

White Paper der ITS mobility - Arbeitsgruppe



Technische
Universität
Braunschweig

Ostfalia
Hochschule für angewandte
Wissenschaften



ACOD
AUTOMOTIVE CLUSTER
OSTDEUTSCHLAND

Die Zukunft der Nutzfahrzeuge

D. BACKOFEN, M. GAPINSKI, J. HÜLSMEYER, W.-R. LANDSCHOOF, J. SEEBODE, J. KATZEK



Leitfaden Kartellrecht für die Vereinsarbeit bei ITS mobility

Die vorliegende Publikation ist im Rahmen der Arbeitsgruppe „Wasserstoff als regenerativer Kraftstoff in Nutzfahrzeugen (AG H2NFZ)“ auf Initiative des Mobilitätsnetzwerks ITS mobility e. V. ausgearbeitet worden. ITS mobility und seine Mitglieder verpflichten sich klar zu rechtmäßigem Handeln im Sinne des deutschen und EU-Kartellrechts. Die Entwicklung des vorliegenden Dokuments sowie alle hierzu abgehaltenen, physischen und virtuellen Sitzungen erfolgten in Einklang mit den von ITS mobility ausgewiesenen Regeln für kartellrechtlich unbedenkliches Handeln. Die entsprechende Handreichung für die Vereinsarbeit und die detaillierten Bestimmungen können unter <https://its-mobility.de/leitfaden-kartellrecht/> eingesehen werden.

Kurzbeschreibung

Dieses White Paper wurde im Rahmen einer von ITS Mobility initiierten Facharbeitsgruppe zum Thema „Zukunft der Nutzfahrzeuge“ erarbeitet. Unter der fachlichen Leitung von Herrn Dr. Wolf-Rüdiger Landschoof vom VDI Arbeitskreis Fahrzeugtechnik im Braunschweiger Bezirksverein des VDI hat sich die Gruppe interdisziplinär mit den technologischen, infrastrukturellen und politischen Herausforderungen der Dekarbonisierung im Nutzfahrzeugsektor auseinandergesetzt. Die vorliegende Ausarbeitung zeichnet sich durch eine Darstellung des Status quo, darauf aufbauende Szenarioanalysen und einen technologieoffenen Blick auf mögliche Transformationspfade aus. Besonderes Augenmerk gilt dem Potenzial von Wasserstoffantrieben als Baustein klimaneutraler Mobilitätsstrategien.

Das Paper versteht sich als Impulsgeber für Industrie, Gebietskörperschaften, Politik und Verbände, die gemeinsam vor der Aufgabe stehen, realistische und zugleich ambitionierte Wege in Richtung Klimaneutralität zu gestalten.

Dr. Gerrit Schrödel, Geschäftsführer ITS mobility e.V.

1. Das Jahrhundertprojekt: Weltweite Klimaneutralität

Zusammenfassung:

Klimaziele sind richtig und müssen erreicht werden. Die Herausforderung ist, den richtigen Weg und die optimale zeitliche Entwicklung herauszufinden.

Die globalen Klimaveränderungen beschäftigen alle Nationen. Auf Klimakonferenzen werden Auswirkungen und Gegenmaßnahmen diskutiert. Es gibt inzwischen einen weltweiten Konsens, die Dekarbonisierung voranzutreiben. Die meisten Industrienationen einschließlich Europa und USA streben eine Klimaneutralität für 2050 an, wobei nicht alle Nationen politisch aktiv Klimaziele verfolgen. Deutschland möchte diese 2045 erreichen.

ZIELE DER ANGESTREBTEN KLIMANEUTRALITÄT

- **INDIEN: 2070**
- **CHINA, RUSSLAND: 2060**
- **EUROPA, USA, WEITERE INDUSTRIENATIONEN: 2050**
- **DEUTSCHLAND: 2045**

Die Auswirkungen des Klimawandels sind lokal recht andersartig. Die Ursachen jedoch sind die Summe der globalen Einflüsse. Dabei muss bedacht werden, dass eine Verhinderung eines CO₂-Eintrags in die Atmosphäre nur einen positiven Einfluss hat, wenn nicht an anderer Stelle in der Welt der Eintrag um die gleiche Menge erhöht wird

Daraus entwickelt sich ein Auftrag an die Wirtschaft, kohlenstoffarme Technologien global einzusetzen. Dies wird durch gesetzliche Vorgaben gestützt. Das betrifft alle Sektoren und damit auch die Nutzfahrzeuge. Der Verkehrssektor insgesamt verfehlt in Deutschland die Ziele deutlich (2023: um 13 Mio. t CO₂, SOLL: 133; IST:146, vgl. Deutscher Wasserstoff-Verband, 2024). Früher basierten alle Antriebsstränge der Nutzfahrzeuge auf Verbrennungsmotoren.

Heute werden verschiedene Technologien entwickelt und erprobt. Das ist für die Hersteller eine enorme wirtschaftliche Herausforderung. Durch regional verschiedene Randbedingungen sind große Verwerfungen in den Märkten möglich. Sowohl Produzenten als auch Fahrzeugbetreiber können gegenüber Wettbewerbern in Nachteil geraten, im schlimmsten Fall aus dem Markt ausscheiden.

Zukünftig werden als Energieträger sowohl Strom als auch Wasserstoff in direkter oder gewandelter Form zum Einsatz kommen. In dieser Ausarbeitung werden Stand der Technik und strukturelle Herausforderungen aufgezeigt sowie Maßnahmen und zeitliche Aspekte der Umsetzung dargestellt, wie Nutzfahrzeuge in Zukunft klimaneutral betrieben werden können. Insbesondere soll der Einsatz von Wasserstoff beleuchtet werden.

2. Rückgrat der Wirtschaft: Nutzfahrzeuge

Zusammenfassung:

Hersteller und Endkunden müssen mit den Fahrzeugen Geld verdienen können. Die Anwendung entscheidet über den richtigen Antrieb.

Nutzfahrzeuge bringen einen Nutzen

Auf unseren Straßen fahren neben Pkw viele kleine und große Lkw. Während der Personenverkehr die Menschen zum Arbeitsplatz bringt, den Einkauf oder den Besuch von Freunden und Familienmitgliedern oder Freizeiteinrichtungen ermöglicht, werden mit dem Lkw Güter transportiert. Der Name Nutzfahrzeuge beschreibt die Funktion gut: Der Gesellschaft und damit den Menschen einen Nutzen bringen. Fabriken werden mit Material versorgt, fertige Produkte werden abtransportiert.

Der Handel der Güter läuft überwiegend über die Straße, auch wenn Bahn und Schifffahrt in einigen Fällen zwischen geschaltet werden. Die Handelswaren werden im Fernverkehr über große Strecken in Deutschland und ganz Europa transportiert. Im Verteilerverkehr gelangen sie zu den Geschäften oder zum Endkunden. Dabei werden die Waren mehrfach umgeladen und zwischengelagert.



Es gibt daneben Spezialanwendungen der Nutzfahrzeuge wie Feuerwehr, Abfallentsorgung und ähnliches.

Allen Nutzfahrzeugen (Nfz) ist gemeinsam, dass sie Nutzlasten transportieren, die für unser heutiges Leben unersetzlich sind. Man kann den Güterverkehr optimieren, entfallen kann er nicht. Neue Regelungen für den Nutzfahrzeugverkehr, die eine deutliche Einschränkung bedeuten, senken die Wirtschaftsleistung und die Versorgung unserer Bevölkerung.

Nutzfahrzeug ist nicht gleich Nutzfahrzeug

Die Anforderungen an die Fahrzeuge sind sehr unterschiedlich. Darum werden von den Nfz-Herstellern sehr unterschiedliche Fahrzeuge angeboten. Die Antriebstechnologien müssen die Anforderung eines zukünftig klimaneutralen Transportes erfüllen.

Die Anforderungen an die Nutzfahrzeuge sind:

- ✓ Klimaneutralität im Betrieb
- ✓ Hohe Nutzlast
- ✓ Hohes Nutzvolumen
- ✓ Große Reichweite
- ✓ Routenflexibilität
- ✓ Zulässige Maße und Gewichte
- ✓ Niedrige Investitionskosten
- ✓ Niedrige Betriebskosten



Die Nutzlast eines Fahrzeugs ist das zulässige Gesamtgewicht (zGG) abzüglich des Leergewichts. Das Kraftfahrbundesamt KBA teilt in 3 Klassen ein:

N1 bis 3,5 Tonnen, N2 3,5 – 12 Tonnen, N3 12 – 40 Tonnen

Für manche Transportanwendungen ist nicht das Nutzgewicht entscheidend, sondern vielmehr das nutzbare Volumen.

Dies ist z.B. im Verteilerverkehr zum privaten Haushalt (Liefer- und Paketdienste) der Fall.

Bezüglich der gefahrenen Strecken liefert der Bundesverband Güterverkehr Logistik und Entsorgung eine Einteilung in Nahverkehr, Regionalverkehr und Fernverkehr. Die zugeordneten Strecken der Tabelle 1 verdeutlichen, dass die Reichweite eines Fahrzeugs eine Rolle spielt. Bei geringen täglichen Fahrleistungen ist eine Betankung im betriebseigenen Depot möglich.

Große Fahrstrecken erfordern in der Regel eine Betankung bei einem Energieversorger. Die Netzdichte muss auf die Antriebstechnologie abgestimmt sein. Große Reichweiten eines Fahrzeugs erhöhen die Flexibilität im Einsatz. Routenänderungen, Fahrten in Länder bzw. Gegenden mit geringer Netzdichte werden leichter.



Tabelle 1 - Aufteilung des Nutzfahrzeugverkehrs nach Reichweite

	Nahverkehr	Regionalverkehr	Fernverkehr
Einsatzgebiet	< 50 km urbaner und ländlicher Logistikverkehr	50 – 150 km regionale Güterverteilung	> 150 km Fernstrecken, Punkt-zu-Punkt-Verkehre
Mittlere Tagesfahrleistung	150 km	300 km	500 km
Jahresfahrleistung	30.000 – 50.000 km	50.000 – 80.000 km	> 80.000 km

Nach: Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung BGL, 2020

Da neue Antriebstechnologien die Fahrzeuggewichte und deren Verteilung im Fahrzeug beeinflussen, hat die erlaubte Achslast eine Bedeutung.

Der Anwendungsfall beeinflusst maßgeblich das Antriebskonzept

Klimaneutrale Antriebskonzepte werden sich immer an den Gesamtkosten (Total Cost of Ownership) des heutigen Standardantriebs mit Dieselmotor messen müssen. Der Betreiber des Nutzfahrzeuges muss seine Kostenerhöhungen an den Kunden weitergeben oder das Betreiben der Fahrzeuge einstellen.

Die Kosten für den Betreiber setzen sich aus Investitionen und Betriebskosten zusammen. Die Investitionen sind einerseits die Fahrzeuge selbst, die nach derzeitigem Stand deutlich teurer werden, und andererseits Investitionen in die Infrastruktur, also in die Herstellungsanlagen, die Lagerung und die Verteilung der erforderlichen neuen Energieträger. Die Infrastrukturkosten können teilweise beim Betreiber anfallen. Die nicht von ihnen übernommenen Kosten müssen Hersteller oder Handel der neuen Energieträger leisten.

Die Änderungen der Betriebskosten beim Wechsel vom Dieselantrieb zu einer Alternative sind in erster Linie die Kosten des Energieträgers. Wartungskosten, Steuern und Straßengebühren können sich ebenfalls ändern.

Die Vielfalt der Anforderungen lässt den Schluss zu, dass es nicht eine einzige Antriebstechnologien in der nahen Zukunft geben wird, die die Klimaneutralität unterstützt. Vielmehr wird es mit fortschreitendem Aufbau der Infrastruktur, Verbesserung der Technologien und mit Kostensenkungen unterschiedliche Lösungen geben.

Vielleicht werden auch Zwischenlösungen nötig werden. Die Bevorzugung eines bestimmten Antriebs kann zu volkswirtschaftlichen Kosten führen.

3. Öffentlicher Druck: Gesetzliche Anforderungen

Zusammenfassung:

Die EU verfolgt eine ambitionierte Dekarbonisierungsstrategie für Nutzfahrzeuge, die eine deutliche und zügige Senkung der CO₂-Emissionen fordert. Während strenge CO₂-Emissionsziele, eine CO₂-Bepreisung und infrastrukturelle Maßnahmen emissionsfreie Antriebe fördern sollen, bleibt die Herausforderung bestehen, faire Wettbewerbsbedingungen zu schaffen und den Ausbau der notwendigen Infrastruktur zu beschleunigen. Gleichzeitig gibt es anhaltende Diskussionen über die Technologieoffenheit in der Gesetzgebung.

Strenge Vorgaben für CO₂-Emissionen von Neufahrzeugen ab 2030

Die europäische Gesetzgebung setzt strenge Rahmenbedingungen, um die CO₂-Emissionen im Transportsektor deutlich zu senken. Die gesetzliche Basis bildet die EU-Verordnung 2019/1242, die regelmäßigen Anpassungen unterliegt. So müssen Hersteller sicherstellen, dass ihre Fahrzeugflotten zunehmend emissionsärmer werden. Die neuesten Vorgaben sehen eine Reduktion der durchschnittlichen CO₂-Emissionen neuer Nutzfahrzeuge ab 3,5 t um 15 % ab 2025, um 45 % ab 2030, um 65 % ab 2035 und um 90 % ab 2040 vor.

Besonders streng ist die Vorgabe für den öffentlichen Nahverkehr: Ab 2030 müssen 100 % der neu zugelassenen Stadtbusse emissionsfrei sein. Zudem werden künftig auch Anhänger und Auflieger CO₂-Vorgaben unterliegen.



Schwer kalkulierbare Kosten für CO₂-Emissionen der bestehenden Fahrzeuge

Neben direkten Emissionszielen setzt die EU verstärkt auf CO₂-Bepreisung und Mautregelungen, um emissionsfreie Nutzfahrzeuge attraktiver zu machen. Ab 2027 wird der Straßenverkehr in das separate Emissionshandelssystem ETS II integriert, wodurch fossile Kraftstoffe teurer werden. Experten gehen davon aus, dass der Dieselpreis dadurch jährlich um bis zu 0,20 € pro Liter steigen wird, was zusätzliche Kosten von etwa 15.000 € pro Diesel-Lkw bis 2030 bedeutet. Parallel dazu verpflichtet die überarbeitete Eurovignette-Richtlinie die Mitgliedstaaten, eine CO₂-abhängige Maut einzuführen oder bestehende Systeme anzupassen. Emissionsfreie Lkw sollen hierbei durch reduzierte oder vollständig erlassene Mautgebühren bevorzugt werden. Bis 2040 soll die Verteuerung von Diesel-Lkw soweit fortgeschritten sein, dass alternative Antriebe oder alternative Kraftstoffe wirtschaftlich klar im Vorteil sind.



EU-Vorgaben für die Infrastruktur

Die Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR), die seit 2024 in Kraft ist, gibt vor, dass entlang der großen europäischen Verkehrsachsen alle 60 km eine Lkw-taugliche Schnellladestation mit mindestens 350 kW Ladeleistung bereitstehen muss. Bis 2030 sollen diese Stationen auf Megawatt-Charging-Systeme (MCS) erweitert werden.

Für wasserstoffbetriebene Lkw sieht die EU vor, dass bis 2030 entlang der Hauptverkehrsachsen alle 200 km eine Wasserstofftankstelle vorhanden sein muss. Diese Maßnahmen sollen sicherstellen, dass emissionsfreie Nutzfahrzeuge nicht durch mangelnde Infrastruktur ausgebremst werden. Sie stellen für die europäischen Staaten allerdings eine große Herausforderung dar.

Förderprogramm für CO₂-neutrale Nutzfahrzeuge

Um den Markthochlauf emissionsfreier Nutzfahrzeuge zu fördern, setzt die EU zusätzlich auf finanzielle Anreize und Förderprogramme. Dazu gehören das IPCEI Wasserstoff-Programm zur Förderung von Wasserstoffproduktion und Infrastruktur sowie EU-Förderprogramme wie die Connecting Europe Facility (CEF) und der Innovation Fund, die den Ausbau von Lade- und Wasserstofftankstellen finanziell unterstützen.

4. Unterschätzter Technikstand: Status Quo der verfügbaren Technologien

Zusammenfassung:

Mehrere Technologien für Nutzfahrzeuge sind verfügbar und könnten bei entsprechenden Marktbedingungen innerhalb von fünf Jahren in Großserie produziert werden.

Hat der Dieselmotor ausgedient?

Der Standardantrieb ist heutzutage der Dieselmotor. Die Technologie ist ausgereift. Der Kraftstoff besteht aus langkettigen fossilen Kohlenwasserstoffen, die in einem Verbrennungsprozess zu Wasser und Kohlendioxid (CO₂) umgewandelt werden. Dabei entstehen unweigerlich auch Stickoxide (NO_x) aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen und Rußpartikel (C) wegen unvollständiger Verbrennung. Für eine Klimaneutralität darf kein Kohlenstoff aus fossilen Energieträgern eingesetzt werden.

Stickoxide und Rußpartikel sind aus gesundheitlichen Gründen zu vermeiden. Gefordert werden Antriebstechnologien, die klimaneutral sind und möglichst auch keine anderen schädlichen Emissionen zur Folge haben.



Vier Alternativen zum Dieselmotor

1. Verbrennungsmotoren mit dieselkompatiblen Kraftstoffen

Kraftstoffe, die ähnlich aufgebaut sind wie Diesel, können ohne Änderungen oder mit leichten Änderungen an Dichtungen und Einspritzeinrichtungen eingesetzt werden. Die Freigabe der Hersteller ist nötig. Diese stellt zumindest bei neueren Fahrzeugen kein Problem dar. Im heutigen Dieseldieselkraftstoff sind gesetzlich vorgeschriebene 7% Biodiesel enthalten.

Mit HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) oder CVO (Cracked Vegetable Oil) stehen Kraftstoffe zur Verfügung, die aus Bio- oder Kunststoffabfällen gewonnen werden. Auch synthetische Kraftstoffe, die aus CO₂ und Wasser unter Einsatz von regenerativem Strom erzeugt werden, sogenannte Synfuels, sind möglich. Aufgrund der inneren Verbrennung der Kraftstoffe entstehen analog zum Dieselmotor weiterhin Ruß- und Stickoxidemissionen, die über Abgasnachbehandlungssysteme reduziert werden können.

Allerdings sind HVO, CVO und Synfuels noch teurer als fossile Brennstoffe und weisen komplexe Produktionsprozesse auf, die eine massentaugliche Produktion Zt. noch erschweren. Über steuerliche Anreize (Entfall der Energiesteuer, Senkung weiterer Steuern und CO₂-Bepreisung) wären diese Kraftstoffe heute wirtschaftlich für den Lkw-Betreiber.

Eine steigende CO₂-Bepreisung ist in der EU beschlossen. Jede Erhöhung der vorgeschriebenen Quote für regenerative Anteile über die schon heute gesetzlich vorgeschriebenen 7% Biodiesel hinaus würde die CO₂-Emissionen der Bestandsflotte senken. Ein großer Vorteil ist dabei, dass die Infrastruktur zur Verteilung des Kraftstoffes nicht geändert werden muss.

2. Verbrennungsmotoren für Gasbetrieb, insbesondere Wasserstoffbetrieb

Verbrennungsmotoren (in Fachkreisen auch als ICE – Internal Combustion Engine – bezeichnet) für Biogas, Biomethan oder Wasserstoff ähneln den Benzinmotoren. Der Wasserstofftank lässt sich ähnlich schnell wieder befüllen wie ein Dieseltank. Allerdings ist der Bauraumbedarf aufgrund der geringen Energiedichte der Gase deutlich größer. Der Antrieb emittiert kein klimaschädliches CO₂, jedoch können Stickoxide weiterhin ausgestoßen werden, die über eine Abgasnachbehandlung reduziert werden können.

Für den Methan- oder Wasserstoffbetrieb stehen auch für Nfz Aggregate von allen namhaften Herstellern zur Verfügung. Da es sich bei den Gasmotoren um klassische Hubkolbenmaschinen handelt, können diese Motoren auf den bestehenden Produktionslinien wie der Dieselmotor produziert werden, wodurch Investitionskosten eingespart werden können. Bei einer Marktnachfrage könnten sie zu einem ähnlichen Preis wie Dieselmotoren geliefert werden. Allerdings muss die Betankungs-Infrastruktur für diese Technologie weiter ausgebaut werden.

Reichweite H₂-Verbrenner



2030: 700 bis 900 km (vgl. NOW, 2024)

Verbrauch H₂-Verbr. (> 12 t)



2027: 8,5 kg/100 km = 2,80 kWh / km

2030: 8,0 kg/100 km = 2,64 kWh / km (vgl. NOW, 2024)

3. Batterieelektrische Antriebe

Batterieelektrische (BE) Pkw sind ab 2014 im Serieneinsatz mit stetig steigenden Stückzahlen am Markt. Die Technologie ist auf Nfz hochskalierbar. Nahezu jeder Lkw-Hersteller hat Elektrofahrzeuge (BE-Lkw) sowohl in den leichten Gewichtsklassen als auch zunehmend in den höheren Gewichtsklassen im Angebot oder zumindest die Einführung angekündigt. Die Batterien verteuern ein Fahrzeug erheblich. Im Gegensatz zu den nichtelektrischen Technologien reduziert das Gewicht der Batterien die Nutzlast abhängig von darstellbaren

Reichweite



2025: 250 bis 550 km Angabe
(vgl. NOW, 2024)

Verbrauch



2025: 95 bis 130 kWh/100 km (0,95
bis 1,3 kWh/km)

2030: 90 bis 100 kWh/100 km (0,9 bis
1,0 kWh/km) (vgl. NOW, 2024)

Reichweiten um bis zu 4 Tonnen. Die Infrastruktur für das Laden der Batterien ist für Nutzfahrzeuge nur für eine kleine Fahrzeuganzahl vorhanden und damit ein weiterer Kostenfaktor. Der bisherige Einsatz von Graphit, Kobalt, Nickel und Lithium stellt die Hersteller vor umwelttechnische, anteilig auch ethische Herausforderungen bei der Gewinnung und Aufbereitung dieser Materialien. Batteriehersteller arbeiten daher an weiteren, alternativen Batteriekonzepten.

4. Brennstoffzellenantriebe

Ein Brennstoffzellenantrieb (BZ) ist ein Elektrofahrzeug erweitert um einen Wasserstofftank und eine Brennstoffzelle, die Wasserstoff in Strom umwandelt. Damit ist das Antriebssystem komplexer als bei einem BEV-Lkw. Im Gegenzug kann die schwere Batterie kleiner ausgeführt werden. Daraus ergeben sich Gewichts- und Reichweitevorteile. Der Antrieb ist jedoch insgesamt teurer, allerdings können Kosten zukünftig über Skalierungseffekte deutlich reduziert werden. Außer Wasserdampf emittiert das Fahrzeug keine weiteren Emissionen. An der Technologie arbeiten alle großen Hersteller. Erste Kleinserien werden angeboten.

Ein BZ-Lkw lässt sich ähnlich schnell betanken wie ein herkömmlicher Diesel-Lkw. Eine Infrastruktur für Wasserstoff-Lkw ist bisher nur für eine geringe Fahrzeuganzahl ausgelegt.

Reichweite Nfz über 26 t



2025: 450 bis 1000 km
2030: 600 bis 1000 km (vgl.
NOW, 2024)

Verbrauch (> 12 t)



2027: 8 kg / 100 km

2030: 7 kg / 100 km (vgl.
NOW, 2024)

Verfügbarkeit und Preis des Energieträgers entscheiden maßgeblich über das Antriebskonzept

Unter Annahme eines heute gängigen Preises von 20 € / kg für Wasserstoff an, betragen die Kraftstoffkosten 1,60 € / km bei einem Verbrauch von 8 kg / 100 km. Ein elektrischer Lkw hat ungefähr halb so hohe Energiekosten, wenn 0,70 € / kWh als Preis und 1,1 kWh / km als Verbrauch angesetzt werden. Die Kosten des Stromes hängen stark an Art und Ort der Ladepunkte und können insbesondere durch Eigenproduktion (PV) noch deutlich reduziert werden. Aktuell kann von einem Vergleichswert für einen konventionellen Dieselantrieb von ca. 0,50 € / km ausgegangen werden.



Für einen Einsatz sehr CO₂-armer Antriebe ist nicht nur das Angebot der Hersteller entscheidend. Der Kraftstoff muss in ausreichender Menge dem Markt zur Verfügung stehen, die Infrastruktur zur Verteilung muss aufgebaut sein und der Preis des Kraftstoffs muss im Verhältnis zu anderen Kraftstoffen wettbewerbsfähig sein, wobei letztendlich die Gesamtkosten der Investitionen und der Betriebskosten entscheidend sind.

5. Knackpunkt der Energiewende: Infrastruktur für die Kraftstoffe

Zusammenfassung:

Der Ausbau des Stromnetzes und der Ladesäulen ist bis 2045 nicht ausreichend möglich. Das Wasserstofftankstellennetz muss vor allem in Europa stärker ausgebaut werden. Eine smarte Verteilung von nur wenigen Wasserstofftankstellen unter Berücksichtigung von sogenannten „Keimzellen“ reduziert den Aufwand und die Kosten der Verkehrswende im Nutzfahrzeubereich.

Ausreichender Ausbau des Stromnetzes bis 2045 nicht darstellbar

Um in Deutschland den Nutzfahrzeubereich großflächig klimaneutral darzustellen, bedarf es einen massiven Umbau der bisherigen Infrastruktur.

Für eine 500 km lange Tagesstrecke benötigt ein Lkw im Fernverkehr je nach Streckenprofil ca. 500-800 kWh elektrische Energie. Hochgerechnet auf den gesamten Lkw-Bestand in Deutschland bedeutet dies einen jährlichen Strombedarf von rund 250 TWh bis 2035 bzw. 500 TWh bis 2040. Der Hochlauf emissionsfreier Nutzfahrzeuge stellt daher hohe Anforderungen an die zukünftige Energieinfrastruktur. Der Bedarf an Strom wird in den kommenden Jahren exponentiell steigen, um die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs zu ermöglichen.

Die existierenden öffentlichen Ladepunkte sind primär für Pkw ausgelegt und verfügen nicht über die erforderliche Leistung für Lkw. Megawatt-Charging-Systeme (MCS), die Ladeleistungen von über 1 MW ermöglichen, befinden sich erst in der Pilotphase. Laut Daimler Truck (vgl. Gorbach, 2024) werden 35.000 Ladesäulen in Europa mit einer Ladeleistung von mindestens 400 kW Leistung bis 2030 benötigt. Aktuell existieren 122 solcher Ladesäulen an 54 Ladestandorten (vgl. NOW, 2025). Bis 2030 müssten demnach 450 Hochleistungsladepunkte pro Monat aufgebaut werden, inklusiver der jeweiligen Bereitstellung riesiger regenerativer Primärenergiemengen.

Im Süden Deutschlands wird erneuerbare Energie hauptsächlich durch Photovoltaik (PV) erzeugt, was zu Herausforderungen beim Laden von BE-Lkw führt, da diese meist nachts geladen werden. In Norddeutschland gibt es viele ganztägig produzierende Windkraftanlagen. Allerdings sind die Übertragungskapazitäten für die großen Mengen an erneuerbarem Strom offensichtlich nicht nur aktuell eine weitere Herausforderung.

Unabhängig von der Frage, ob innerhalb von zwei Jahrzehnten eine rein elektrische Transformation regulativ, planerisch, handwerklich und materialmäßig zu bewältigen ist, wird der Stromnetzausbau bis 2045 die deutsche Volkswirtschaft voraussichtlich mit über 650 Milliarden Euro belasten (vgl. Hans-Böckler-Stiftung, 2024).

Daher könnte die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger eine ergänzende Lösung - insbesondere für Lkw - darstellen. Analysen von TenneT und 50Hertz zeigen, dass Elektrolyseanlagen mit bis zu 100 MW in Zukunft das Stromnetz bei Angebotsüberschuss entlastend betrieben werden können (vgl. TenneT, 50Hertz, 2023).

Parallele Infrastruktur für Elektrizität und Wasserstoff möglich und nötig

Somit ist eine kurz- bis mittelfristige ganzheitliche Umsetzung einer ausschließlichen elektrischen Infrastruktur für den klimaneutralen Betrieb von Nutzfahrzeugen aus ökonomischer Sicht derzeit nur schwer vorstellbar. Eine zeitnahe, flächenübergreifende Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge (BE-Lkw) ist aus wirtschaftlicher Sicht nicht tragfähig.

Hierbei könnte ein paralleler Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur zum rein elektrischen Pfad aus unterschiedlichen Gründen helfen, eine klimaneutrale Infrastruktur für Nutzfahrzeuge mittelfristig aufzubauen.



Smarte Verteilung

In Deutschland existieren zurzeit 14.000 Tankstellen (vgl. ADAC, 2025), die hinsichtlich reiner Energieversorgung nicht in der Größenordnung benötigt werden. Im Hinblick auf den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur für den Schwerlastbereich stellt sich damit die Frage, in welcher Größenordnung diese realisiert werden muss. Das Fraunhofer ISI schlägt hierfür eine smarte und gleichmäßige Verteilung der Wasserstofftankstellen für Nutzfahrzeuge mit Hilfe einer Konzentration entlang der Transitrouten sowie in Industrieregionen vor. Eine Verteilung in Abhängigkeit der Anzahl der Brennstoffzellen-Lkw könnte demnach folgendermaßen aussehen (vgl. Rose, 2020):

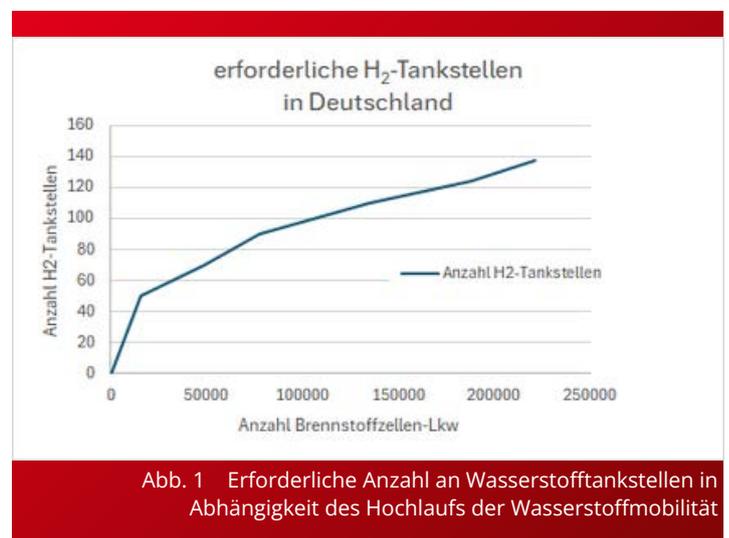


Abb. 1 Erforderliche Anzahl an Wasserstofftankstellen in Abhängigkeit des Hochlaufs der Wasserstoffmobilität

140 Tankstellen, in Deutschland geschickt verteilt, würden mittelfristig ausreichen, um den kompletten Bedarf von 250.000 schweren Nutzfahrzeuge mit Wasserstoff abzudecken. Der Ausbau der Tankstelleninfrastruktur sollte auch wirtschaftlich schwächer entwickelte Regionen erfassen. Förderprogramme sollten gezielt auch abseits der Hauptverkehrsachsen greifen. Der Blick auf Abb. 1 offenbart noch eine weitere Erkenntnis: Mit den derzeit 50 Wasserstofftankstellen für Nutzfahrzeuge in Deutschland, davon vier in Niedersachsen und Bremen, könnten theoretisch heute schon bis zu schon 15.000 BZ-Lkw (7% aller schweren Lkw) betankt werden, was für eine gute Wasserstoffinfrastruktur für Lkw in Deutschland spricht.

Europa muss etwas tun!

Eine Fahrt über die Alpen macht aber die Infrastrukturproblematik in anderen europäischen Ländern deutlich: In Italien existiert zurzeit nur eine Wasserstoff-Tankstelle. In weiteren europäischen Ländern sieht es ähnlich aus: Polen besitzt fünf Tankstellen, England nur eine und Spanien gar keine Tankstellen, die Wasserstoff anbieten. **Neben Deutschland existiert vor allem auf europäischer Ebene ein dringender Handlungs- und Förderbedarf für neue Wasserstofftankstellen!**

Wie auf europäischer Ebene ein smartes Wasserstoff-Tankstellennetz ab 2023 aussehen könnte, zeigt eine Studie der ACEA (Abb. 2, vgl. ACEA, 2021):

Einige dieser Tankstellen wären zu Beginn des Markthochlaufs unterausgelastet, und es stellt sich die Frage nach den Geschäftsmodellen. Dies könnte folgendermaßen umgangen werden:

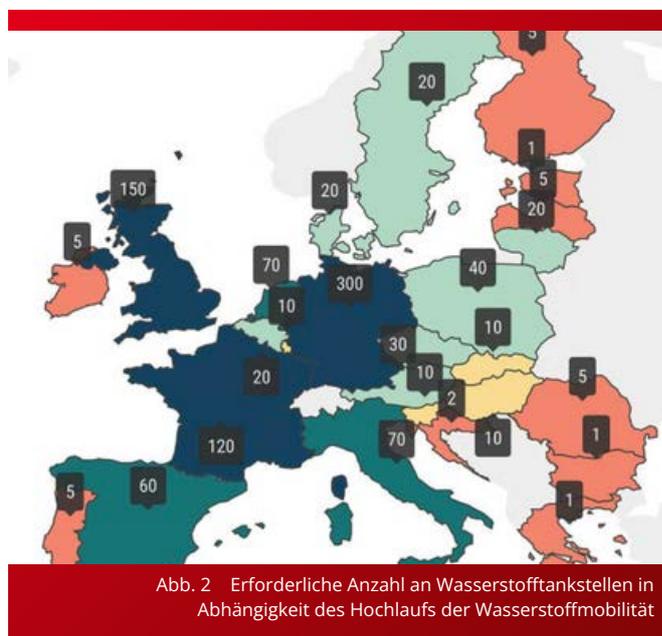


Abb. 2 Erforderliche Anzahl an Wasserstofftankstellen in Abhängigkeit des Hochlaufs der Wasserstoffmobilität

In Keimzellen denken!

Die Ladeszenarien für elektrisch-, gasförmig- bzw. flüssiggetriebene Nutzfahrzeuge reichen je nach Anwendung vom Laden bzw. Tanken auf eigenem Betriebsgelände über Umschlagpunkte bis hin zu Rastplätzen während der Lenkpause.

Für den Schwerlastverkehr wird ein großflächiges, zentrales Tankstellennetz in Deutschland und der EU vor allem an den Transitstrecken benötigt. Dies bedarf großer Vorhaltemengen für Wasserstoff: 15.000-30.000 kg H₂ / Tag sind laut Fraunhofer ISI (vgl. Rose, 2020) pro Wasserstofftankstelle bei 150-600 Nutzfahrzeuge / Tag nötig. Eine alleinige dezentrale Erzeugung von grünem Wasserstoff vor Ort erscheint in dieser Größenordnung als wirtschaftlich nicht sinnvoll.

Darüber hinaus sind der Vorratstank und die Kompressoren an den meisten Tankstellen noch sehr klein und verstärkt auf Pkw Betankung zugeschnitten. Eine mögliche Lösung könnte die großvolumige zentrale Erzeugung von grünem Wasserstoff sowie der Transport als flüssiger Wasserstoff an die Tankstellen sein. Demgegenüber steht ein hoher Energieaufwand für die Erzeugung des flüssigen Wasserstoffs, der jedoch kostengünstig auf Zeiten mit Stromüberschuss im Energiesystem fokussiert werden könnte.

Andere mobile Nutzfahrzeuganwendungen können jedoch kleinere, dezentrale Anlagen viel schneller ermöglichen. Gerade der ÖPNV, hier insbesondere Busse, aber auch die Stadtreinigung, Müllfahrzeuge sowie Zustelldienste unterliegen einem bestimmten Aktionsradius und haben eine lokale Anlaufstelle, z.B. das eigene Betriebsgelände. Hier lässt sich eine bestehende nachhaltige Energieerzeugung einfacher integrieren, z.B. über einen nahegelegenen Solar- bzw. Windpark oder eine Biogasanlage. Unternehmen, die auf ihrem Gelände eigene Wasserstofftankstellen errichten, sollten gezielt unterstützt werden – etwa durch vereinfachte Genehmigungen und Förderprogramme. Genau diese Anwendungen mit einer dezentralen Erzeugung von Wasserstoff könnten eine **Keimzelle für den großflächigen Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur** sein.

Diese beiden Szenarien, also ein Bottom-Up- und der Top-down-Ansatz könnten sich langfristig sogar sinnvoll ergänzen: Das deutschlandweite Netz für den Schwerlastverkehr würde um die Infrastruktur von dezentralen Anlagen erweitert, womit langfristig auch eine flexiblere Anpassung, falls der Bedarf nach Wasserstoffnutzfahrzeugen doch stärker als vermutet steigen sollte, möglich ist. Eine Voraussetzung für dieses Szenario ist die Planung der dezentralen Anlagen in der Nähe der Transitstrecken von Schwerlast-Lkw.

Unabhängig von einem dezentralen großflächigen Netz oder einer zentralen Anlagenstruktur stellt sich die Frage nach den Kosten für die Darstellung einer Wasserstoffinfrastruktur.



H₂-Tankstellennetz ist langfristig günstiger

Der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur mit bis zu 140 Tankstellen kann Kosten von jährlich 9 Mrd. EUR (Tankstelleninvestitionen plus Wasserstofferzeugungskosten) verursachen. Durch eine smarte Steuerung der dezentralen Elektrolyseanlagen könnten lastabhängig Kosten von ca. 1 Mrd. EUR eingespart werden (vgl. Rose, 2020).

Im Vergleich zu einer Ladeinfrastruktur für den elektrischen Antrieb, der zu geringeren Initialkosten führt, können zukünftig laut Daimler Truck durch Skaleneffekte und den geringeren Flächenbedarf beim Wasserstofftanken die Kosten für die Wasserstoffinfrastruktur stärker sinken als für batteriebetriebene Lkw (Abb. 3, vgl. Gorbach, 2024):

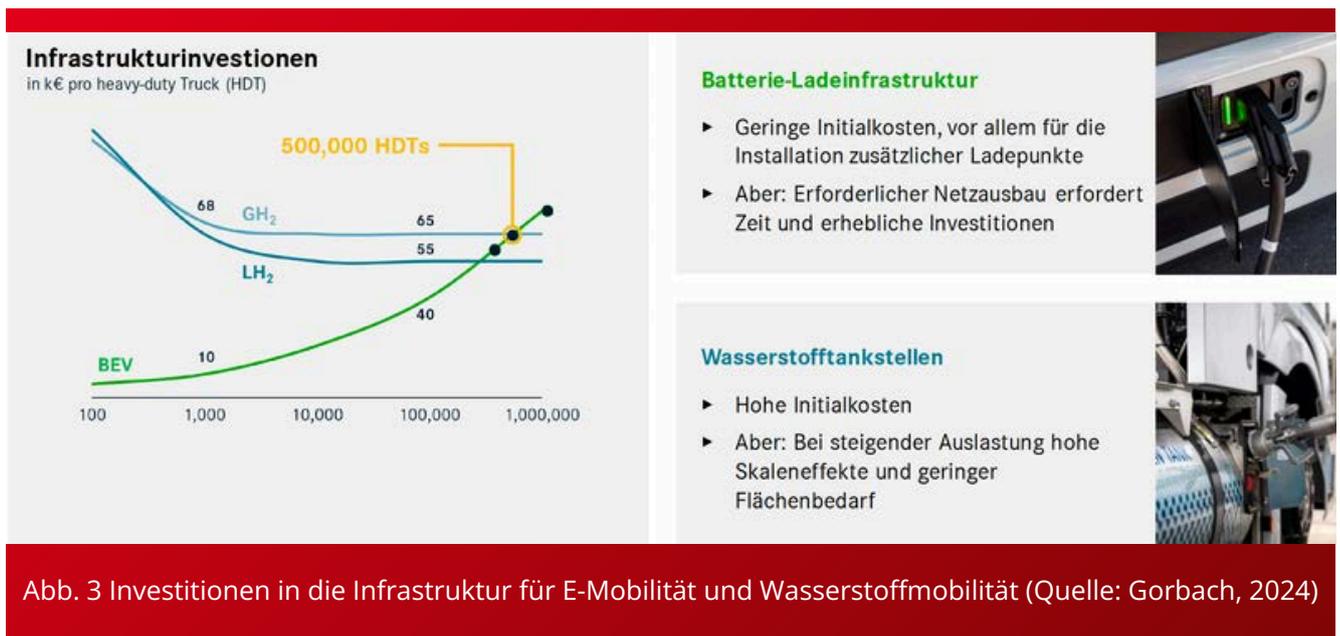


Abb. 3 Investitionen in die Infrastruktur für E-Mobilität und Wasserstoffmobilität (Quelle: Gorbach, 2024)

Die Wasserstofftechnologie kann damit im Schwerlastverkehr nicht nur ihren ökologischen, sondern auch einen großen ökonomischen Beitrag zur klimaneutralen Verkehrswende leisten.

6. Zukünftiger Weltmarkt: Eintritt internationaler Player in den europäischen Markt

Zusammenfassung:

China setzt neben der Elektromobilität stark auf die Wasserstoff-Technologie. Europa darf Wasserstoff nicht vernachlässigen.

China hat eine klare Strategie

Ungeachtet der weltweiten Entwicklungen im Bereich der nachhaltigen Energieträger und -speicher treibt China die Kommerzialisierung von Wasserstoff voran. Mit dem Anfang des Jahres in Kraft getretenen Energiegesetz wird Wasserstoff offiziell als Energiequelle anerkannt, wodurch rechtliche Hürden beseitigt werden. 2025 gilt laut dem „Mittel- und langfristigen Plan für die Entwicklung der Wasserstoffindustrie (2021-2035)“ als wichtiger Meilenstein. Über 90% der weltweit verfügbaren BZ-Lkw und Busse befinden sich in China (vgl. VDI, VDE 2022). Trotz eines Einbruches in 2024 wird in 2025 an dem geplanten Betrieb von 50.000 Brennstoffzellen-Pkw weitergearbeitet.



Ein zentrales Projekt gerade im Bereich der Wasserstoffbereitstellung ist das Integrated Solar, Wind and Hydrogen Project in der Inneren Mongolei, das 1,85 GW Solarenergie und 370 MW Windkraft nutzen wird, um jährlich 66.900 Tonnen grünen Wasserstoff zu produzieren. Ab 2030 sollen aus 100 GW Elektrolysekapazität rund 1 Mio. Tonnen grüner Wasserstoff pro Jahr in China produziert werden. Zum Vergleich: Die derzeit größte Anlage in Europa, die des Düngemittelproduzenten Yara in Porsgrunn, Norwegen, produziert etwa 3-4.000 Tonnen im Jahr. Bis 2025 sind in China 300 Wasserstofftankstellen geplant, wovon 80 % für Pkw und 20 % für Busse und Lkw vorgesehen sind. Ab 2030 wird mit mehr als einer Million Wasserstofffahrzeugen und über 1.000 Tankstellen gerechnet (vgl. NOW, 2024).

China: Gefahr oder Chance für Europa

Während Europa frühzeitig auf die Dekarbonisierung des Energiesektors setzte und sich nun mit der Herausforderung der Speichertechnologie konfrontiert sieht, verfolgt China einen umfassenderen Ansatz. Durch den parallelen Ausbau erneuerbarer Energien und der zugehörigen Speicherinfrastruktur, einschließlich Wasserpumpkraftwerken und Wasserstoffproduktion, wird eine nahtlose Integration von Energieerzeugung und -speicherung realisiert. Diese Strategie ist nicht nur ein technologischer Fortschritt, sondern auch ein geopolitisches Kalkül: Die Unabhängigkeit von ausländischen Energiequellen und die Sicherung der eigenen Versorgung stehen für China an oberster Stelle.

Der massive Ausbau der Wasserstoffwirtschaft in China wird zu einem rasant wachsenden Markt führen, der nicht allein durch asiatische Hersteller gedeckt werden kann. Hier ergeben sich für Deutschland und Europa Chancen, sich als Anbieter von Infrastrukturtechnologien zu positionieren. Um den Technologievorsprung Europas zu sichern, sind internationale Industriekooperationen mit Partnern außerhalb der EU notwendig – etwa für gemeinsame Standards, Netze und Lieferketten. Besonders im Bereich der Elektrolyseanlagen, der Tankstelleninfrastruktur und der logistischen Lösungen für Wasserstofftransport könnte Deutschland eine führende Rolle einnehmen.

Parallel zu den Entwicklungen in der Wasserstoffwirtschaft tritt China zunehmend als starker Wettbewerber im globalen Nutzfahrzeugmarkt auf. Während europäische Hersteller hohe Investitionen in klimafreundliche Antriebe tätigen, profitieren chinesische Hersteller von massiven staatlichen Förderprogrammen und einer fokussierten Industriestrategie. Diese Unternehmen setzen konsequent auf Zero-Emission Vehicles (ZEV), insbesondere batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Fahrzeuge, und umgehen so die strengen europäischen Flottenregulierungen, die konventionelle Hersteller stark belasten.

Nutzfahrzeugbranche unter Druck

Die europäische Nutzfahrzeugbranche steht damit vor einer doppelten Herausforderung. Einerseits müssen die bestehenden Fahrzeugpaletten angepasst werden, um den regulatorischen Anforderungen zu entsprechen, andererseits steigen die Entwicklungskosten für neue emissionsfreie Technologien. Diese doppelte Belastung könnte sich negativ auf die globale Wettbewerbsfähigkeit europäischer Hersteller auswirken. Besonders problematisch ist, dass neue Marktteilnehmer aus China ohne die gleichen regulatorischen Zwänge agieren können, wodurch sie ihre Produkte zu deutlich geringeren Kosten anbieten können.



Die EU muss handeln

Angesichts dieser Herausforderungen ist es essenziell, dass europäische Regulierungsbehörden für faire Marktbedingungen sorgen. Dazu gehört eine Anpassung der CO₂-Flottenregulierung, sodass auch reine ZEV-Hersteller in die CO₂-Gesamtbilanz einbezogen werden. Wettbewerbsverzerrungen müssen verhindert werden, indem gleiche Regeln für alle Marktteilnehmer gelten.

Zudem sind Schutzmaßnahmen für europäische Hersteller erforderlich, die frühzeitig in emissionsfreie Technologien investiert haben. Ihre Innovationskraft und wirtschaftliche Tragfähigkeit dürfen nicht durch subventionierte Konkurrenz untergraben werden. Eine gezielte Handels- und Industriepolitik muss sicherstellen, dass europäische Hersteller nicht durch unfaire Praktiken von Drittstaaten benachteiligt werden.

Dazu gehören auch strategische Maßnahmen zur Unterstützung europäischer Unternehmen bei der Entwicklung und Skalierung von Zero-Emission-Technologien.

Darüber hinaus sind verstärkte Fördermaßnahmen für europäische Unternehmen notwendig, um ihre Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu sichern. Neben direkten Subventionen sollte dies auch steuerliche Erleichterungen und Investitionsanreize für die Produktion emissionsfreier Nutzfahrzeuge umfassen. Ebenso muss der Ausbau einer europaweiten Lade- und Wasserstofftankstellen-Infrastruktur weiter vorangetrieben werden, um den Hochlauf neuer Antriebstechnologien zu unterstützen.



Ein fairer Wettbewerb ist entscheidend, um die Innovationskraft der europäischen Nutzfahrzeugindustrie langfristig zu sichern. Während der Wandel hin zu emissionsfreien Antrieben unumgänglich ist, muss sichergestellt werden, dass europäische Unternehmen nicht für ihre frühzeitigen Investitionen bestraft werden. Vielmehr müssen strategische Rahmenbedingungen geschaffen werden, die den Technologievorsprung sichern und Europa als führenden Standort für nachhaltige Mobilitätslösungen etablieren.

7. Harte Realität: Die Kosten müssen stimmen

Zusammenfassung:

Nutzfahrzeuge werden in den meisten Fällen von Unternehmen betrieben, die in der freien Marktwirtschaft in Konkurrenz und Wettbewerb stehen. Sie müssen kostenorientiert entscheiden. Heutzutage ist der Dieselantrieb der günstigste Antrieb. Dies wird sich in den nächsten Jahrzehnten stark zugunsten klimaneutraler Antriebe verändern.

Wasserstoffbetriebene Nutzfahrzeuge sind derzeit noch nicht wirtschaftlich

Wasserstoffbetriebene Lkw stehen vor der Herausforderung, selbst mit staatlicher Förderung für Investitionskosten (CAPEX) wirtschaftlich konkurrenzfähig zu sein. Aktuell ist es kaum möglich, Kostenparität zu erreichen, da die Wasserstoffpreise an Tankstellen derzeit über 10 €/kg liegen, während für die heutige Kostenparität Preise von rund 6 €/kg erforderlich wären. Abb. 4 zeigt die Anteile der jährlichen Gesamtkosten (TCO) für einen willkürlich gewählten Anwendungsfall, sowohl für einen Dieselantrieb und als auch für einen BZ-Antrieb.

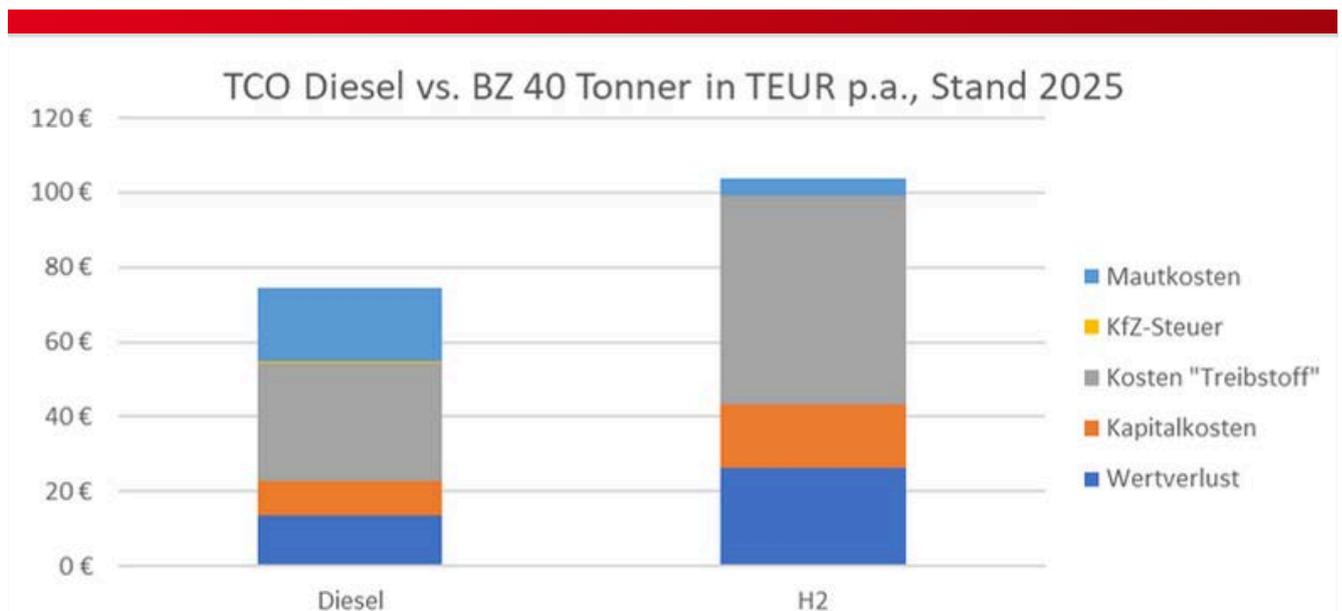


Abb. 4 Gesamtkosten pro Jahr für ein 40-Tonnen Lkw (eigene Berechnungen)

Die unterschiedliche Besteuerung von Wasserstoff-Verbrennern und Brennstoffzellenfahrzeugen behindert den Aufbau der Tankinfrastruktur. Es braucht eine einheitliche, praktikable Regelung ohne zusätzliche Nachweispflichten, um die wirtschaftliche Attraktivität nicht zu beeinträchtigen. Die Wasserstoffmobilität bietet gute CO₂-Vermeidungspotentiale von etwa 16 t CO₂eq / t H₂ im Vergleich zur Substitution von grauem Wasserstoff in der Industrie, wo die Einsparungen bei etwa 11 t CO₂eq / t H₂ liegen.

Batterieelektrische Lkw und Brennstoffzellen-Lkw werden wirtschaftlich sein

Für potenzielle Anwender von BE-Lkw und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (BZ-Lkw) ergeben sich Unsicherheiten bezüglich des Markthochlaufs beider Technologien. Es ist klar, dass beide Technologien notwendig sind, der zeitliche Horizont für deren Entwicklung bleibt jedoch ungewiss. Die Politik muss hier planerische Sicherheit schaffen.

Unternehmen benötigen dringend verbindliche politische Rahmenbedingungen für Antriebs- und Infrastrukturentscheidungen. Nur so können Investitionen verlässlich geplant und umgesetzt werden.

Kostendegradations- und Paritätspotenziale für BZ-Lkw ergeben sich zum einen aus dem notwendigen Ausbau einer engmaschigen Wasserstoffinfrastruktur für die Industrie, zum anderen aus sinkenden Wasserstoffgestehungskosten durch Elektrolyse. Diese sinkenden Kosten sind das Ergebnis von Skaleneffekten, Effizienzsteigerungen und günstigeren Strombezugsmöglichkeiten. **Zudem ist mit einer steigenden CO₂-Bepreisung und sinkenden Kosten für BZ-Lkw aufgrund technischer Fortschritte und Mischkalkulationen im Rahmen der Flottengrenzwerte zu rechnen.**

Jedoch bleibt eine Förderung notwendig, um die Marktentwicklung voranzutreiben.

Elektro- und Brennstoffzellen-Antriebe werden in naher Zukunft kostengünstiger als Dieselantriebe

Da BZ-Lkw sich am ehesten bei gewichtsbegrenzten Transportaufgaben bei langen täglichen Fahrstrecken lohnen (Abb. 5), ist für diesen Fall eine Einzelkostenentwicklung erstellt worden. Auf Basis einer Kostenabschätzung dieser Arbeitsgruppe für den Zeitraum 2025 bis 2040 (Abb. 6) zeigt sich, dass der Dieselantrieb noch die günstigste Wahl ist. Das Diagramm zeigt die Gesamtkosten in relativer Form nach einer Berechnungsmethode der HyExperts-Arbeitsgruppe (vgl. Allianz für die Region, Fraunhofer IST, IAV GmbH, 2023). Für die Einzelkosten wurden minimale und maximale Schätzungen eingesetzt. Da die elektrischen Fahrzeuge zukünftig günstiger werden und sich vor allem der Dieselpreis ab 2027 durch die Einführung der Zertifikate verteuern wird, ist damit zu rechnen, dass bis 2030 ein Schwerlast-Lkw auf Langstrecke elektrisch günstiger sein wird.

Sollten allerdings die Strompreise an den Megachargern der Autobahnen durch hohe Kosten der Infrastruktur stark steigen und der Dieselpreis durch Zumischung von regenerativen Kraftstoffen nicht teurer werden als 3 € / Liter, könnte ein Dieselfahrzeug auf Dauer günstiger bleiben als ein Elektrofahrzeug.

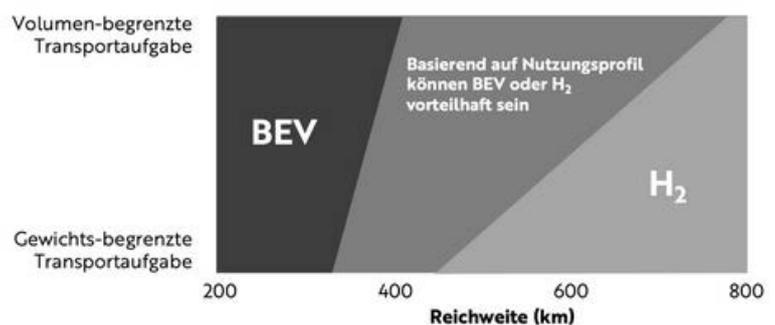


Abb. 5 Antriebskonzept in Abhängigkeit von Transportaufgabe und Fahrstrecke (Quelle: move technology)

Ein Brennstoffzellen-Fahrzeug dürfte zwischen 2030 und 2035 günstiger zu betreiben sein, als ein Dieselfahrzeug. Mit dem Import von Wasserstoff und dem Bau von Elektrolyseuren, die zu Zeiten von Strom-Niedrigpreisen Wasserstoff produzieren, ist mit einem starken Rückgang des Wasserstoffpreises zu rechnen. Die Fahrzeuge werden in der Herstellung billiger werden. Um kurzfristig ausreichend Wasserstoff bereitzustellen, sollte auch die Nutzung und zeitlich befristete Subventionierung von grauem Wasserstoff geprüft werden. Eine abgestufte Förderung je nach CO₂-Fußabdruck kann die Marktverfügbarkeit schnell erhöhen.

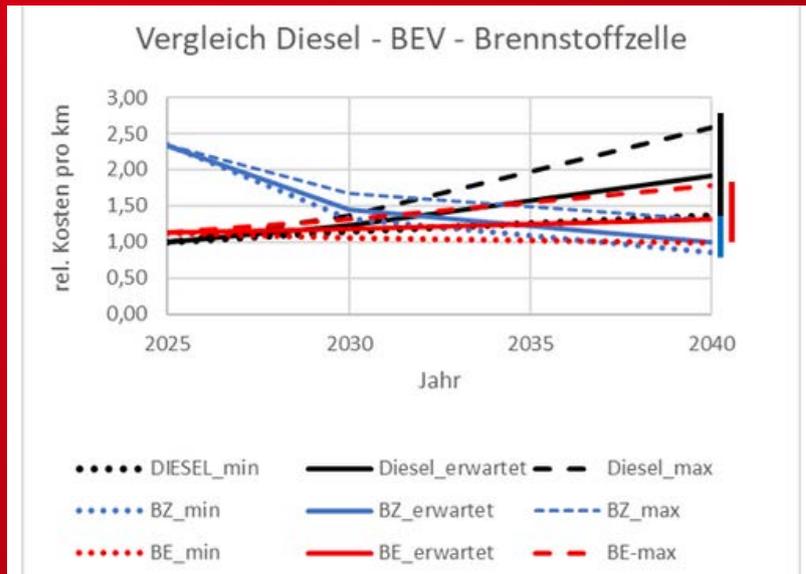


Abb. 6 Relative Kosten für Diesel-, E- und BZ-Antriebe als Prognose bis 2040, jeweils Erwartungswerte und Minimal- und Maximalszenarien (eigene Berechnungen)

Brennstoffzellen-Antriebe haben Potential für die Zukunft

Es könnte möglich sein, dass ab 2040 auf langen Strecken Brennstoffzellenfahrzeuge günstiger zu betreiben sind als reine Elektrofahrzeuge. Dabei ist zu bedenken, dass BZ-Fahrzeuge mit wenig Aufwand sowohl mit Strom als auch mit Wasserstoff zu betanken sind, der Betreiber je nach Situation sich den Energieträger auswählen kann. Nur unter der Randbedingung von günstigem Strom an den Megachargern-Säulen und teurem Wasserstoff wird sich ein Brennstoffzellenfahrzeug in der untersuchten Klasse nicht lohnen.

8. Chancen zur Lösung: Herausforderungen und Maßnahmenvorschläge

Zusammenfassung:

Eine Klimaneutralität im Nutzfahrzeugverkehr ist erreichbar. Ein großer Anteil des Verkehrs wird elektrifiziert werden. Eine vollständige Elektrifizierung wird nicht in dem von der EU geforderten Tempo möglich sein. Eine anteilige Zwischenlösung ist durch regenerativ erzeugte Flüssigkraftstoffe für Verbrennerantriebe gegeben. Ein Anteil des Nutzfahrzeugverkehrs wird durch Brennstoffzellen-Fahrzeuge abgedeckt werden.

Wasserstoffantriebe werden bei Nutzfahrzeugen zukünftig einen Beitrag zur Klimaneutralität im Verkehr leisten

Trotz der Nachteile des schlechteren Wirkungsgrades durch Umwandlungen von Strom in Wasserstoff und Wasserstoff in Strom und des Energieverlustes durch das Komprimieren des Wasserstoffs gibt es einige gute Gründe, Wasserstoff als Energieträger zu verwenden:

- ▶ Die Kosten für die Infrastruktur sind in der Skalierung für Wasserstoff niedriger als für Elektrizität.
- ▶ Teile vorhandener Infrastruktur können genutzt und/oder erweitert werden.
- ▶ Für die Speicherung über Monate gibt es für die Elektrizität aktuell keine technische Lösung. Es wird derzeit auf das Betreiben von Gaskraftwerken mit fossilen Brennstoffen gesetzt. Eine Lösung wäre es, einen Teil der Fahrzeugflotten mit Wasserstoff zu betreiben, welcher zu Zeiten niedriger Strompreise erzeugt wird und in Salzkavernen und in anderen Gasspeichern für Zeiten vorgehalten wird, in denen nicht Strom knapp und damit sehr teuer sein wird.
- ▶ Primärenergie wurde und wird auch zukünftig importiert werden müssen. Das wird sowohl über Stromkabel als auch Wasserstoff-Pipelines dargestellt. Die Industrie (Stahl, Pharma, Chemie etc.) wird auf jeden Fall große Mengen von grünem Wasserstoff einsetzen. Damit wird es für diesen Energieträger eine große Versorgungssicherheit geben müssen.
- ▶ Für spezielle Anwendungen (Überlandreisebusse, Baustellenverkehr, Schwerlastverkehr über weite Strecken, situationsbedingt erforderliche kurze Betankungszeiten) bieten Wasserstoffantriebe Vorteile.
- ▶ Derzeitige hohe Wasserstoffpreise sind einer Wirtschaftlichkeit hinderlich. Mit Preisen von 6 bis 7 EUR / kg (ohne Berücksichtigung der Inflation) wird ein Brennstoffzellenfahrzeug vermutlich auf niedrigere Gesamtkosten pro Kilometer kommen als ein Elektro-Lkw. Darum arbeiten alle großen Lkw-Hersteller an BZ-Lkw.

In 5 bis 10 Jahren, wenn genügend grüner Wasserstoff dem Verkehr zur Verfügung steht und die OEM günstigere BZ-Lkw anbieten, werden die Anteile an den Neufahrzeugverkäufen einen merkbaren Anstieg verzeichnen.

Untermuert wird dies durch eine Prognose von der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstofftechnologie (vgl. NOW 2024). Die in Abb. 7 dargestellte Prognose zum Antriebsmix Lkw (> 12 t) in der EU für 2030 zeigt parallele Pfade.

Für die allermeisten Anwendungen beim depot-gestützten Nah- und Regionalverkehr wird aus Herstellersicht die Anwendung der Batterietraction prognostiziert. Allerdings sind z. B. spezifische Branchenanforderungen sowie bei Anwendungen im Fernverkehr mögliche Infrastruktur – Restriktionen ebenfalls zu berücksichtigen. Daher könnte der Anteil der H₂ – Traktion (BZ-Lkw + H₂ -Verbrenner 2030: 26%) auch höher ausfallen.

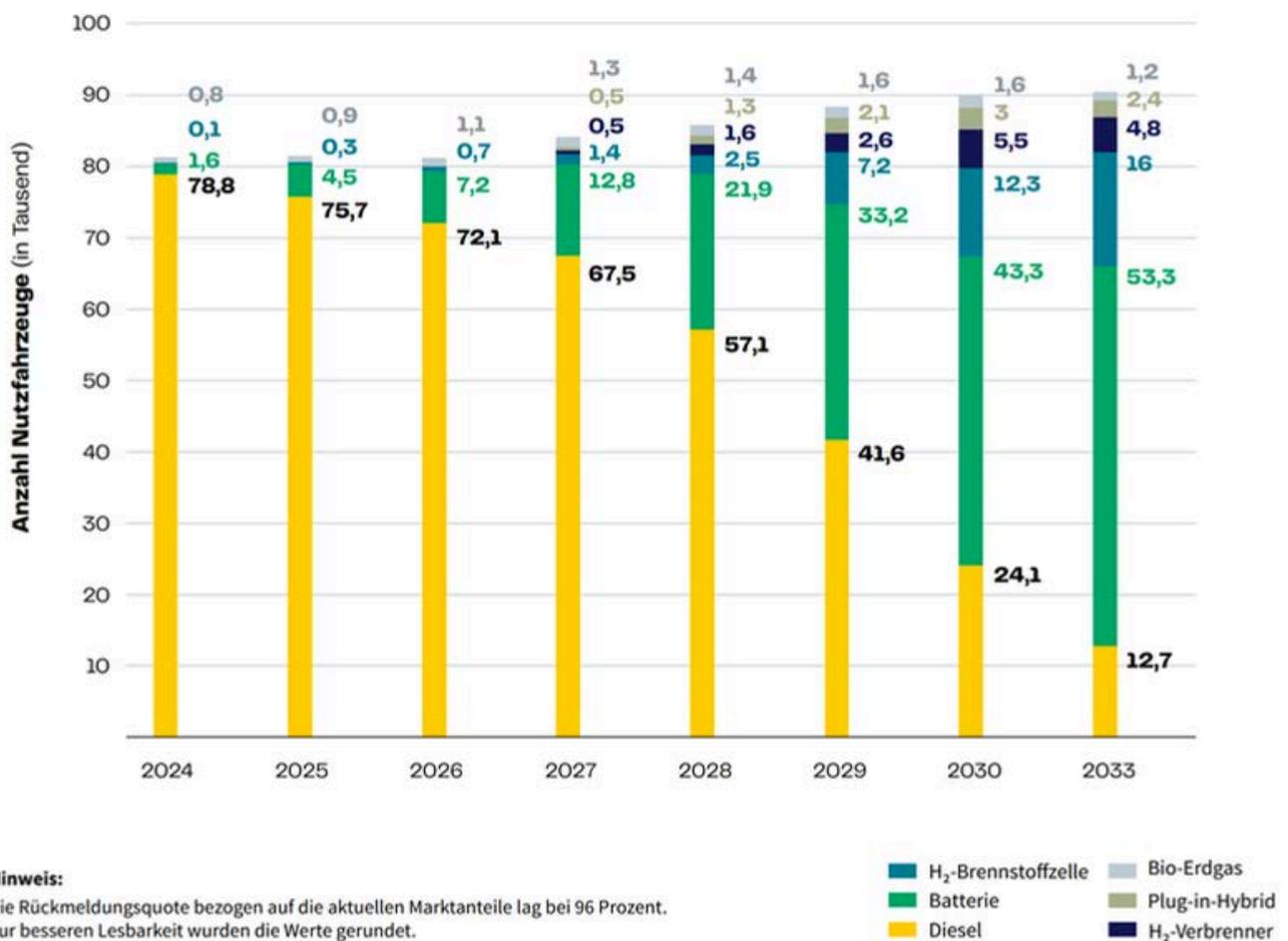


Abb.7 Prognose für Antriebs-Mix für Lkw > 12 t in der EU bis 2030 (Quelle: NOW)

Beispiele in Niedersachsen für Insellösungen, die Keimzellen für weitere Ausbreitung werden könnten

1. Stadtwerke Nienburg

Die Stadtwerke im niedersächsischen **Nienburg** sehen einen Vorteil im Einsatz von grünem, lokal erzeugtem Wasserstoff für Busse und Lkw. gegenüber E-Bussen. Es wurde eine standortintegrierte Komplettlösung, bestehend aus PV-Anlage (2,1 MW Peak), Windkraft, Elektrolyseur, Speicher und Wasserstofftankstelle für den ÖPNV und Schwerlastverkehr errichtet. Dieser integrale Ansatz sowie die vermiedenen Leitungs- und Transportkosten helfen, den dort grün erzeugten Wasserstoff preisgünstiger zu erzeugen (vgl. Nienburg, 2025).

2. Abfallwirtschaft Hannover

Die **Abfallwirtschaft Hannover („AHA“)** hat die innovative Planung für ein ebenfalls integriertes Konzept vorgestellt, bei dem grüner Wasserstoff aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung gewonnen wird. Perspektivisch könnte der gesamte Abfallsammel-Fuhrpark von **230 LKW** auf brennstoffzellenbetriebene Wasserstofffahrzeuge umgestellt werden. Zunächst sind 8 Brennstoffzellen-Fahrzeuge im Einsatz. Dabei soll der grüne Wasserstoff zukünftig in einem geschlossenen Energiekreislauf mittels der Methan-Plasmalyse auf dem eigenen Betriebsgelände produziert, gespeichert und getankt werden. Dabei wird nur ein Viertel der sonst üblichen Energie für einen Elektrolyseur benötigt (vgl. Hannover, 2025).

3. Weitere Beispiele außerhalb Niedersachsens

- Der **Bielefelder** ÖPNV wird ab Sommer 2025 **29 BZ- Busse** im Betrieb haben. H₂ wird im Innovationspark „Sektorenkopplung“ per Elektrolyse u. a. mit Strom aus der Abfallverbrennung der MVA generiert.
- Bei der Rebus Regionalbus **Rostock** wurden **52 Wasserstoff – Busse** eingeflottet. Die Fzg. - Reichweite liegt im ländlichen Regionalverkehr bei 500 km pro Betankung. Für das Projekt wurden auf Basis regionalen Grünstroms Elektrolyseur- und Tankstellenkapazitäten aufgebaut.
- Die italienischen Städte **Bologna** und **Ferrara** haben die ersten **37 von 137 Wasserstoffbussen** erhalten (ca. 12% des Fuhrparks). Der Einsatz erfolgt aufgrund eines „heterogenen Netz“ mit städtischen, flächigen und gebirgigen Anteilen vor allem in rand- und außerstädtischen Bereichen.
- Die **deutsche hylane GmbH** vermietet Wasserstoff-Lkw, ist nach eigenen Angaben der größte Flottenbetreiber in Europa mit zunehmender Fahrzeuganzahl. Hylane hat beispielsweise einen 44-Tonner von IVECO mit 800 km Reichweite im Angebot (vgl. hylane, 2025).
- In der **Schweiz** haben rund **50 Brennstoffzellen-Lkw** von Hyundai Hydrogen Mobility (HHM) über 10 Mio. Kilometer zurückgelegt (vgl. TIR transNews, 2024).

Parallele Pfade

Die Wahl der Antriebstechnologie muss sich an den spezifischen Transportanforderungen orientieren. Die angefügte Darstellung zeigt, dass Reichweite und Ladekapazität entscheidende Faktoren sind. Elektro-Technologien eignen sich insbesondere für volumenbegrenzte Transportaufgaben mit kürzeren Reichweiten, während H₂-Antriebe vorteilhafter für gewichtslimitierte Langstreckentransporte sein können. Dies zeigt, dass die Transformation nicht mit einer Einheitslösung bewältigt werden kann, sondern eine technologieoffene Strategie erforderlich ist.

In Abb. 8 sind mögliche alternative Antriebskonzepte gegenüber Diesel, abhängig von der Tagesfahrleistung im Nah-, Regional- und Fernverkehr dargestellt.

Mit der Prämisse „grüner“ Energie verbleibt die Option der Batterie- oder H₂ - Traktion, per Brennstoffzelle oder als Direkt - Verbrenner (in Abb. 8 nicht dargestellt).

Biogas und HVO wird primär nur für Nischenanwendungen erwartet.

Für die Batterie-Traktion ist wichtig, dass im Falle hohen Energiebedarfs (für hohe Reichweiten oder Hilfsantriebe z.B. für Müllfahrzeuge, Betonmischer) durch das Batteriegewicht Einschränkungen bei der Nutzlast notwendig sein können.

Dagegen ist die H₂-Traktion gewichtsseitig vorteilhaft, bietet analoge Tankzeiten und Potential zur doppelten Reichweite versus der aktuellen Batterie-Technologie. Sie ist jedoch aktuell teurer bei der Anschaffung und den Energiekosten.

	Reichweite	Nahverkehr	Regionalverkehr	Fernverkehr
Jahresfahrleistung		30 000–50 000 km	50 000–80 000 km	>80 000 km
Einsatzgebiet		<50 km Urbaner und ländlicher Verkehr; Citylogistik	50–150 km regionale Verteilung, Sammelgut	>150 km Fernstrecken, Punkt-zu-Punkt-Verkehre
Tagesfahrleistung (1-Mann-Besatzung 60 km/h 8 h Lenkzeit)		150 km/Tag	300 km/Tag	480 km/Tag
Diesel	bis zu 5000 km	✓	✓	✓
BEV (rein Batterieelektrisch)	~150 km	✓	Bedingte Eignung	./.
Verfügbarkeit		ab 2021	ab 2021	ab 2025
(Bio-)Gas-Lkw (LNG) (CNG)	~1600 km 500–600 km	✓	✓	✓
Verfügbarkeit		sofort	sofort	sofort
H₂/BZ	~400 km	✓	✓	✓
Verfügbarkeit		ab 2027	ab 2027	ab 2027

BEV = Battery Electric Vehicle; LNG = Liquefied Natural Gas (verflüssigtes Methan);

CNG = Compressed Natural Gas (komprimiertes Methan); H₂/BZ = Wasserstoff/Brennstoffzelle

(vgl. Bundesverband Güterkraftverkehr und Logistik, 2021) | Abb. 8 Bewertung der Antriebskonzepte durch den BGL

Damit wird deutlich, dass nicht der Antrieb mit der höchsten Effizienz (Batterietraction) immer die bestmögliche Lösung darstellt, sondern z.B. auch Usability, Infrastrukturzugang, Betriebsbedingungen und Gesamtkosten den Ausschlag geben.

Forderungen an die Politik, um die Kosten der Energiewende nicht ausufern zu lassen

Die Wettbewerbsfähigkeit alternativer Antriebe hängt maßgeblich von den Gesamtkosten über den Lebenszyklus (TCO) ab. Während batterieelektrische Lkw aufgrund sinkender Batteriekosten und staatlicher Subventionen zunehmend attraktiver werden, sind die Betriebskosten für Wasserstofffahrzeuge noch hoch. Die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff ist ein kritischer Faktor für die Wirtschaftlichkeit von BZ-Lkw und H₂-Verbrenner-Lkw. Investitionen in Lade- und Tankinfrastruktur müssen daher Hand in Hand mit der Einführung neuer Fahrzeugkonzepte gehen.

In diesem Paper wird aufgezeigt, dass mittelfristig ein Teil des Nutzfahrzeugverkehrs mit Wasserstoff abgedeckt werden wird. Darum ist es wichtig, dass schon jetzt der Hochlauf durch politische Maßnahmen unterstützt wird.



Gezielte Förderung zum Austausch alter Diesel-Lkw durch Wasserstofffahrzeuge („Abwrackprämie“) zur Beschleunigung des Markthochlaufes



Förderung des Aufbaus des Wasserstoffnetzes und der H₂-Tankstellen für Lkw, insbesondere in Europa



Erhöhung der CO₂-Bepreisung für 2026



Entlastung des Betriebs klimaneutraler Fahrzeuge in den nächsten 10 bis 15 Jahren (Maut, Kraftfahrzeugsteuern)



Schutz der europäischen Nutzfahrzeughersteller



Verschiebung der Klimaneutralität in Deutschland auf EU-Zeitpunkt



Anpassung der europäischen Flottenverbrauchsvorgaben an die technischen Möglichkeiten



Auszahlung des Klimageldes, um Strafzahlungen wieder der Volkswirtschaft zuzuführen

Eine ausführliche Darstellung von Maßnahmen in den Bereichen Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff findet sich in der Studie Impulse zum Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft in Deutschland wieder (vgl. VDI, 2025).

Autorenteam

Prof. Dr.-Ing. Dennis Backofen

Ostfalia HAW, Institut für Recycling

Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Abteilungsleiter
Nachhaltige Mobilität

M.Sc. Marcus Gapinski

TU Braunschweig, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Energiespeichermaterialien und Brennstoffzellen

Dipl.-Ing. Joachim Hülsmeier

Arbeitskreis Fahrzeugtechnik im VDI Braunschweiger Bezirksverein e. V.

Dr. Wolf-Rüdiger Landschoof

Leiter des Arbeitskreises Fahrzeugtechnik im VDI Braunschweiger Bezirksverein e. V.

Dr. Jörn Seebode

Geschäftsführer move technology GmbH

Dr. Jens Katzek

Geschäftsführer

Automotive Cluster Ostdeutschland GmbH (ACOD)



Quellenverzeichnis

- Gorbach, A. (2024), 6 unbequeme Wahrheiten über die Zukunft der Nutzfahrzeuge, Daimler Truck AG
- NOW (2025), Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2025), NOW GmbH, Internet: <https://nationale-leitstelle.de/nutzfahrzeuge/>, abgerufen am 15.05.2025; Berlin
- ADAC (2025), Tankstellennetz in Deutschland, (2025); ADAC; Internet: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/tankstellen-in-deutschland/>, abgerufen am 15.05.2025
- Rose, Ph., Wietschel, M., Gnann, T. (2020); Wie könnte ein Tankstellenaufbau für Brennstoffzellen-Lkw in Deutschland aussehen?; Working Paper Sustainability and Innovation; No. S09/2020; Internet: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2020/WP-09-2020_Wasserstoff-Tankstellen_Wi-Gnt-rose.pdfhttps://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2020/WP-09-2020_Wasserstoff-Tankstellen_Wi-Gnt-rose.pdf; Fraunhofer ISI; Karlsruhe
- Bock, Chr. (2025); Wie zukunftsfähig sind Wasserstoff-Lkw?; Fernsehbeitrag des ZDF vom 01.02.2025; Internet: <https://www.zdf.de/nachrichten/wirtschaft/unternehmen/lkw-diesel-wasserstoff-klimawandel-100.html>; Mainz
- ACEA (2021); Heavy-duty vehicles: Charging and refuelling infrastructure requirements; ACEA position paper; European Automobile Manufacturer Association; Internet: <https://www.acea.auto/publication/position-paper-heavy-duty-vehicles-charging-and-refuelling-infrastructure-requirements/>; Brussels, May 2021
- European Commission (2023), N.N.; Alternative Fuels Infrastructure Regulation (EU) 2023/1804; European Commission, Mobility and Transport; Internet: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/clean-transport/alternative-fuels-sustainable-mobility-europe/alternative-fuels-infrastructure_en; Brussels, 2023
- NOW (2024); Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr; Auswertung der Clean room-Gespräche mit Nutzfahrzeugherstellern 2024; NOW GmbH; Berlin, 2024
- Bauermann, T., Kaczmarczyk, P., Krebs, T. (2024); Ausbau der Stromnetze: Investitionsbedarfe
- TenneT, 50Hertz (2023); Systemdienliche Elektrolyse im Rahmen des WindSeeG
- Allianz für die Region, Fraunhofer IST, IAV GmbH (2023); Erarbeitung eines ganzheitlichen Konzeptes zur Erzeugung und Nutzung von grünem Wasserstoff in den Bereichen Mobilität und Industrie in SüdOstNiedersachsen.
- Deutscher Wasserstoff-Verband (2024); CO₂-Ziele im Verkehrssektor mit H₂-Mobilität erreichen
- VDI, VDE (2022); Klimafreundliche Nutzfahrzeuge
- VDI (2025); Impulse zum Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft in Deutschland, Ergebnisse des VDI-Zukunftsdialogs
- Bundesverband Güterkraftverkehr und Logistik (2021); Klimaschutz in Logistik und Straßengüterverkehr
- Hylane www.hylane.de, abgerufen 21.05.2025
- TIR transNews, Martin Schatzmann (2024); <https://www.tir-transnews.ch/lkw/von-uebungsabbruch-ist-bei-hhm-keine-rede/>, abgerufen 21.05.2025
- Nienburg (2025) <https://www.stadtwerke-nienburg.de/de/Kopfnavigation/Blog/Energiesparend/Wasserstoff-fuer-Nienburg.html>, abgerufen 21.05.2025
- Hannover (2025) <https://www.aha-region.de/aktion/wasserstoffantrieb-1/methan-plasmalyse-1-1>, abgerufen 21.05.2025
- Bologna (2025) <https://www.electrive.net/2025/02/12/region-bologna-tper-empfaengt-erste-37-h2-busse-von-solaris/#:~:text=Solaris%20hat%20die%20ersten%2037,von%20Wasserstoff%20DBussen%20in%20Europa>, abgerufen 21.05.2025
- Hans-Böckler-Stiftung (2024) <https://www.imk-boeckler.de/de/pressemitteilungen-15992-studie-berechnet-investitionsbedarf-in-deutsche-stromnetze-65371.htm>, abgerufen am 27.05.2025