



WASSERSTOFF  
KOMPASS



MOBILITÄT UND TRANSPORT  
**Kraftfahrzeuge**





# WASSERSTOFF KOMPASS

## ÜBERGREIFENDE ASPEKTE

- Regulatorischer Rahmen
- Zielgerichteter H<sub>2</sub>-Einsatz
- Fachkräftesicherung
- Akzeptanz und Sicherheit
- Klima und Ressourcen

## BEREITSTELLUNG

- H<sub>2</sub>-Erzeugung
- H<sub>2</sub>-Import
- Infrastruktur

## INDUSTRIEZWEIGE

- Stahlindustrie
- Chemische Industrie
- Raffinerien
- Zementindustrie
- Glasindustrie

## MOBILITÄT UND TRANSPORT

- Kraftfahrzeuge**
- Schifffahrt
- Luftverkehr
- Schienenverkehr

## ENERGIEVERSORGUNG

- Gebäudewärme
- Prozesswärme
- Stromsystem

## GLOSSAR

- 1 Generelle Aspekte des straßengebundenen Verkehrs**
  - 2 Endenergiebedarf des straßengebundenen Verkehrs
  - 4 Treibhausgasemissionen und deren Reduktion
  - 5 Ökonomische Aspekte
  - 6 Versorgungssicherheit
  - 6 Wasserstoffbedarfe
  - 7 E-Fuel-Bedarfe
  - 7 Alternativen zum PKW
- 8 Forschungs- und Entwicklungsbedarfe**
  - 8 Technische Herausforderungen
  - 9 Akzeptanz
  - 9 Verfügbarkeit von Treibstoffen
  - 9 Welche Verteilungsinfrastrukturen müssen wann geschaffen werden?
  - 9 Anwendbarkeit von E-Fuels auf Flottenemissionswerte
  - 10 Technologische Entwicklungen bei Nischenanwendungen
- 11 Handlungsoptionen (Wasserstoff)**
  - 11 Brennstoffzellenantrieb
  - 16 Direktverbrennung von Wasserstoff
  - 18 Synthetische Kraftstoffe
- 23 Handlungsoptionen (andere Technologien)**
  - 23 Batterieelektrische Antriebe und Plug-in-Hybride
  - 27 Oberleitungshybrid-LKW (OH-LKW)
- 30 Literatur**

# Kraftfahrzeuge

- › Sofern sich Wasserstoffanwendungen im Straßenverkehr etablieren können, werden sie im PKW-Segment im Vergleich zu batterieelektrischen Antrieben eine eher untergeordnete Rolle spielen.
- › 60 bis 80 Prozent des für den gesamten nationalen Mobilitätssektor prognostizierten Wasserstoffbedarfs würde im Schwerlastverkehr entstehen. Aber auch in diesem Bereich würden Wasserstoffanwendungen mit batterieelektrischen Antrieben konkurrieren.
- › Ein Bedarf an synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels) wird im Kraftfahrzeugbereich vor allem für die Defossilisierung der Bestandsflotte und von Arbeitsmaschinen (zum Beispiel für Landwirtschaft, Bau etc.) erwartet.

## Generelle Aspekte des straßengebundenen Verkehrs

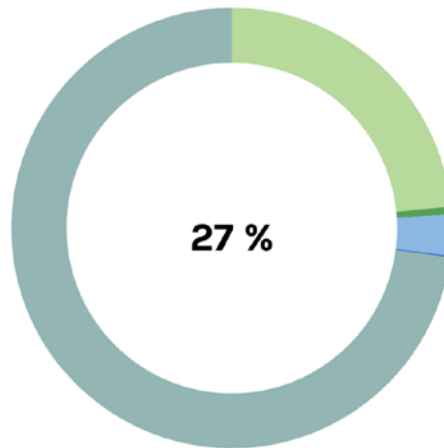
Die Kraftfahrzeuge umfassen alle nicht schienengebundenen Landfahrzeuge, die primär durch einen Motor angetrieben werden. Dies schließt somit den straßengebundenen Verkehr (Personen- und Lastkraftwagen, Busse) sowie Spezialfahrzeuge aus Bergbau, Forstwirtschaft und ähnliche ein. Zur Dekarbonisierung dieses Teils des Verkehrssektors wird es sowohl Verhaltensänderungen als auch alternative Antriebsarten beziehungsweise Kraftstoffe brauchen, darunter beispielsweise Wasserstoff-Brennstoffzellenantriebe.

## Endenergiebedarf des straßengebundenen Verkehrs

Etwa 27 Prozent des nationalen Energiebedarfs entfielen 2021 auf den Verkehr, davon rund 86 Prozent auf den straßengebundenen. <sup>[26]</sup>

### Endenergiebedarf in Terawattstunden

Anteil des Verkehrs am Gesamtendenergieverbrauch in Deutschland 2021. <sup>[26]</sup>

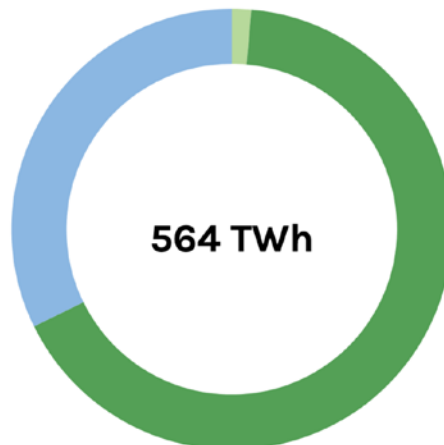


■ Straßenverkehr 
 ■ Schienenverkehr 
 ■ Luftverkehr 
 ■ Binnenschifffahrt 
 ■ Rest

Der motorisierte Individualverkehr nahm hierbei mit rund zwei Dritteln den größten Anteil ein. Etwa ein Drittel entfiel auf den Güterverkehr und nur circa zwei Prozent auf den öffentlichen Personenverkehr.

### Endenergiebedarf in Terawattstunden

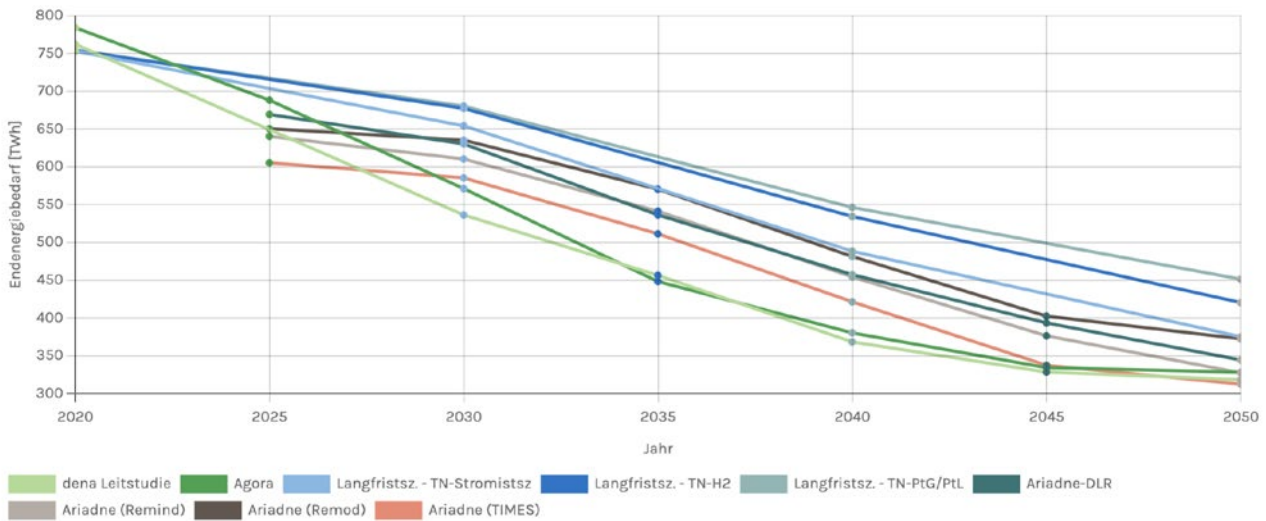
Endenergieverbrauch des straßengebundenen Verkehrs nach Verkehrsträgern. <sup>[26]</sup> Insgesamt betrug der Gesamtendenergiebedarf für Kraftfahrzeuge 564 Terawattstunden in 2021.



■ Öffentlicher Verkehr 
 ■ Individualverkehr 
 ■ Güterverkehr

Es wird erwartet, dass der Endenergiebedarf des Gesamtverkehrs vor allem durch die zunehmende Elektrifizierung des Kraftverkehrs und die damit einhergehende Steigerung der Effizienz in den nächsten Jahren deutlich abnehmen wird – je nach Szenario werden die Endenergiebedarfe 2045/2050 nur noch bei 312 bis 451 Terawattstunden liegen. Dabei weisen die Szenarien mit kleinerem Direktelektrifizierungsanteil die größeren Energiebedarfe auf.

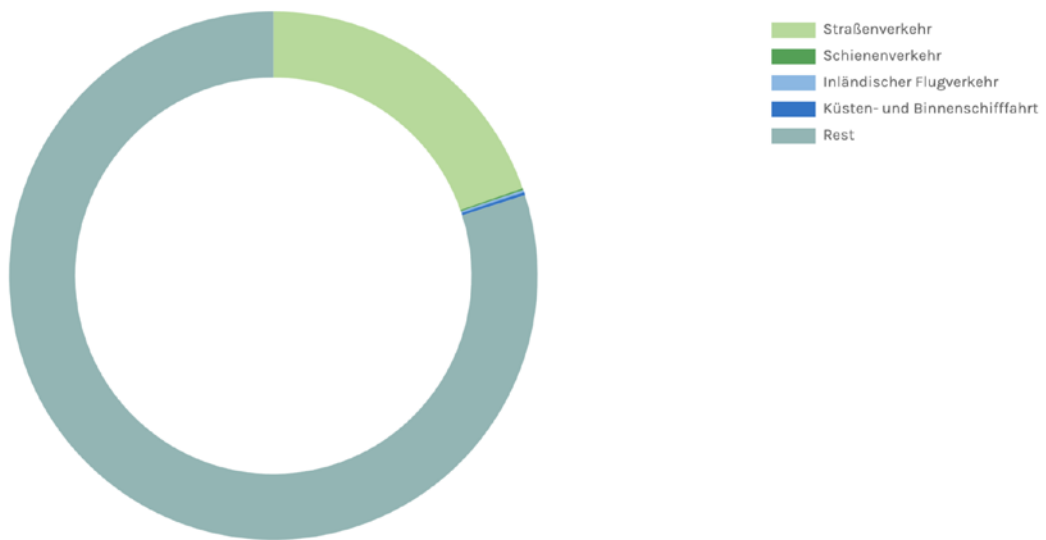
**Zeitliche Entwicklung des Endenergiebedarfs**  
des Kraftverkehrs nach Studienlage in Terawattstunden<sup>[1]</sup>



## Treibhausgasemissionen und deren Reduktion

Knapp 20 Prozent der nationalen Treibhausgasemissionen entfielen 2020 auf den Verkehr, davon 98 Prozent auf den straßengebundenen.

**Treibhausgasemissionen im Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente**  
Anteil des Verkehrs an den nationalen Treibhausgasemissionen 2020.<sup>[26]</sup>



Die Treibhausgasemissionen sind im Verkehr zwischen 1990 und 2021 lediglich um 9,4 Prozent gesunken, während die deutschen Gesamtemissionen im selben Zeitraum um 38,7 Prozent reduziert wurden. Ursächlich hierfür ist vor allem die stark gestiegene Gesamtfahrleistung insbesondere im PKW-Segment,<sup>[3]</sup> welcher trotz einer Senkung der spezifischen Treibhausgasemissionen pro Kilometer um 5,1 Prozent eine Emissionssteigerung in absoluten Zahlen zu verbuchen hat.<sup>[4]</sup>

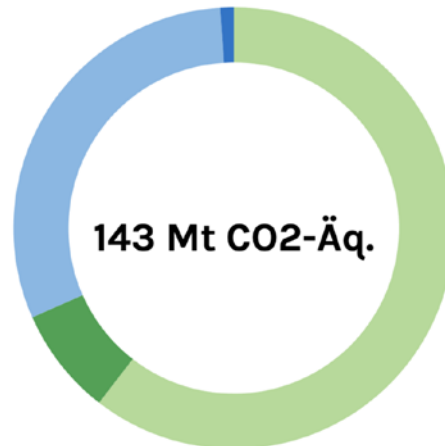
Im LKW-Segment ist diese Entwicklung noch stärker ausgeprägt: Im Vergleich zu 1995 wurden zwar 32,6 Prozent weniger Treibhausgasemissionen pro Kilometer ausgestoßen. Aber die fast doppelt so hohe Fahrleistung hat die Gesamtemissionen letztlich um 17 Prozent erhöht.<sup>[4]</sup>

Insgesamt sind PKW für 60,5 Prozent und leichte sowie schwere Nutzfahrzeuge (einschließlich Busse) zusammen für 38,6 Prozent der Treibhausgasemissionen im Verkehr verantwortlich. Davon ist rund die Hälfte der Emissionen dem Schwerlastverkehr (über 40 Tonnen) zuzuschreiben, obwohl dieser mit weniger als 10 Prozent nur einen geringen Anteil der Nutzfahrzeugflotte umfasst.<sup>[3,4]</sup> Andere Kraftfahrzeugarten sind aufgrund ihrer deutlich geringeren Anzahl von nachrangiger Bedeutung.



### Treibhausgasemissionen

Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs nach Verkehrsträger 2020.<sup>[26]</sup> Insgesamt hat der Kraftverkehr 143,1 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittiert.



PKW leichte Nutzfahrzeuge schwere Nutzfahrzeuge (inkl. Busse) motorisierte Zweiräder

Zur Reduktion der Treibhausgasemissionen gibt es verschiedene alternative Antriebsarten, Kraftstoffe und organisatorische Lösungsansätze. Bei den alternativen Antriebsarten und Kraftstoffen sind insbesondere batterieelektrische Lösungen, Wasserstoffantriebe (Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>-Direktverbrennung) und Bio- beziehungsweise E-Fuels (aus dem Englischen: electrofuel = synthetische Kraftstoffe) zu nennen. Organisatorische Lösungsansätze zur Reduktion von Treibhausgasemissionen konzentrieren sich auf eine Nachfragereduktion beziehungsweise Verkehrsverlagerung, zum Beispiel durch die Nutzung des öffentlichen Verkehrs oder von Mikromobilität wie etwa Fahrrad oder E-Scooter.

## Ökonomische Aspekte

Die verschiedenen KFZ-Arten unterliegen verschiedenen ökonomischen Strukturen. Privatfahrzeuge können als Konsumgüter betrachtet werden. Häufig werden teure PKW gekauft, die mit Blick auf ihren Nutzwert nicht die ökonomisch sinnvollste Lösung darstellen. Entsprechend ist das Segment der Oberklassenfahrzeuge für die deutsche Automobilwirtschaft von hoher ökonomischer Bedeutung. Bei betrieblich genutzten Fahrzeugen wiederum spielt die Wirtschaftlichkeit die entscheidende Rolle. Insbesondere die Logistikbranche zeichnet sich durch einen intensiven Wettbewerb und niedrige Margen aus.

Mit Blick auf die Arbeitsmarktentwicklung durch den potenziellen Wasserstoff-einsatz im Verkehr gehen Studien generell davon aus, dass – im Vergleich zur Elektromobilität – die Prozesse der heutigen Automobilfertigung leichter auf Wasserstoffantriebe übertragen werden können, was insbesondere für spezialisierte Zulieferer relevant ist.

## Versorgungssicherheit

Mobilität und Transport sind menschliche Grundbedürfnisse und essenzieller Bestandteil moderner wirtschaftlicher Prozesse. Die Versorgungssicherheit von Energie ist somit eine essenzielle Voraussetzung.

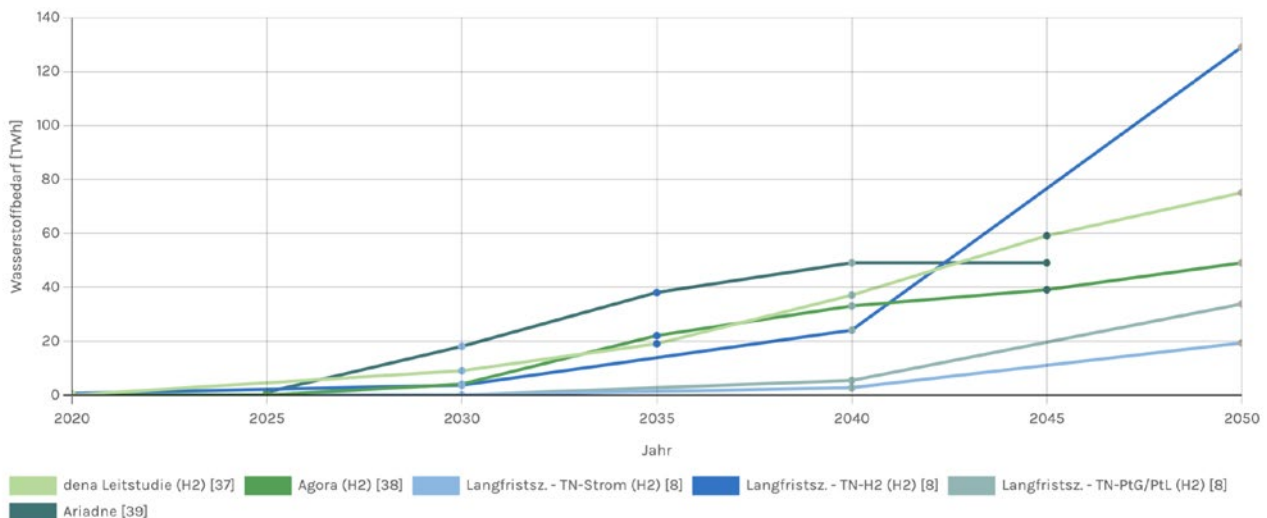
Eine breite Wasserstoffnutzung in Kraftfahrzeugen ist herausfordernd, da der damit verbundene hohe Primärenergiebedarf, zumindest auf absehbare Zeit, nur schwer zu decken ist. Zudem würde der in großen Mengen im Mobilitätsbereich verwendete Wasserstoff in anderen Bereichen, in denen es keine Alternativen zur Defossilisierung auf H<sub>2</sub>-Basis gibt, fehlen. In einer gesamtsystemischen Betrachtung erscheint solch ein Szenario als ungünstig.

Bei einigen Anwendungen im Kraftfahrzeugbereich ist es allerdings möglich, dass batterieelektrische Lösungen nicht oder nur sehr schwer umsetzbar sind. Für diese Anwendungen sollte in diesem Fall eine Versorgung mit Wasserstoff beziehungsweise E-Fuels ermöglicht werden.

## Wasserstoffbedarfe

Je nach Szenario liegen die reinen Wasserstoffbedarfe des nationalen Verkehrs (nicht nur Kraftfahrzeuge) zwischen 19 und 117 Terawattstunden im Jahr 2045/2050.<sup>[1]</sup> Der Großteil des Wasserstoffs wird im LKW-Bereich eingesetzt. Allerdings gibt es auch hier zwischen den Szenarien große Unterschiede. Selbst in dem Szenario mit dem größtem Wasserstoffbedarf (Wasserstoffszenario der Langfristszenarien) deckt dieser nur etwa 30 Prozent des Gesamtenergiebedarfs des Verkehrs.

**Wasserstoffbedarfe**  
im Verkehr nach Studienlage in Terawattstunden<sup>[1]</sup>



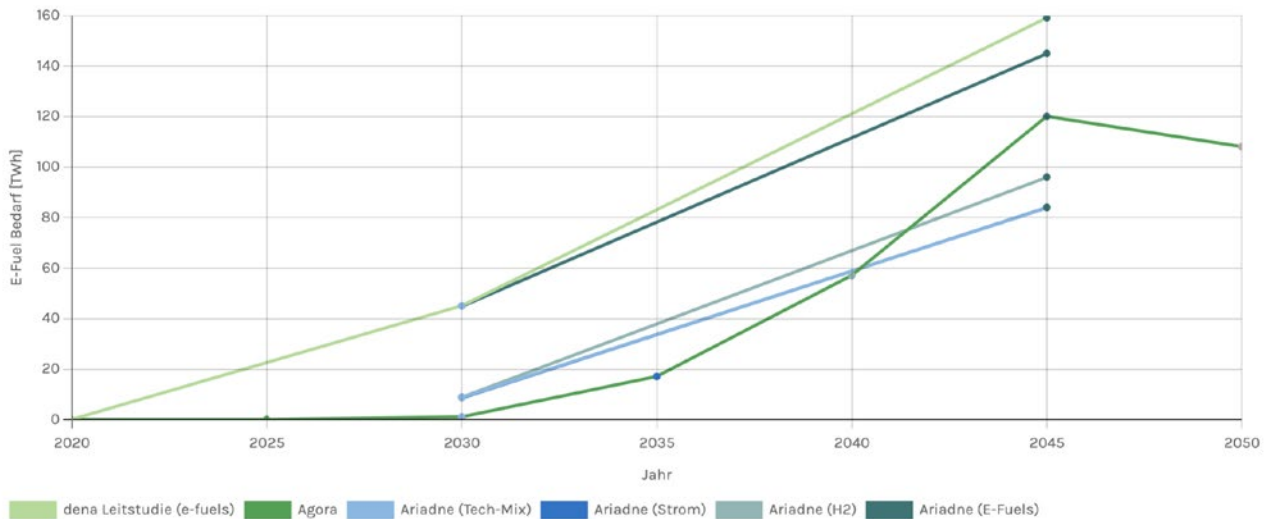


## E-Fuel-Bedarfe

Synthetische Kraftstoffe beziehungsweise E-Fuels werden vor allem im Luft- und Schiffsverkehr sowie zur Defossilisierung der straßengebundenen Bestandsflotten benötigt. Je nach Szenario sind dies im Jahr 2045/2050 zwischen 84 und 159 Terawattstunden.

### E-Fuel-Bedarfe

des Verkehrs nach Studienlage in Terawattstunden <sup>[1]</sup>



## Alternativen zum PKW

Die Verkehrswende ist mehr als eine Antriebswende. Eine Verlagerung des PKW-Verkehrs auf andere Mobilitätsformen kann je nach gewählter Alternative zwischen 20 und 75 Prozent der Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer einsparen. <sup>[10]</sup>

Öffentlicher Verkehr und Mikromobilität wie Fahrräder, E-Scooter, Lastenräder etc. können viele PKW-Fahrten ersetzen. Gerade in Städten mit knappem Platzangebot und gutem öffentlichen Verkehr sollten Alternativen zum PKW vorgezogen werden. Dadurch verbessert sich zudem die Luftqualität in den Städten und der öffentliche Raum gewinnt an Aufenthaltsqualität. Für längere Strecken weisen Züge und Fernbusse und die Bahn einen deutlich niedrigeren Energiebedarf auf.

Für erfolgversprechenden intermodalen Verkehr müssen Alternativen zum PKW allerdings preislich und unter Komfortgesichtspunkten attraktiv sein. Das bedeutet, dass ein zuverlässiges und kostengünstiges Angebot des öffentlichen Verkehrs mit hinreichend hoher Taktfrequenz, attraktiven intermodalen Verknüpfungspunkten (unter anderem abgestimmte Fahrpläne unterschiedlicher Anbieter, Bike & Ride, sichere Fahrradabstellanlagen) sowie sicheren Rad- und Fußverkehrsanlagen benötigt werden.

### AUSWAHL ÖFFENTLICH GEFÖRDERTER PROJEKTE

- › BeniVer – Begleitforschung Energiewende im Verkehr  
[https://www.dlr.de/vf/desktopdefault.aspx/tabid-2974/1445\\_read-52897/](https://www.dlr.de/vf/desktopdefault.aspx/tabid-2974/1445_read-52897/)
- › CFD4H2: Wasserstoff-Direktinblasung für effiziente Wasserstoffmotoren  
<https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/grundlagenforschung/cfd4h2>
- › CORAL-HD: Brennstoffzellen-Elektroden mit langer Lebensdauer für Nutzfahrzeuge  
<https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/grundlagenforschung/coral-hd>
- › DemAH: Mechanische Antriebsenergie aus Wasserstoff erzeugen  
<https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/grundlagenforschung/demah>
- › FC-RAT: Wie Brennstoffzellen für den Schwerlastverkehr altern  
<https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/grundlagenforschung/fc-rat>

## Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

### Technische Herausforderungen

Bei den unterschiedlichen Antriebsarten ergeben sich noch technischen Fragestellungen zu folgenden Themen:

- › Verbesserung der Energieeffizienz, etwa durch Gesamtantriebsstrang-/Fahrzeugoptimierung
- › Verbesserung der Materialeffizienz, beispielsweise durch die Reduktion des Iridium- und Platinbedarfs in Brennstoffzellen oder durch Forschung an Alternativen zu Fluorpolymeren
- › (Weiter-)Entwicklung von Motoren, die verschiedene Kraftstoffe wie Wasserstoff, Diesel oder Methan parallel verbrennen können
- › Optimierungen bei Wasserstoffverbrennungsmotoren, wie zum Beispiel bei Injektoren und Verbrennungsverläufen oder der Geräuschkulisse
- › Aktuell fallen bei der Produktion von notwendigen synthetischen Kraftstoffen auch Koppelprodukte wie Diesel an. Prozesse müssen so optimiert werden, dass der Anteil des Wunschprodukts möglichst hoch ist.
- › Nutzen von Synergien, etwa bei Transportkälte und Wasserstoffanwendungen
- › Minderung der Ruß- und Stickoxidentstehung bei Verbrennungsprozessen  
Sub-zero-Emissionen

## Akzeptanz

- › Wie wirkt sich die Nutzung von den Technologien auf die Akzeptanz potenzieller Nutzer\*innen und Betreiberfirmen aus?
- › Unter anderem sollten Akzeptanz und Praxistauglichkeit von batterieelektrischen Schwerlastfahrzeugen geprüft werden, um daraus abzuleiten, in welchen Bereichen die Direktelektrifizierung nicht sinnvoll ist oder nicht angenommen wird und Wasserstoff oder E-Fuels zum Einsatz kommen sollten.

## Verfügbarkeit von Treibstoffen

- › Kann die höhere Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien an vorteilhaften Standorten für die Produktion von Treibstoff (H<sub>2</sub> oder e-Fuels wie Methanol oder Ammoniak) genutzt werden?
- › Kann dies zu (systemdienlichen) Synergien führen?
- › Kann die einfachere Transportierbarkeit von Wasserstofffolgeprodukten entlegene, dafür aber besonders günstige Produktionsstandorte attraktiver machen?

## Welche Verteilungsinfrastrukturen müssen wann geschaffen werden?

- › Welche Schritte in der Erzeugung können wo kostengünstig realisiert werden?
- › Wo bestehen Zielkonflikte zwischen geostrategischen Interessen, Versorgungssicherheit und volkswirtschaftlicher Effizienz?
- › Gibt es regional unterschiedliche Bedürfnisse und Voraussetzungen bei den Abnehmern?

## Anwendbarkeit von E-Fuels auf Flottenemissionswerte

- › Es sollte geprüft werden, inwieweit Fahrzeughersteller E-Fuel-fähige Fahrzeuge in den Markt bringen und diese auf ihre Flottenemissionsgrenzwerte anrechnen können.
- › Müssen gegebenenfalls E-Fuels direkt vom Fahrzeughersteller vermarktet/vertrieben werden, um eine Anrechnung zu rechtfertigen?
- › Wie interagieren E-Fuels mit den Flottenemissionsgrenzwerten?
- › Können Hersteller von E-Fuels zum Beispiel über diesen Mechanismus subventioniert werden?

## Technologische Entwicklungen bei Nischenanwendungen

- › Vor allem in Nischenbereichen wie Baustellenfahrzeuge, Landmaschinen, Entstörungsfahrzeuge, Speziallogistik ist bislang nur schwer abzuschätzen, welche Technologie (Batterie versus Brennstoffzelle versus Wasserstoffmotor versus E-Fuels) sich in der Praxis durchsetzen wird.
- › Insbesondere bei Fahrzeugen mit niedriger Laufleistung und hohen Ansprüchen an Verfügbarkeit und Robustheit kann Verbrennungsmotoren eine große Bedeutung zukommen.

### PUBLIKATION

- › Wasserstoff-Kompass (2022): Wasserstoff im Mobilitätssektor  
[https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user\\_upload/img/news-und-media/dokumente/Meta-Analyse\\_Mobilitaet.pdf](https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Meta-Analyse_Mobilitaet.pdf)

# Handlungsoptionen Wasserstoff

## Brennstoffzellenantrieb

Ähnlich wie bei der batterieelektrischen Alternative treibt ein Elektromotor das Fahrzeug an. Die dafür notwendige elektrische Energie wird in einer Brennstoffzelleneinheit aus mehreren hundert Brennstoffzellen durch die chemische Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt. Emittiert wird dabei lediglich das Reaktionsprodukt Wasser. Eine leistungsstarke Batterie kann beim Anfahren und Beschleunigen unterstützen.

### STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG

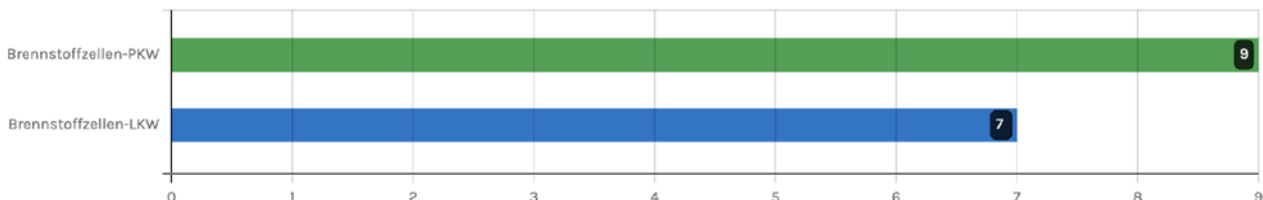


- › Im Rahmen des Round Table Schwerlasttransport herrschte unter Expert\*innen Einigkeit darin, dass sich die Direktelektrifizierung überall dort durchsetzen wird, wo sie einfach umzusetzen ist. Haupttreiber hierfür seien geringere Energiekosten durch die höhere Effizienz. Wo genau die Grenze zwischen einfach oder nicht umsetzbar verläuft, kann bislang allerdings nicht genau definiert werden.
- › Expert\*innen im Round Table Schwerlasttransport stimmten darin überein, dass bis 2030 Wasserstoff im Schwerlastverkehr kaum nachgefragt werden wird, da es an Wasserstoff und Fahrzeugen mangeln wird. Danach würden beide Antriebsarten einen Markt bedienen – Wasserstoff wahrscheinlich in Nischensegmenten.

## Technologiereifegrad

### Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad von Brennstoffzellen-PKW liegt bei 9, der von Brennstoffzellen-LKW bei 7.



## Voraussetzungen

- › Ausreichende Mengen Wasserstoff müssen zur Verfügung stehen, was vermutlich nicht allein mit heimischer Produktion erreicht werden kann. Importe sind daher notwendig.
- › Ein breit ausgebautes Netz von Wasserstofftankstellen wird benötigt.

## Vorteile

- › Die Brennstoffzelle erweitert die Liste der alternativen Antriebe und trägt somit dazu bei, dass Energieträger diversifiziert werden. Beim Brennstoffzellenantrieb wird lediglich Wasserdampf emittiert.
- › Brennstoffzellenantriebe sind durch die hohe Energiedichte von Wasserstoff langstreckentauglich.
- › Brennstoffzellen-Fahrzeuge senken die Lärmemissionen in den Städten.
- › Gerade der LKW-Verkehr auf der Langstrecke zeichnet sich durch einen vergleichsweise hohen Energieverbrauch aus. Wasserstoff kann hier die Energiedichte und Tankgeschwindigkeit liefern, die für batterieelektrische Lösungen herausfordernd sein können.
- › Brennstoffzellen-LKW haben die gleiche Nutzlast wie Diesel-LKW.

## Nachteile

- › Durch die Umwandlungsschritte von elektrischer Energie zu Wasserstoff und wieder zurück zu elektrischer Energie haben Brennstoffzellen-PKW nur einen Wirkungsgrad von circa 30 Prozent, wohingegen batterieelektrisch betriebene PKW einen Wirkungsgrad von circa 64 Prozent besitzen (well-to-wheel). <sup>[18]</sup>

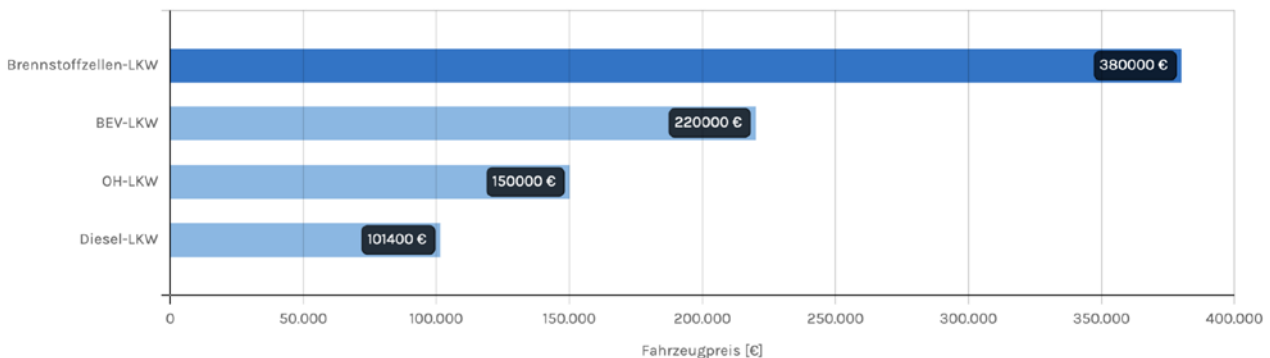
## Folgen

Sofern sowohl der Einsatz batterieelektrischer als auch mit Wasserstoff betriebener Fahrzeuge ermöglicht werden soll, wird ein umfassender doppelter Infrastrukturaufbau notwendig.

## Ökonomische Aspekte

### Fahrzeugpreis

Für einen 40-Tonner LKW mit Brennstoffzellenantrieb wird für 2025 ein Fahrzeugpreis in der Größenordnung von 380.000€ erwartet.<sup>[24]</sup>



Die Kosten für die Entwicklung und Herstellung der Brennstoffzellentechnologie sind noch relativ hoch. Dadurch sind BZ-Fahrzeuge teurer als Verbrennungsmotorfahrzeuge oder batterieelektrische Fahrzeuge. Zudem sind durch die großen Fahrdistanzen die Energiekosten bei Schwerlast-LKW deutlich relevanter als bei anderen Fahrzeugen. Durch die niedrigere Effizienz ist hier auch langfristig mit einem Kostennachteil gegenüber batterieelektrischen Lösungen zu rechnen.



Der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur, einschließlich Wasserstofftankstellen ist sehr teuer. Eine Wasserstofftankstelle mit einer Tankkapazität von einer Tonne Wasserstoff pro Tag (bei einer durchschnittlichen Betankung mit 33 Kilogramm entspricht dies 30 Betankungen am Tag) bei 2 bis 3 Betankungsplätzen kostet 1,5/2,5 Millionen Euro für eine Versorgung mit flüssigem beziehungsweise gasförmigem Wasserstoff.<sup>[30]</sup> Größere Tankstellen mit einer Tankkapazität von 8 Tonnen Wasserstoff pro Tag mit 6 bis 9 Betankungsplätzen liegen dann bei 11 beziehungsweise 17 Millionen Euro für eine Versorgung mit flüssigem beziehungsweise gasförmigem Wasserstoff.

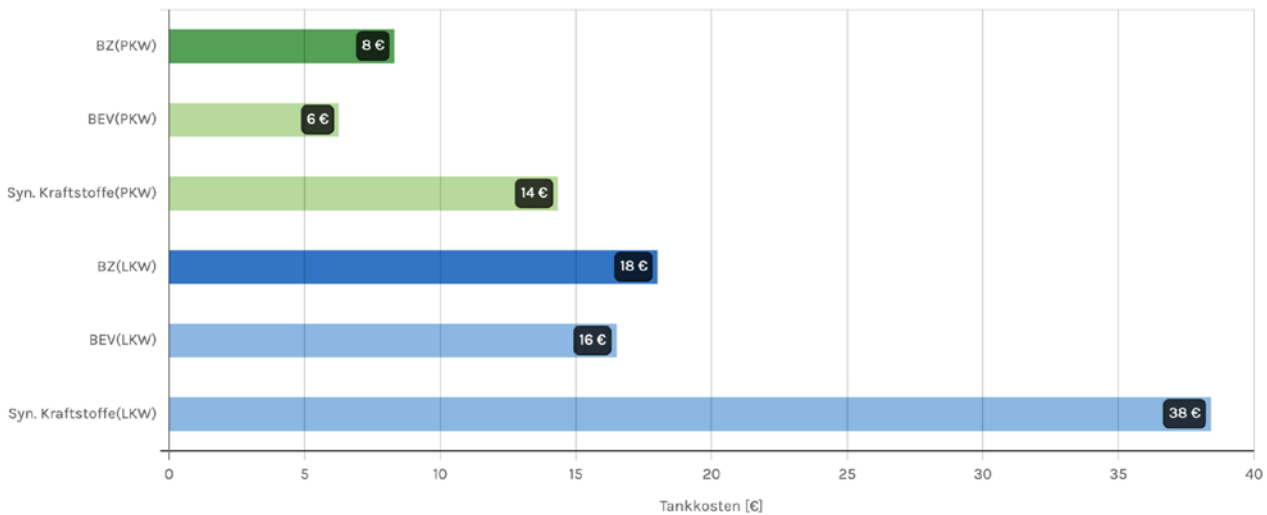
BZ-Fahrzeuge erfordern weniger Wartung im Vergleich zu Verbrennungsmotorfahrzeugen, was zu Einsparungen bei den Wartungskosten führen kann.

Bei aktuellen Wasserstoffpreisen an H<sub>2</sub>-Tankstellen von 13,85 Euro pro Kilogramm<sup>[27]</sup> betragen die Treibstoffkosten für den betrachteten Mittelklasse-PKW 8,30 Euro pro 100 Kilometer.

Für LKW betragen die aktuellen Wasserstoffpreise an H<sub>2</sub>-Tankstellen 12,85 Euro pro Kilogramm. Für eine Verkehrsleistung von 100 Tonnenkilometern schlagen die Transportkosten entsprechend mit circa 18 Euro zu Buche.

**Tankkosten bezogen auf eine Verkehrsleistung von 100 Kilometern (typischer Mittelklasse-PKW) bzw. 100 Tonnenkilometern (schweres Nutzfahrzeug).**

Für einen typischen Mittelklasse-PKW mit Brennstoffzellenantrieb belaufen sich die Tankkosten auf ca. 8,30 Euro pro 100 Kilometer und für ein schweres Nutzfahrzeug auf ca. 18 Euro pro 100 Kilometer.<sup>[27]</sup>



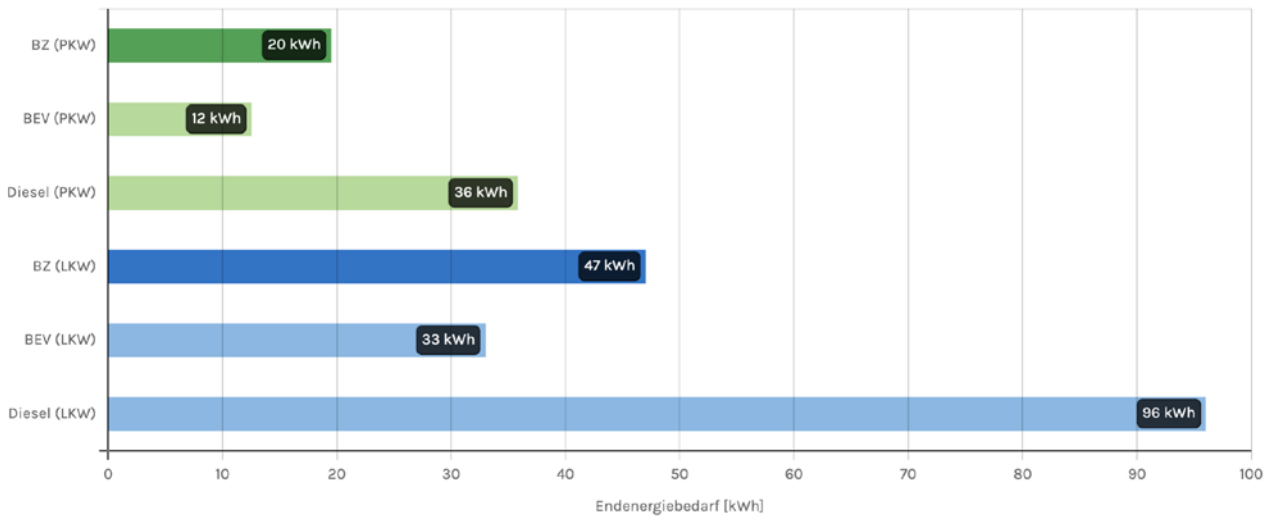
**Versorgungssicherheit**

Es sind keine nennenswerten Auswirkungen auf die gesamtsystemische Versorgungssicherheit bekannt.

## Endenergiebedarf

**Endenergiebedarf bezogen auf eine Verkehrsleistung von 100 Kilometern (typischer Mittelklasse-PKW) beziehungsweise 100 Tonnenkilometern (schweres Nutzfahrzeug).**

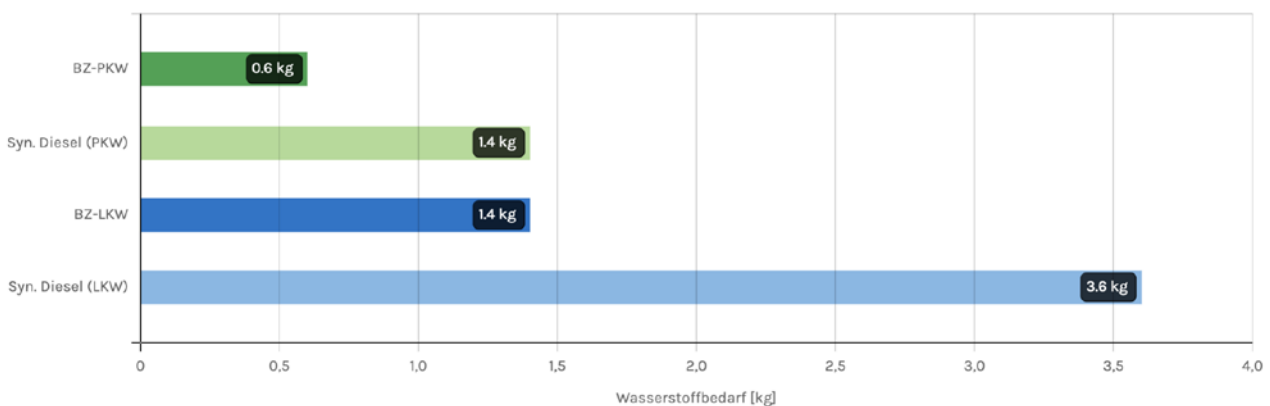
Für einen typischen Mittelklasse-PKW mit Brennstoffzellenantrieb wird nach 2025 ein Endenergiebedarf von 19,5 Kilowattstunden pro 100 Kilometer und für ein schweres Nutzfahrzeug von 47 Kilowattstunden pro 100 Tonnenkilometer erwartet.<sup>[17]</sup>



## Wasserstoffbedarfe

**Wasserstoffbedarf bezogen auf eine Verkehrsleistung von 100 Kilometern (typischer Mittelklasse-PKW) bzw. 100 Tonnenkilometern (schweres Nutzfahrzeug)**

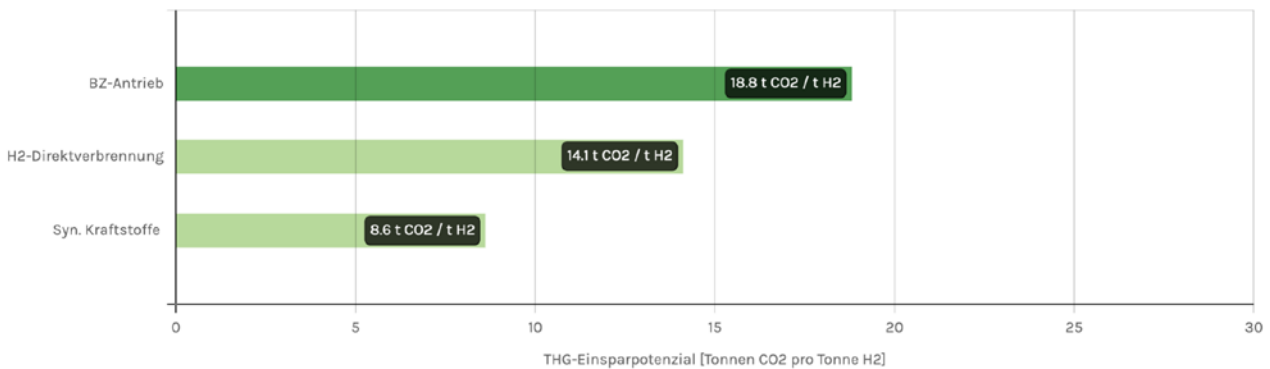
Aus den Energiebedarfen der beiden Fahrzeugtypen für die entsprechenden Verkehrsleistungen ergeben sich Wasserstoffbedarfe von 0,6 kg / 100 km (typischer Mittelklasse-PKW) bzw. 1,4 kg / 100 tkm (schweres Nutzfahrzeug)



## Minderungspotential

### Treibhausgasminderungspotenzial in Tonnen CO<sub>2</sub> pro Tonne Wasserstoff

Brennstoffzellen-Fahrzeuge können gegenüber Dieselfahrzeugen der gleichen Klasse 18,8 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Tonne H<sub>2</sub> einsparen



### Akteur\*innen

> Kraftfahrzeughersteller und -zulieferer, Tankstellenbetreiber

#### MASSNAHME

##### MASSNAHME

#### > Kommunale H<sub>2</sub>-Flottenversorgung

Kommunen oder kommunale Verbände können lokale Wasserstoffzentren bilden und ihre kommunalen Flotten (öffentlicher Verkehr, Müllabfuhr, Straßenreinigungsfahrzeuge etc.) auf Brennstoffzellenantriebe umstellen. Auf diese Weise wirken Kommunen als verlässliche und planbare Abnehmer für regionale Wasserstoffproduzenten und können so einen wichtigen Beitrag zum initialen Hochlauf der Wasserstoffproduktion leisten. Von den kommunalen Abnehmern nicht benötigter Wasserstoff kann an einer öffentlichen Tankstelle verkauft werden – zum Beispiel zur Betankung von Brennstoffzellen-LKW – und so zur Versorgungssicherheit im Logistikbereich beitragen. Kommunale Fahrzeuge können alternative Antriebe erfahrbar machen und so die lokale Akzeptanz dieser Technologien fördern.

##### INITIATOREN

> Kommunen, kommunale Verkehrsbetriebe, Stadtwerke

## Direktverbrennung von Wasserstoff

Neben der üblicherweise diskutierten Nutzung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle kann dieser alternativ auch in einem Wasserstoffmotor direktverbrannt werden. Dieser Prozess ist einem klassischen Verbrennungsmotor mit Kraftstoffdampf ähnlich. Fahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotoren werden aktuell nur für Spezialanwendungen diskutiert.

### STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG

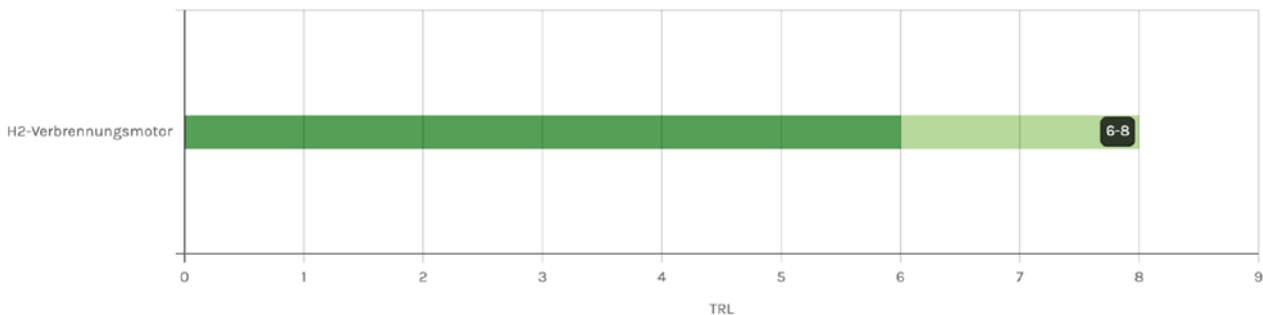


> Im Rahmen des Round Table zum Schwerlasttransport herrschte unter Expert\*innen Einigkeit darin, dass sich die Direktelektrifizierung überall dort durchsetzen wird, wo sie einfach umzusetzen ist. Haupttreiber hierfür seien geringere Energiekosten durch die höhere Effizienz. Wo genau die Grenze zwischen einfach oder nicht umsetzbar verläuft, kann bislang allerdings nicht genau definiert werden.

### Technologiereifegrad

#### Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad von H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotoren liegt bei 6 - 8.



### Voraussetzungen

- > Ausreichende Mengen Wasserstoff müssen zur Verfügung stehen, was vermutlich nicht allein mit heimischer Produktion erreicht werden kann. Importe sind daher notwendig.
- > Ein breit ausgebautes Netz von Wasserstofftankstellen wird benötigt.

## Vorteile

- › Die aktuelle Verbrennertechnik ist grundlegend bekannt und kann mit technischen Modifikationen weiter genutzt werden.
- › Abwärme kann über Abgase abgeführt werden, was die Kühlanforderungen im Vergleich zu Elektromotoren reduziert.
- › Als Abgase entstehen nur Wasserdampf und Stickoxide.
- › Die Direktverbrennung von Wasserstoff könnte einen leistungsstarken Antrieb für Fahrzeuge mit hohem Energiebedarf ermöglichen.
- › Im Vergleich zur Batterieladung kann die Wasserstoffbetankung eines Fahrzeugs schneller erfolgen. Dies kann für Spezialfahrzeuge von Vorteil sein, da es den Zeit- und Betriebsaufwand reduziert und eine effiziente Nutzung des Fahrzeugs ermöglicht.

## Nachteile

- › Bei der Direktverbrennung werden 41 Prozent der in Wasserstoff gespeicherten Energie in Bewegungsenergie umgesetzt. Dies ist deutlich weniger als bei einem Brennstoffzellenantrieb (54 Prozent).<sup>[28]</sup>
- › Lärm und NO<sub>x</sub>-Emissionen bleiben erhalten.
- › Wasserstoff kann gängige Schmierstoffe angreifen und zersetzen und hat selbst schlechte Schmiereigenschaften. Durch Keramikbauteile, die keine Schmierung erfordern, lässt sich dieser Nachteil umgehen.

## Folgen

Sofern sowohl der Einsatz batterieelektrischer als auch mit Wasserstoff betriebener Fahrzeuge ermöglicht werden soll, wird ein umfassender doppelter Infrastrukturaufbau notwendig.

## Ökonomische Aspekte

Die Wirtschaftlichkeit ist umstritten, da die Technologie voraussichtlich auch langfristig kaum im PKW oder LKW zum Einsatz kommen und somit eine Nischenanwendung bleiben wird.

## Versorgungssicherheit

Aufgrund der voraussichtlich geringen Bedarfe für die Direktverbrennung ist keine Auswirkung auf die Versorgungssicherheit mit Wasserstoff zu erwarten.

## Endenergiebedarf

Ein Antriebsstrang mit Wasserstoffmotor hat einen Wirkungsgrad von circa 41 Prozent und liegt damit unterhalb des Wirkungsgrades für einen Antriebsstrang mit Brennstoffzelle (54 Prozent).<sup>[28]</sup> Da der Einsatz von Wasserstoffmotoren nur für Spezialanwendungen diskutiert wird, hängt auch der Energiebedarf stark von der Art der Anwendung ab.

## Synthetische Kraftstoffe

Syn-Fuels oder auch E-Fuels sind Kraftstoffe, die mithilfe von erneuerbaren Energien hergestellt werden. Fragen rund um ihre Erzeugung werden unter den Raffinerien diskutiert. An dieser Stelle wird nur deren Einsatz im KFZ-Bereich betrachtet. Alternativen für Diesel und Benzin in KFZ-Anwendungen können entweder über die Fischer-Tropsch-Route oder aus Methanol über die Methanol-to-Gasoline-Route erzeugt und über die bestehende Infrastruktur verteilt werden. Sie sind chemisch nahezu identisch mit den bisherigen fossilen Pendanten und eignen sich daher unter anderem zur Defossilisierung der Fahrzeugbestandsflotte und des Schwerlastverkehrs. Darüber hinaus gibt es eine Reihe weiterer synthetischer Kraftstoffe (unter anderem Methanol, Dimethylether, Oxymethylenether), die aufgrund ihrer guten Verbrennungseigenschaften ebenfalls als synthetische Kraftstoffe für KFZ-Anwendungen geeignet wären.<sup>[33]</sup> Diese Alternativen bedürfen jedoch noch weiterer Anpassungen, haben bislang noch nicht die Marktreife in Deutschland erreicht und werden daher an dieser Stelle nicht weiter thematisiert.

### STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG



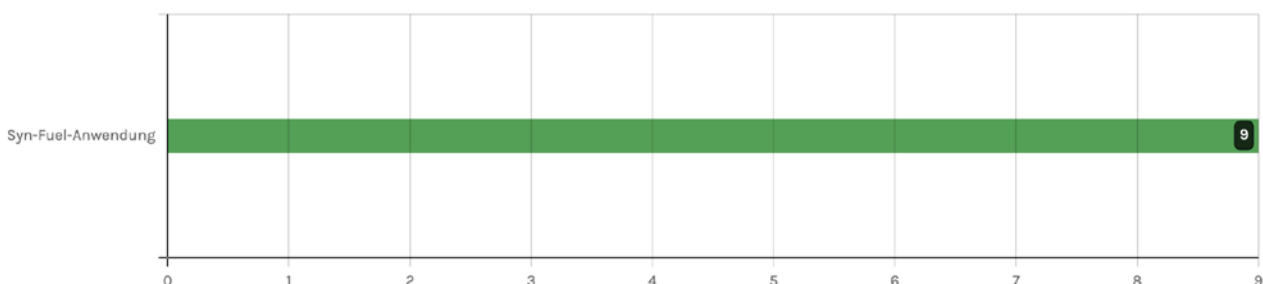
› Im Rahmen des Round Table Schwerlasttransport herrschte unter den Expert\*innen Einigkeit darin, dass sich die Direktelektrifizierung überall dort durchsetzen wird, wo sie einfach umzusetzen ist. Haupttreiber hierfür seien geringere Energiekosten durch die höhere Effizienz. Wo genau die Grenze zwischen einfach oder nicht umsetzbar verläuft, kann bislang allerdings nicht genau definiert werden.

### Technologiereifegrad

Während sich Anlagen zur Produktion synthetischer Kraftstoffe noch in der Pilotphase befinden, ist aufgrund der chemischen Ähnlichkeit zu Kraftstoffen, die heute im Einsatz sind, der Technologiereifegrad für den Einsatz synthetischer Kraftstoffe im Verkehr mit 9 zu bewerten.

#### Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad für die Anwendung von synthetischen Kraftstoffen in Fahrzeugen liegt bei 9: Sie sind chemisch identisch zu fossil-basierten Kraftstoffen im Einsatz.



### Voraussetzungen

› Skalierung der Prozesse und Anlagen zur industriellen Produktion von synthetischen Kraftstoffen.



## Vorteile

- › Synthetische Kraftstoffe sind eine einfache Möglichkeit, ohne KFZ-seitige Anpassungen die Bestandsflotte zu defossilisieren.
- › Synthetische Kraftstoffe beziehungsweise deren Vorprodukte (Methanol, Fischer-Tropsch-Crude) lassen sich gut transportieren. Ihre Produktion könnte daher kostengünstig dort erfolgen, wo ein hohes Potenzial für erneuerbare Energien vorhanden ist.<sup>[35]</sup>
- › Flüssige Kraftstoffe sind einfach lagerbar und haben eine hohe Energiedichte. Dadurch bieten sie kritischen Mobilitätsanwendungen eine hohe Resilienz im Krisenfall.

## Nachteile

- › Bis mindestens 2030 wird die Verfügbarkeit synthetischer Kraftstoffe sehr limitiert sein.<sup>[31]</sup>
- › Hohe Betriebskosten relativ zur Direktelektrifizierung aufgrund des hohen Strombedarfs
- › Ruß-, NO<sub>x</sub>- sowie lokale CO<sub>2</sub>-Emissionen bleiben zumindest in Teilen erhalten (können allerdings durch gängige Technik wie Rußpartikelfilter und Nachbehandlung limitiert werden).
- › Pfadabhängigkeiten könnten im Bereich Landwirtschaft, Bergbau und Feuerwehr den Wechsel zu kostengünstigeren beziehungsweise klimaschonenderen Alternativen blockieren.

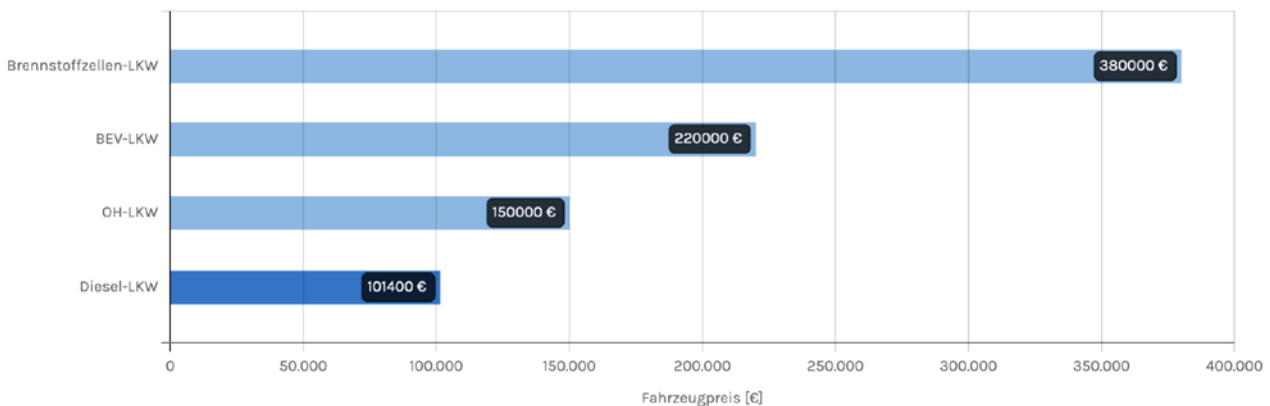
## Folgen

- › Aufgrund der höheren Produktionskosten steigen die Kraftstoffpreise.

## Ökonomische Aspekte

### Fahrzeugpreis

Für einen 40-Tonner LKW mit Diesel-Antrieb wird für 2025 ein Fahrzeugpreis in der Größenordnung von 101.400 Euro erwartet.<sup>[24]</sup>

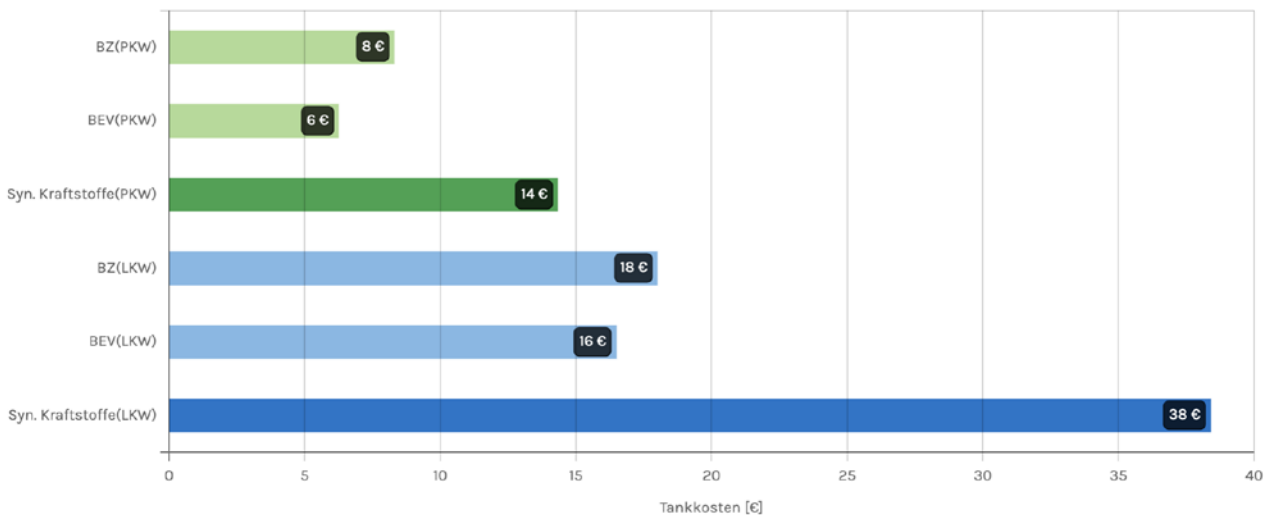


Zusätzliche Investitionen in den Aufbau einer Tankinfrastruktur sind im Gegensatz zu batterieelektrischen oder Wasserstoffantrieben nicht notwendig: Aufgrund der chemischen Ähnlichkeit zu bereits auf dem Markt käuflichen Kraftstoffen kann die bestehende Infrastruktur auch für synthetische Kraftstoffe verwendet werden.

Die Kosten für die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe werden wesentlich durch Energiekosten bestimmt: Sie machen knapp die Hälfte der Gesamtkosten aus. Investitionskosten für die Anlagen, Betriebskosten, Kosten für die Veredelung des Fischer-Tropsch-Crudes sowie Transportkosten machen den Rest aus.

**Tankkosten bezogen auf eine Verkehrsleistung von 100 Kilometern (typischer Mittelklasse-PKW) beziehungsweise 100 Tonnenkilometern (schweres Nutzfahrzeug).**

Für einen typischen Mittelklasse-PKW würden sich aktuell Bereitstellungskosten für synthetischen Diesel im Bereich von 10,10 bis 18,22 Euro 100 Kilometer (im Mittel 14,32 Euro pro 100 Kilometer), für ein schweres Nutzfahrzeug im Bereich von 27,10 bis 48,90 Euro pro 100 Tonnenkilometer (im Mittel 38,40 Euro pro 100 Tonnenkilometer) ergeben.<sup>[32]</sup> Hinzu kämen noch staatliche Abgaben.



### Versorgungssicherheit

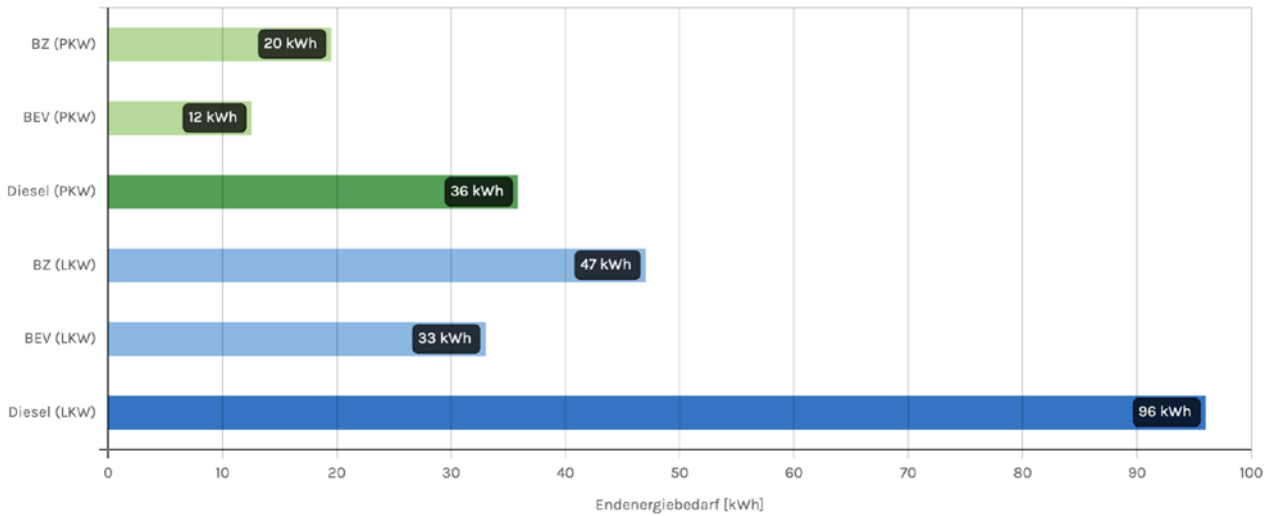
Syn-Fuels sind gut lagerbar und damit für die Energieversorgung im Katastrophenfall besonders sinnvoll.

Synthetische Kraftstoffe sind aktuell noch nicht großskalig auf dem Markt zu erwerben. Nach einer Studie des Potsdam Instituts für Klimafolgenforschung genügen die bis 2030 erwarteten globalen Erzeugungskapazitäten nicht, um die deutschen Bedarfe an synthetischen Kraftstoffen zu decken.<sup>[31]</sup>

## Endenergiebedarf

**Endenergiebedarf bezogen auf eine Verkehrsleistung von 100 Kilometern (typischer Mittelklasse-PKW) bzw. 100 Tonnenkilometern (schweres Nutzfahrzeug).**

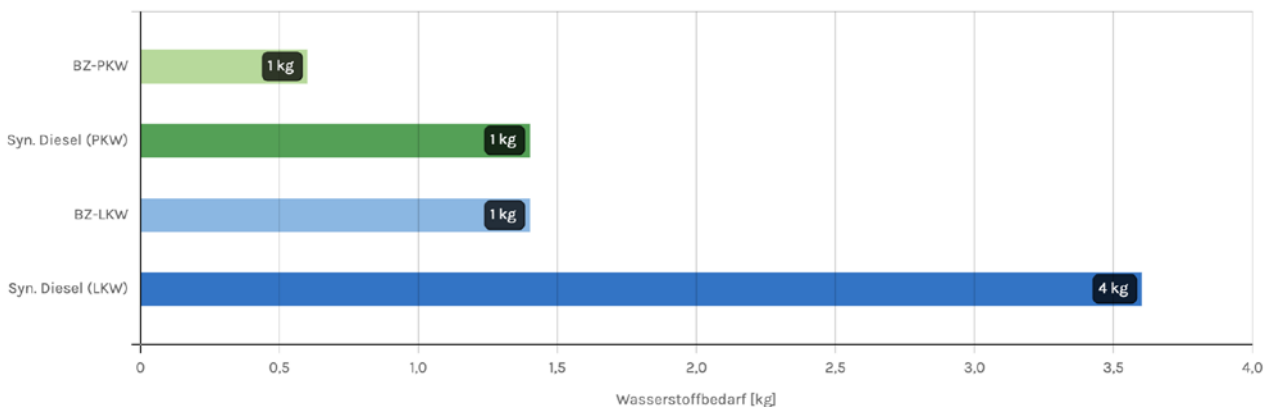
Für einen typischen Mittelklasse-PKW mit Dieselmotor wird nach 2025 ein Endenergiebedarf von 35,8 kWh (entspricht etwa 3,8 Liter Diesel) pro 100 Kilometer, für ein schweres Nutzfahrzeug von 96 kWh (entspricht 10 Liter Diesel) pro 100 Tonnenkilometer erwartet.<sup>[17]</sup>



## Wasserstoffbedarfe

**Wasserstoffbedarf bezogen auf eine Verkehrsleistung von 100 Kilometern (typischer Mittelklasse-PKW) bzw. 100 Tonnenkilometern (schweres Nutzfahrzeug)**

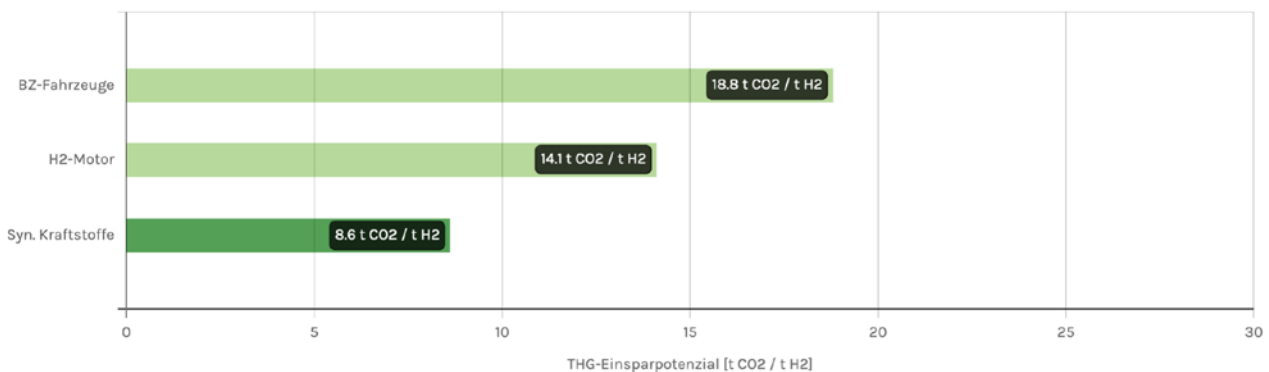
Für die Produktion von einem Kilogramm synthetischem Kraftstoff werden über die Fischer-Tropsch-Route etwa 0,45 Kilogramm Wasserstoff benötigt.<sup>[32]</sup> Aus dem Energiebedarf der beiden Fahrzeugtypen ergibt sich ein H<sub>2</sub>-Bedarf von etwa 1,4 kg / 100 km für den PKW bzw. von 3,6 kg / 100 tkm für das schwere Nutzfahrzeug.



## Minderungspotential

### Treibhausgas-minderungspotenzial in Tonnen CO<sub>2</sub> pro Tonne H<sub>2</sub>

Abhängig von der Kohlenstoffquelle für die Ausgangsstoffe der synthetischen Kraftstoffe (Fischer-Tropsch-Crude oder Methanol), ist das Einsparpotenzial sehr unterschiedlich groß: Kommt der Kohlenstoffdioxid aus industriellen Punktquellen und wird erneuerbarer Strom für die Synthese eingesetzt, so ist die CO<sub>2</sub>-Intensität des synthetischen Kraftstoffs nahezu null.<sup>[17]</sup> Es können also fast alle Emissionen des fossilen Diesels eingespart werden. Das CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial liegt entsprechend bei 121 g CO<sub>2</sub> / km<sup>[17]</sup> bzw. auf den eingesetzten Wasserstoff bezogen bei 8,6 t CO<sub>2</sub> / t H<sub>2</sub>. Kommen biogene Kohlenstoffquellen zum Einsatz, wirkt der synthetische Kraftstoff als Kohlenstoffsenke und das Treibhausgas-minderungspotenzial ist noch deutlich höher.



### Akteur\*innen

Abhängig vom Anwendungsbereich entweder

- > Bundesregierung (Militär)
- > lokale Verwaltungen (Technisches Hilfswerk, Feuerwehr)
- > private Akteur\*innen (Landwirtschaft, Bergbau)
- > Raffinerien
- > Kraftfahrzeughersteller und -zulieferer
- > Tankstellenbetreiber

### MASSNAHMEN

#### MASSNAHME

#### > Vernetzung und Zusammenarbeit mit Drittstaaten

Synthetische Kraftstoffe können für die Defossilisierung der Fahrzeugbestandsflotte eingesetzt werden. Da ihre Verfügbarkeit jedoch bis circa 2030 stark limitiert sein wird, ist auch eine politische Vernetzung und Zusammenarbeit mit Drittstaaten wichtig, um an größere Mengen synthetischer Kraftstoffe kommen zu können.

## MASSNAHME

**> Ausgestaltung eines Importkriterienkatalogs**

Um synthetische Kraftstoffe beispielsweise in der Bestandsflotte einsetzen zu können, werden große Mengen erneuerbaren H<sub>2</sub> beziehungsweise seiner Derivate importiert werden müssen. Aufgrund der Gefahr auf der einen Seite einer Festigung nicht nachhaltiger H<sub>2</sub>-Erzeugungspfade und auf der anderen Seite einer Verhinderung des H<sub>2</sub>-Hochlaufs ist die Gestaltung eines Katalogs an (Nachhaltigkeits-)Kriterien für Importe von wesentlicher Bedeutung.

## MASSNAHME

**> Zertifizierung von Wasserstoff und seinen Derivaten**

Damit heimisch erzeugte und importierte synthetische Kraftstoffe wettbewerbsfähig werden, helfen Zertifizierungen, die ihren Beitrag zur Treibhausgasminde rung im Straßenverkehrssektor belegen.

## Handlungsoptionen Andere Technologien

### Batterieelektrische Antriebe und Plug-in-Hybride

Ähnlich wie bei Brennstoffzellenfahrzeugen treibt bei der batterieelektrischen Lösung ein Elektromotor das Fahrzeug an. Die dafür notwendige Energie stellt hier eine Batterie zur Verfügung.

## STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG

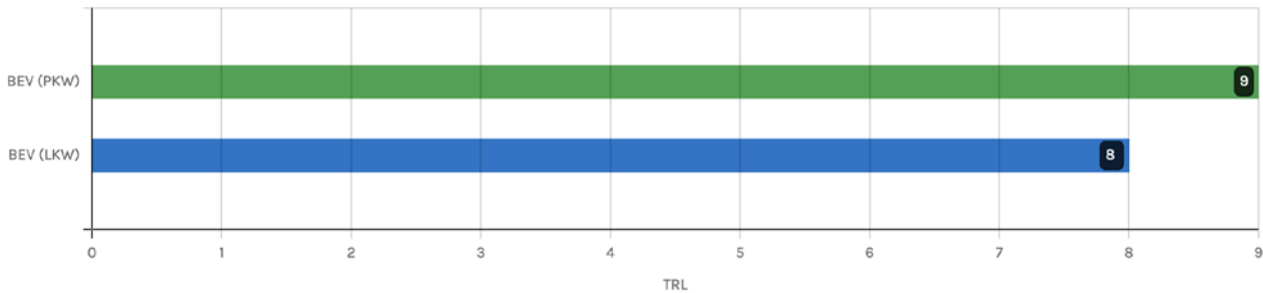


> Im Rahmen des Round Table Schwerlasttransport herrschte unter Expert\*innen Einigkeit darin, dass sich die Direktelektrifizierung überall dort durchsetzen wird, wo sie einfach umzusetzen ist. Haupttreiber hierfür seien geringere Energiekosten durch die höhere Effizienz. Wo genau die Grenze zwischen einfach oder nicht umsetzbar verläuft, kann bislang allerdings nicht genau definiert werden.

## Technologiereifegrad

### Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad von batterieelektrischen PKW liegt bei 9, von LKW bei 8.



### Voraussetzungen

- › Durch batterieelektrische Antriebe wird der Strombedarf des Verkehrs deutlich steigen. Das Stromnetz muss entsprechend optimiert und verstärkt und gegebenenfalls ausgebaut werden.
- › Eine Ladeinfrastruktur muss auf- beziehungsweise weiter ausgebaut werden. Dazu können elektrische Megawatt-Charging-Systeme mit der entsprechenden Anbindung an die Stromnetze und Umspannwerke gehören.
- › Die Gewinnung der für die Batterien relevanten Rohstoffe (wie zum Beispiel Lithium und Kobalt) muss nachhaltig erfolgen.

### Vorteile

- › Batterieelektrische Antriebe zeichnen sich durch eine hohe Energieeffizienz (Wirkungsgrad) aus.
- › Batterieelektrische Antriebe senken die Lärmemissionen in den Städten.
- › Sie weisen niedrige Betriebskosten auf, da der Energiebedarf gering ist. Batterieelektrische Antriebe besitzen weniger bewegliche Teile. Dadurch reduziert sich der Wartungsaufwand (Ölwechsel, Zündkerzenwechsel, Kupplungsreparatur etc.).
- › Batterieelektrische Antriebe können zur Stromnetzstabilisierung beitragen, indem sie als Energiespeicher dienen und überschüssige Energie aufnehmen und bei Bedarf wieder ins Netz einspeisen (Vehicle to Grid: V2G).<sup>[20]</sup> Grundsätzlich kann, mit kleineren infrastrukturellen Erweiterungen, das vorhandene Stromnetz genutzt werden. Für den initialen Hochlauf von batterieelektrischen Antrieben ist also keine neue Infrastruktur notwendig.
- › batterieelektrische Antriebe können im Fall von Stromausfällen die Notversorgung des eigenen Haushaltes sicherstellen (Vehicle to Home, V2H).



## Nachteile

› Zumindest initial sind einige Anwendungen aufgrund von spezifischen Anforderungen wie langen Strecken, schwerer Lastenbeförderung oder kurzen Betankungszeiten kaum rein batterieelektrisch umsetzbar, da die derzeitige Batterietechnologie Anforderungen in Bezug auf Reichweite, Ladeinfrastruktur oder Energiedichte noch nicht vollständig erfüllen kann.

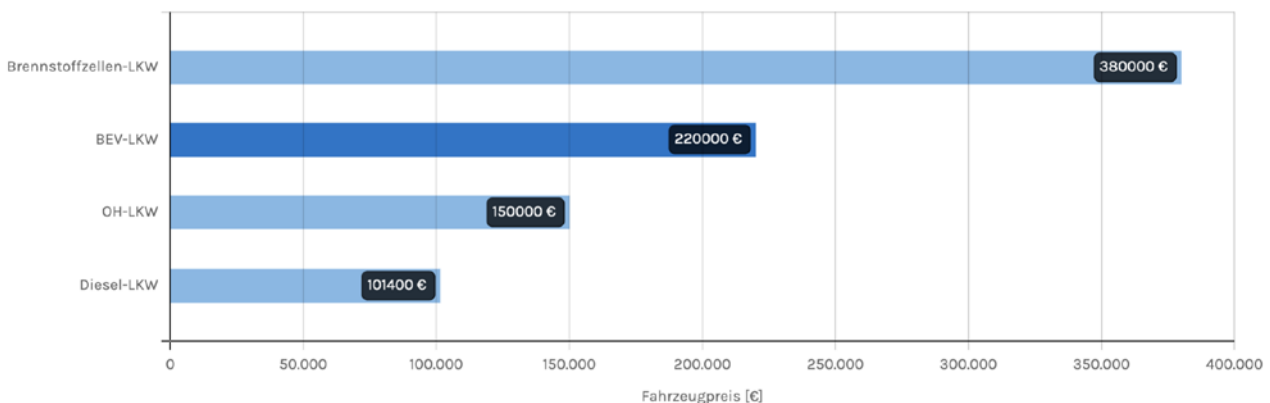
## Folgen

› Keine betriebsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen: Selbst wenn batterieelektrische Fahrzeuge mit fossilem Strom betrieben werden, bleiben sie lokal emissionsfrei, da sie keine direkten Emissionen produzieren. Somit kann die Luftqualität in Städten und Gemeinden verbessert werden.

## Ökonomische Aspekte

### Fahrzeugpreis

Für einen 40-Tonner LKW mit batterieelektrischem Antrieb wird für 2025 ein Fahrzeugpreis in der Größenordnung von 220.000 € erwartet.<sup>[24]</sup>



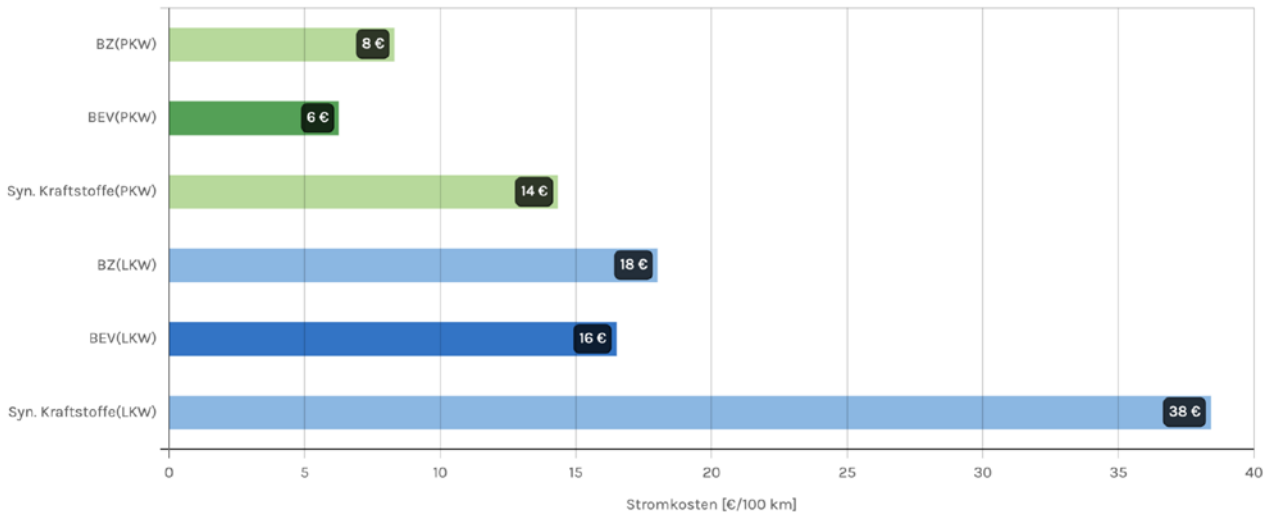
Batterieelektrische Fahrzeuge sind in den meisten Fällen voraussichtlich die wirtschaftlichste CO<sub>2</sub>-freie Option im Straßenverkehr, vor allem mit Blick auf die Betriebskosten.

Der Ausbau der Infrastruktur für das Laden von batterieelektrischen Fahrzeugen ist im Vergleich zur Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur oder zur Produktion und Verteilung von Syn-Fuels kostengünstiger und erfordert weniger komplexe Technologien.

Technisch fällt die Komplexität eines Elektrofahrzeugs aufgrund der deutlich kleineren Anzahl an Bauteilen geringer aus als die eines Verbrenners, was entsprechend den Produktionsaufwand und somit auch Arbeitskräfte bei Zulieferern reduziert.<sup>[9]</sup> Dem stehen die neu entstehenden Arbeitsplätze im Bereich der Batteriezellfertigung gegenüber. Die bilanziellen Berechnungen für die Entwicklung der Beschäftigtenzahlen reichen von 410.000 verlorenen Arbeitsplätzen<sup>[6]</sup> bis zu keinerlei Veränderung in quantitativer Hinsicht.<sup>[7]</sup>

**Beladekosten**

Für einen typischen batteriebetriebenen Mittelklasse-PKW belaufen sich die Stromkosten an einer öffentlichen Ladesäule auf ca. 6,25€ / 100 km.



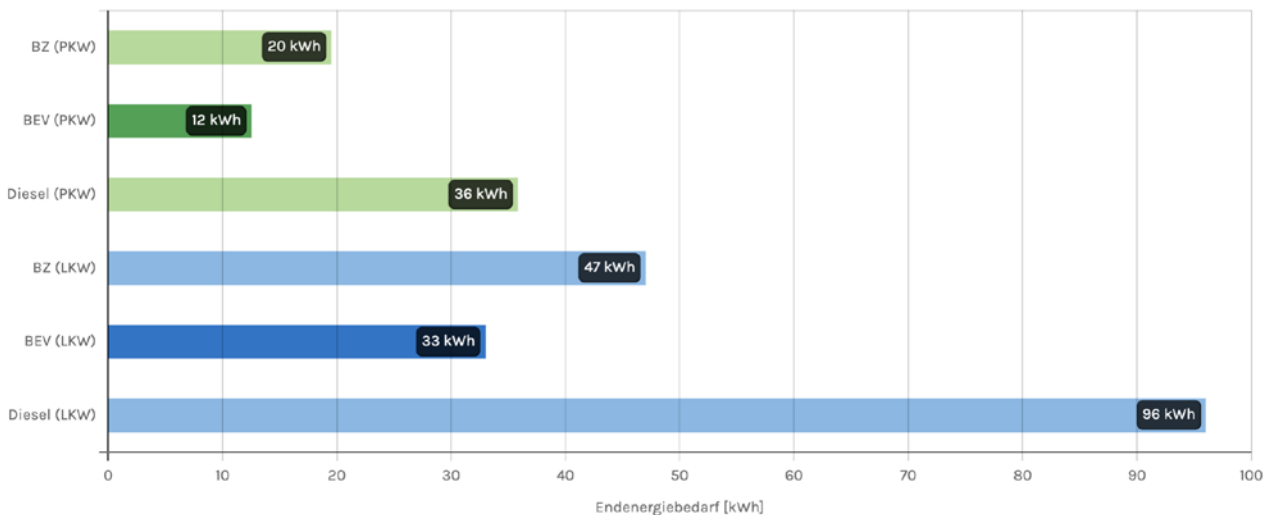
**Versorgungssicherheit**

Bei ungesteuertem Laden droht eine Überlastung des Stromnetzes. Bei gesteuertem oder bidirektionalem Laden ist eine Nettoentlastung der Stromnetze wahrscheinlich, da Stromerzeugung und -verbrauch besser aufeinander abgestimmt werden können.

**Endenergiebedarf**

**Endenergiebedarf bezogen auf eine Verkehrsleistung von 100 Kilometern (typischer Mittelklasse-PKW) beziehungsweise 100 Tonnenkilometern (schweres Nutzfahrzeug).**

Für einen typischen Mittelklasse-PKW mit batterieelektrischem Antrieb wird nach 2025 ein Endenergiebedarf von 12,5 Kilowattstunden pro 100 Kilometer, für ein schweres Nutzfahrzeug mit batterieelektrischem Antrieb von 33 Kilowattstunden pro 100 Tonnenkilometer erwartet.<sup>[17]</sup>



### Minderungspotential

Bezogen auf den Endenergieeinsatz können durch batterieelektrische Fahrzeuge gegenüber einem ähnlichen Fahrzeug mit Diesel-Antrieb 0,9 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Kilowattstunde eingespart werden.

### Akteur\*innen

- > Original Equipment Manufacturers (OEM: Hersteller von Originalteilen)
- > Verteilnetzbetreiber
- > Ladeinfrastrukturbetreiber
- > Energieunternehmen,
- > Städte
- > Grundstückseigentümer\*innen

### Oberleitungshybrid-LKW (OH-LKW)

Oberleitungsladen, auch dynamisches Laden von LKW genannt, verfolgt die Idee, den elektrifizierten LKW während der Fahrt zu laden. Der LKW benötigt dazu einen Stromabnehmer. Aktuell werden drei Pilotprojekte entlang von Bundesautobahnen mit einer Länge von je circa fünf Kilometern im Versuchsbetrieb getestet.<sup>[16]</sup>

#### STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG

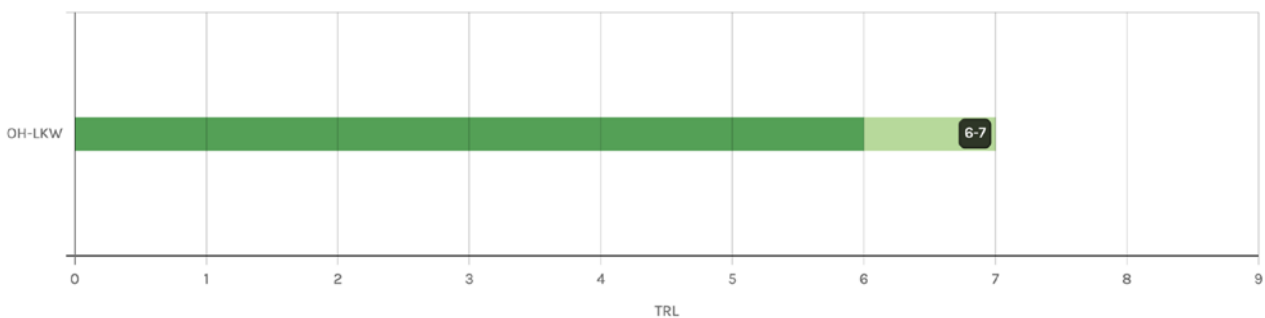


> Im Rahmen des Round Table Schwerlasttransport herrschte unter Expert\*innen Einigkeit darin, dass sich die Direktelektrifizierung überall dort durchsetzen wird, wo sie einfach umzusetzen ist. Haupttreiber hierfür seien geringere Energiekosten durch die höhere Effizienz. Wo genau die Grenze zwischen einfach oder nicht umsetzbar verläuft, kann bislang allerdings nicht genau definiert werden.

### Technologiereifegrad

#### Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad von Oberleitungshybrid-LKW liegt bei 5.



### Voraussetzungen

- > Für den Einsatz von Oberleitungs-LKW sind entsprechende Oberleitungen entlang der Autobahnabschnitte erforderlich.
- > Überlegungen und Planungen sind in den europäischen Kontext einzubetten.

### Vorteile

- > Das Laden ist während der Fahrt möglich. Der Ladesäulenausbau könnte somit reduziert werden, da längere Strecken ohne Zwischenstopp zurückgelegt werden können.

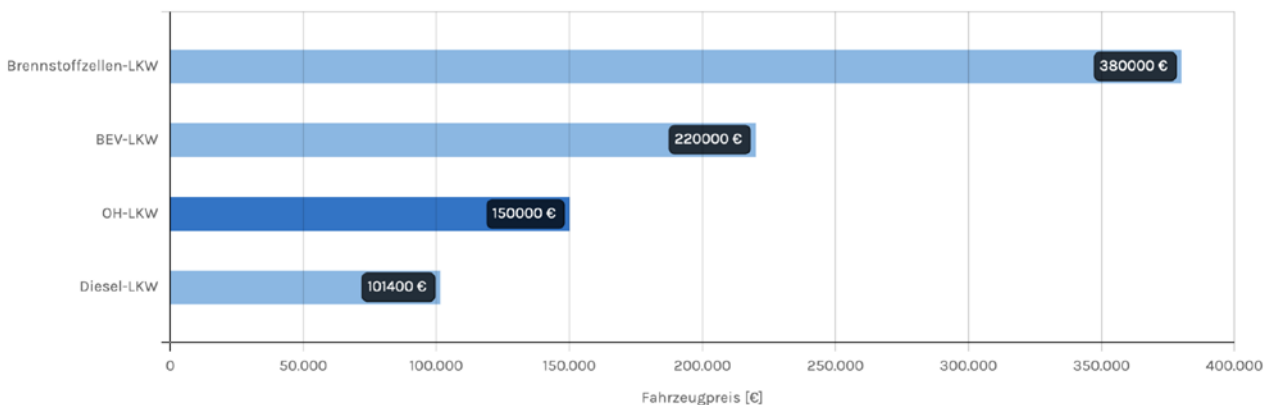
### Nachteile

- > Der Bau von Oberleitungen erfordert hohe Infrastrukturkosten (zwei Millionen Euro pro Kilometer beidseitig im Jahr 2030).<sup>[24]</sup>
- > Das Laden in einem speziellen LKW-Lade-Hub ist während der notwendigen Standzeit erheblich günstiger.
- > Durch die Stromabnehmer entsteht eine einspurige Höhenbegrenzung auf den genutzten Autobahnabschnitten, die gegebenenfalls hinderlich bei Sondertransporten werden kann.
- > Die Oberleitungen können das Landen von Rettungshubschraubern nach schweren Verkehrsunfällen einschränken.

### Ökonomische Aspekte

#### Fahrzeugpreis

Für einen 40-Tonner Oberleitungs-LKW wird für das Jahr 2025 ein Fahrzeugpreis in der Größenordnung von 150.000 Euro erwartet.<sup>[24]</sup>



### Versorgungssicherheit

Im Vergleich zum Status quo bedeutet eine Elektrifizierung des straßengebundenen Verkehrs, dass durch die höhere Effizienz der Elektroantriebe der Primärenergiebedarf im Gesamtsystem sinkt. Zudem würde der Strom zunehmend auf der Basis erneuerbarer Energien innerhalb Deutschlands beziehungsweise Europas erzeugt. Dadurch wären weniger Energieimporte von außerhalb Europas notwendig, was der Versorgungssicherheit zugutekäme.



#### AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

- > ELISA – eHighway Hessen ELISA – eHighway Hessen  
<https://www.autobahn.de/ehighway>
- > eHighway.SH  
<https://www.ehighway-sh.de/de/>
- > EWayBW  
<https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/politik-zukunft/elektromobilitaet/ewaybw>

#### Akteur\*innen

- > Autobahn AG
- > Stromnetzbetreiber
- > LKW-Hersteller

## Literatur

- [1] **Wasserstoffkompass (2022):** Wasserstoff im Mobilitätssektor.  
[https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user\\_upload/img/news-und-media/dokumente/Meta-Analyse\\_Mobilitaet.pdf](https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Meta-Analyse_Mobilitaet.pdf)
- [2] **Umweltbundesamt:** Klimaschutz im Verkehr, zuletzt aufgerufen am: 24.07.2023.  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/klimaschutz-im-verkehr>
- [3] **Umweltbundesamt:** Fahrleistungen, Verkehrsleistung und Modal Split in Deutschland, zuletzt aufgerufen am: 24.07.2023.  
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split>
- [4] **Umweltbundesamt:** Emissionen des Verkehrs, zuletzt aufgerufen am: 24.07.2023.  
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs>
- [5] **Studie:** Wandel zur Elektromobilität kostet unter dem Strich rund 180.000 Arbeitsplätze, 01.07.2021, WirtschaftsWoche. <https://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/arbeitsmarkt-studie-wandel-zur-elektromobilitaet-kostet-unter-dem-strich-rund-180-000-arbeitsplaetze/27381704.html>
- [6] **Buchenau, Martin-W., Menzel, Stefan und Specht, Frank, 13.01.2020:** Umstellung auf E-Mobilität gefährdet 410.000 Arbeitsplätze, Handelsblatt.  
<https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/autoindustrie-umstellung-auf-e-mobilitaet-gefaehrdet-410-000-arbeitsplaetze/25405230.html>
- [7] **Becker, Andreas, 24.12.2020 Studie:** Elektromobilität doch kein Jobkiller, Deutsche Welle. <https://www.dw.com/de/studie-elektromobilit%C3%A4t-doch-kein-jobkiller/a-56043272>
- [8] **Fraunhofer ISI:** Langfristszenarien 3, zuletzt aufgerufen am: 24.07.2023.  
<https://www.langfristszenarien.de/>
- [9] **Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes NRW:** Vergleich Verbrenner vs. Elektro, zuletzt aufgerufen am: 24.07.2023.  
<https://www.elektromobilitaet.nrw/infos/e-auto/vergleich/>
- [10] **Umweltbundesamt:** Emissionsdaten, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023.  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten>
- [12] **Europäische Umweltagentur ( EEA ):** Greenhouse gas emissions by source sector, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV\\_AIR\\_GGE\\_\\_\\_custom\\_4357651/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AIR_GGE___custom_4357651/default/table?lang=en)
- [13] **Nationale Plattform Zukunft der Mobilität – Arbeitsgruppe 2:** Einsatzmöglichkeiten unter realen Rahmenbedingungen, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. [https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/06/NPM-AG-2\\_Einsatzm%C3%B6glichkeiten-unter-realen-Rahmenbedingungen.pdf](https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/06/NPM-AG-2_Einsatzm%C3%B6glichkeiten-unter-realen-Rahmenbedingungen.pdf)
- [14] **SWR:** Stadt setzt auf Nachhaltigkeit – Mainz hat wasserstoffbetriebenes Müllfahrzeug. <https://www.swr.de/swraktuell/rheinland-pfalz/mainz/wasserstoffbetriebenes-muellauto-fuer-mainz-100.html>
- [15] **hessenschau, 15.12.22:** Wiesbaden schafft Wasserstoffbusse ab – und kauft Dieselbusse <https://www.hessenschau.de/wirtschaft/wiesbaden-schafft-wasserstoffbusse-ab--und-kauft-dieselbusse-v4,wasserstoff-busse-wiesbaden-100.html>



- [16] **Plötz et al. (2021):** Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr Hochleistungsschnelllader und Oberleitung im Vergleich – ein Diskussionspapier. [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/BOLD\\_Truck\\_charging\\_discussion%20paper.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/BOLD_Truck_charging_discussion%20paper.pdf)
- [17] **Prussi et al. (2020):** JEC Well-To-Wheels report v5, EUR 30284 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg. [www.doi.org/10.2760/100379](http://www.doi.org/10.2760/100379)
- [18] **TÜV NORD:** Wirkungsgrad, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://www.tuev-nord.de/de/privatkunden/verkehr/auto-motorrad-caravan/elektromobilitaet/wirkungsgrad/>
- [19] **AVL und ZSW (2021):** Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. e-mobil BW, Stuttgart. [https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie\\_H2-Systemvergleich.pdf](https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf)
- [20] **Nationale Plattform Zukunft der Mobilität – AG 5 (2020):** Factsheet »Vehicle to Grid« – Kundennutzen und Netzintegration. [https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/10/201012\\_NPM\\_AG5\\_V2G\\_final.pdf](https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/10/201012_NPM_AG5_V2G_final.pdf)
- [21] **Die Autobahn GmbH des Bundes:** eHighway ELISA, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://www.autobahn.de/ehighway-elisa>
- [22] **eHighway.SH:** Der eHighway in Schleswig-Holstein ist betriebsbereit, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://ehighway-sh.de/der-ehighway-in-schleswig-holstein-ist-betriebsbereit/>
- [23] **Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg:** eWayBW, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/politik-zukunft/elektromobilitaet/ewaybw>
- [24] **Nationale Plattform Zukunft der Mobilität – AG 1 (2020):** Infrastrukturkosten für die Investitionen der VMK. [https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/12/NPM\\_AG1\\_Werkstattbericht\\_Nutzfahrzeuge.pdf](https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/12/NPM_AG1_Werkstattbericht_Nutzfahrzeuge.pdf)
- [25] **Rennert, David, 03.11.2022:** Die größte Emissionsquelle, die in den Klimabilanzen fehlt: Das Militär, Der Standard. <https://www.derstandard.de/story/2000140472629/die-groesste-emissionsquelle-die-in-den-klimabilanzen-fehlt-das-militaer>
- [26] **Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2022):** Verkehr in Zahlen 2022/2023. [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2022-2023-pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2022-2023-pdf.pdf?__blob=publicationFile)
- [27] **H<sub>2</sub>Mobility:** Keep on rolling – Weiterfahren mit Wasserstoff, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://h2-mobility.de/unsere-tankstellen/>
- [28] **Handwerker, Michael; Wellnitz, Jörg und Marzbani, Hormoz (2021):** Comparison of Hydrogen Powertrains with the Battery Powered Electric Vehicle and Investigation of Small-Scale Local Hydrogen Production Using Renewable Energy Hydrogen, 2, 1, 76–100. <https://doi.org/10.3390/hydrogen2010005>
- [29] **Umweltbundesamt:** Umweltkosten des Verkehrs, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#umweltkosten-des-verkehrs>
- [30] **Ludwig-Bölkow-Systemtechnik und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2023):** H<sub>2</sub>-Infrastruktur für Nutzfahrzeuge im Fernverkehr. e-mobil BW, Stuttgart. [https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Studie\\_H2\\_Infrastruktur\\_fuer\\_Nutzfahrzeuge\\_im\\_Fernverkehr.pdf](https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Studie_H2_Infrastruktur_fuer_Nutzfahrzeuge_im_Fernverkehr.pdf)

- [31] **Ueckerdt, Falko und Odenweller, Adrian (2023):** E-Fuels: Aktueller Stand und Projektionen. Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam. [https://www.pik-potsdam.de/members/Ueckerdt/E-Fuels\\_Stand-und-Projektionen\\_PIK-Potsdam.pdf](https://www.pik-potsdam.de/members/Ueckerdt/E-Fuels_Stand-und-Projektionen_PIK-Potsdam.pdf)
- [32] **Kreidelmeyer et al. (2020):** Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Prognos AG, Schweiz. [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Studien/transformationpfade-fuer-strombasierte-energietraeger.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Studien/transformationpfade-fuer-strombasierte-energietraeger.pdf?__blob=publicationFile)
- [33] **DECHEMA:** NormAKraft – Normkonformität alternativer Kraftstoffe, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://dechema.de/normakraft-path-123211,124930.html>
- [34] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz:** E-Lkw: Klimafreundlicher Schwerlastverkehr, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://www.bmu.de/faqs/e-lkw-klimafreundlicher-schwerlastverkehr>
- [35] **Staiß et al. (2022):** Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030. Energiesysteme der Zukunft ESYS, acatech, München. <https://www.acatech.de/publikation/wasserstoff/download-pdf?lang=de>
- [36] **Nationale Plattform Zukunft der Mobilität – AG 5 (2021):** Infrastruktur für die Wasserstoffmobilität. [https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/07/NPM\\_AG5\\_Infrastrukturen-fuer-Wasserstoffmobilitaet.pdf](https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/07/NPM_AG5_Infrastrukturen-fuer-Wasserstoffmobilitaet.pdf)

## Beteiligte Institutionen



### acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

[www.acatech.de](http://www.acatech.de)



### DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Die DECHEMA ist das kompetente Netzwerk für chemische Technik und Biotechnologie in Deutschland. Sie vertritt als gemeinnützige Fachgesellschaft diese Gebiete in Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. Die DECHEMA fördert den technisch-wissenschaftlichen Austausch von Fachleuten unterschiedlicher Disziplinen, Organisationen und Generationen und bündelt das Know-how von über 5.500 Einzel- und Fördermitgliedern. Sie engagiert sich in (inter-)nationalen technischen Expertengremien und ist in öffentlich geförderten F&E-Projekten sowie der Auftragsforschung aktiv. Dabei koordiniert sie große Forschungsverbände und ist in verschiedenen Fördermaßnahmen für die Begleitforschung verantwortlich.

[www.dechema.de](http://www.dechema.de)

## Autor\*innen

- > **Dr. Jens Artz**  
Teamleiter DECHEMA
- > **Dr. Benjamin Baur**  
Referent Stakeholder-Dialog acatech
- > **Marie Biegel**  
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Dr. Dominik Blaumeiser**  
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Jasper Eitze**  
Teamleiter acatech
- > **Dr. Alexandra Göbel**  
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Tamara Hanstein**  
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Christopher Hecht**  
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **Thomas Hild**  
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Florian Hölting**  
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **David Knichel**  
Wissenschaftlicher Referent acatech
- > **Valerie Kwan**  
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Jördis Lemke**  
Teamassistentin acatech
- > **Dr. Michaela Löffler**  
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Andrea Lübcke**  
Teamleiterin acatech
- > **Alena Müller**  
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Lars Ole Reimer**  
Redakteur Multimedia acatech
- > **Dr. Damien Rolland**  
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Anna Runkel**  
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Emre Yildirim**  
Studentische Hilfskraft acatech

### Ansprechpartner\*innen acatech

- > **Jasper Eitze**  
[eitze@acatech.de](mailto:eitze@acatech.de)
- > **Dr. Andrea Lübcke**  
[luebcke@acatech.de](mailto:luebcke@acatech.de)

### Ansprechpartner\*innen DECHEMA

- > **Dr. Jens Artz**  
[jens.artz@dechema.de](mailto:jens.artz@dechema.de)
- > **Dr. Michaela Löffler**  
[michaela.loeffler@dechema.de](mailto:michaela.loeffler@dechema.de)



# WASSERSTOFF KOMPASS

## IMPRESSUM

Wasserstoff-Kompass  
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft

### Herausgebende

**acatech – Deutsche Akademie  
der Technikwissenschaften e.V.**

Geschäftsstelle  
Karolinenplatz 4  
80333 München  
T +49 (0) 89 / 52 03 09-0  
F +49 (0) 89 / 52 03 09-900  
info@acatech.de  
www.acatech.de

**DECHEMA Gesellschaft für  
Chemische Technik und Biotechnologie e.V.**

Theodor-Heuss-Allee 25  
60486 Frankfurt am Main  
T +49 (0) 69 / 75 64-0  
info@dechema.de  
www.dechema.de

### Geschäftsführendes Gremium des Präsidiums / acatech

Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Prof. Dr. Ursula Gather,  
Dr. Stefan Oschmann, Manfred Rauhmeier,  
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber,  
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner  
Vorstand i.S.v. § 26 BGB:  
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner,  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier

### Verantwortlicher im Sinne des Presserechts

Dr. Jens Artz, DECHEMA

### Redaktion

Jasper Eitze, Dr. Andrea Lübcke / acatech  
Dr. Jens Artz, Dr. Michaela Löffler / DECHEMA

### Gestaltung und Satz

Lindner & Steffen GmbH, www.lindner-steffen.de

### Bildnachweis

AdobeStock: malp

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium  
für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sowie dem  
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens  
(FKZ 03EWT002).

Betreut wurde das Projekt durch den Projektträger Jülich.

Erschienen im März 2024 in Frankfurt am Main

1. Auflage

ISBN 978-3-89746-245-8

[www.wasserstoff-kompass.de](http://www.wasserstoff-kompass.de)

### Empfohlene Zitierweise

acatech, DECHEMA (Hrsg.): Wasserstoff-Kompass  
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft,  
Frankfurt am Main 2023, ISBN: 978-3-89746-245-8  
<https://www.wasserstoff-kompass.de/handlungsfelder#>



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages