2022): Klimafreundliche Nutzfahrzeuge Vergleich unterschiedlicher Technologiepfade für CO₂-neutrale und -freie Antriebe. <https://www.vde.com/resource/blob/2104630/a53ea8b32612ce3f303406b795395d5a/klimafreundliche-nutzfahrzeuge-download-data.pdf>

Voith (2024): Plug & Drive H₂ Storage System. <https://voith.com/corp-de/hydrogen-storage/wasserstoffspeicher-system.html>

Werwitzke, C. (2024): Megawattladen: MAN eTruck zieht sich 700 kW an MCS-Prototypgerät von ABB. <https://www.electrive.net/2024/03/22/megawattladen-man-etruck-zieht-sich-700-kw-an-mcs-prototypgeraet-von-abb/>

Das DLR im Überblick

Das DLR ist das deutsche Forschungs- und Technologiezentrum für Luft- und Raumfahrt. In seinen Kerngebieten entwickelt das DLR Technologien für Luft- und Raumfahrt, Energie und Verkehr, sowie Sicherheits- und Verteidigungsforschung. Ein breites Spektrum an Ergebnissen und Innovationen bringen Nutzen für Industrie und Wirtschaft, Behörden und Verwaltung sowie für öffentliche Stakeholder. Durch einen intensiven Wissensaustausch und gezielten Technologietransfer stellt sich das DLR seiner Verantwortung gegenüber der Gesellschaft. Dazu wird es mit Mitteln des Bundes gefördert. Die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR ist im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zwei DLR Projektträger arbeiten als Managementeinrichtungen für Forschungs- und Industrieförderung.

Global wandeln sich Klima, Mobilität und Technologie. Das DLR nutzt das Know-how seiner 51 Institute und Einrichtungen, um Lösungen für die daraus resultierenden Herausforderungen zu entwickeln. Unsere 11.000 Mitarbeitenden haben eine gemeinsame Mission: Wir erforschen Erde und Weltall. Wir entwickeln Technologien für eine nachhaltige Zukunft und tragen durch den Technologietransfer dazu bei, den Wissens- und Wirtschaftsstandort Deutschland zu stärken.

Impressum

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
Institut für Verkehrsforschung
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin
www.dlr.de/vf

Autoren:

Martin Winter
Klaus Jäkel
Gunnar Knitschky

Institut für Verkehrsforschung
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin

Stand: Dezember 2024
Veröffentlicht: 2025

DLR.de

Bilder DLR (CC-BY 3.0),
sofern nicht anders angegeben

<https://elib.dlr.de/215862/>



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt