



WASSERSTOFF
KOMPASS



MOBILITÄT UND TRANSPORT

Schifffahrt





WASSERSTOFF KOMPASS

ÜBERGREIFENDE ASPEKTE

- Regulatorischer Rahmen
- Zielgerichteter H₂-Einsatz
- Fachkräftesicherung
- Akzeptanz und Sicherheit
- Klima und Ressourcen

BEREITSTELLUNG

- H₂-Erzeugung
- H₂-Import
- Infrastruktur

INDUSTRIEZWEIGE

- Stahlindustrie
- Chemische Industrie
- Raffinerien
- Zementindustrie
- Glasindustrie

MOBILITÄT UND TRANSPORT

- Kraftfahrzeuge
- Schifffahrt**
- Luftverkehr
- Schienenverkehr

ENERGIEVERSORGUNG

- Gebäudewärme
- Prozesswärme
- Stromsystem

GLOSSAR

1 Generelle Aspekte der Schifffahrt

- 2 Treibhausgasneutral bis 2050
- 3 Wasserstoffoptionen zur Defossilisierung
- 3 Ökonomische Aspekte
- 3 Versorgungssicherheit
- 3 Endenergiebedarf
- 4 Treibhausgasemissionen

5 Handlungsoptionen (Wasserstoff)

- 5 Wasserstoff in der Schifffahrt
- 9 Ammoniak im Schiffsverkehr
- 12 Methanol im Schiffsverkehr
- 15 Synthetischer Diesel aus Fischer-Tropsch-Synthese

18 Handlungsoptionen (andere Technologien)

- 18 Batterieelektrische Antriebe in der Schifffahrt

20 Literatur

Schifffahrt

- › Im Vergleich zur Land- oder Luftfracht sind die spezifischen CO₂-Emissionen pro Tonnenkilometer in der Überseeschifffahrt deutlich niedriger. Lange Entwicklungszeiträume und Lebensdauer der Schiffe erschweren aber eine schnelle Defossilisierung der Schifffahrt.
- › Eine Elektrifizierung ist aufgrund der niedrigen Energiedichte von Batterien nur über kurze Distanzen möglich. Als alternative Treibstoffe werden vor allem Wasserstoff, Ammoniak und Methanol diskutiert. Da der Einsatz von Flüssigerdgas (LNG) weit verbreitet ist, kommt auch der Einsatz von synthetischem Methan infrage.
- › In der Hochseeschifffahrt wird Wasserstoffantrieben bislang nur wenig Potenzial zugesprochen. Anwendungsszenarien fokussieren sich auf den küstennahen Betrieb und die Binnenschifffahrt.
- › Verstärkt wird auch wieder die Windkraft als alternative Antriebsform, auch für Hybridsysteme, in den Fokus gerückt: Rumpfsegler, Flettner-Rotoren oder Zugdrachen. Erste kommerzielle Anwendungen gibt es bereits.

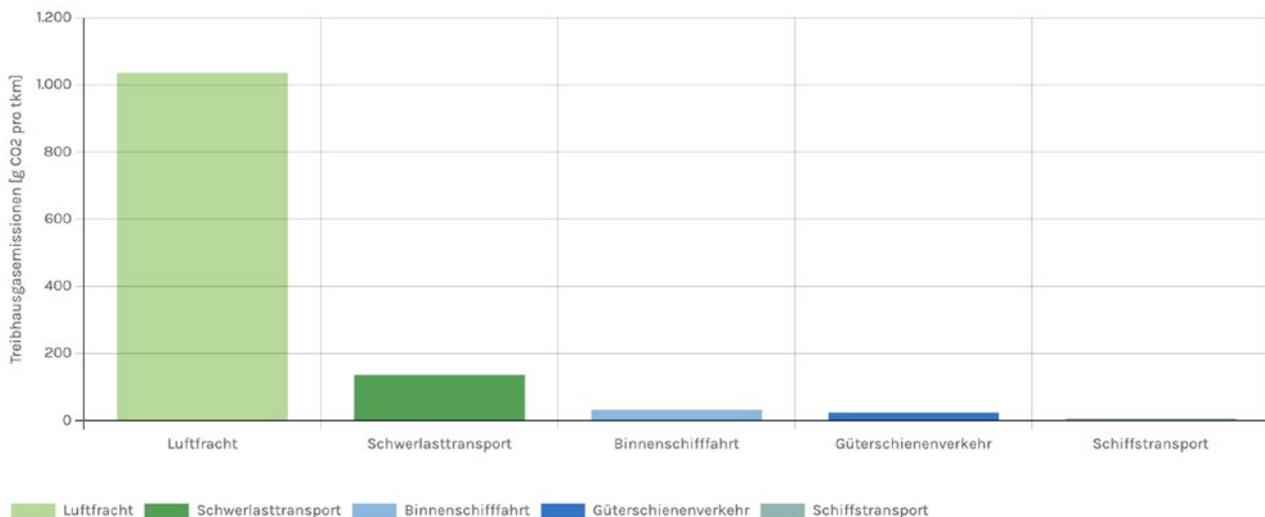
Generelle Aspekte der Schifffahrt

Die Schifffahrt ist das Rückgrat des globalen Handels. Neunzig Prozent des weltweiten Warentransfers erfolgt auf dem Seeweg.^[1] Dabei hat sich die weltweite Verkehrsleistung im Schiffsverkehr seit 1970 etwa verdreifacht. Dabei konnte der gegenüber anderen Transportwegen ohnehin günstige Energiebedarf pro transportierter Tonne vor allem durch größere Schiffe und langsame Reisegeschwindigkeiten (»Slow Steaming«) weiter gesenkt werden.^[2] Dennoch verantwortet der globale Schiffsverkehr circa zwei Prozent aller Treibhausgasemissionen.^[1]

Treibhausgasneutral bis 2050

Im Jahr 2023 verabschiedete die Internationale Seeschiffahrts-Organisation (IMO als Sonderorganisation der Vereinten Nationen) ihre überarbeitete Treibhausgasstrategie und bekannte sich hierin zu dem Ziel, bis 2050 treibhausgasneutral zu werden.^[5] Bereits zum 1. Januar 2020 wurde der globale Schwefelgrenzwert für Schiffe, die außerhalb von Emissionsschutzgebieten verkehren, von dato 3,5 auf 0,5 Prozent reduziert.

Durchschnittliche Treibhausgasemissionen nach Transportoption in der EU im Jahr 2018
in Gramm CO₂ pro Tonnenkilometer^[4]



Diese Anpassung des internationalen Rechtsrahmens hat dazu geführt, dass Schweröl als bisher primär genutzter Energieträger aufgrund seiner hohen Schwefelanteile bedeutend an Attraktivität verliert. So reduzierte sich der Anteil von Schweröl von 2019 gegenüber 2020 um knapp 42 Prozent.^{[5][6]} Ein weiterer wichtiger Schritt war die Aufnahme des Schifffverkehrs in den neuen Emissionshandels (ETS 2) der Europäischen Union (EU).

Gleichzeitig steigt der Anteil der weltweit neu bestellten Schiffe mit alternativen Treibstoffarten sprunghaft an. Im Juni 2022 waren über 33 Prozent der neu bestellten Schiffe für alternative Energieträger ausgelegt – knapp 30 Prozent auf Flüssigerdgas (Liquified Natural Gas – LNG) und jeweils circa 1,5 Prozent auf Methanol und Liquefied Petroleum Gas (LPG).^[7]

Aufgrund dieser und weiterer gesetzlicher Entwicklungen erwartet die Internationale Energieagentur (IEA) in ihrem aktuellen Szenario zur Entwicklung der CO₂-Emissionen einen Rückgang von 706 Millionen Tonnen CO₂ im Jahr 2022 auf 605 Millionen Tonnen CO₂ im Jahr 2030.^[8]

Wasserstoffoptionen zur Defossilisierung

Die Reduktion der Treibhausgasemissionen wird insbesondere durch den Einsatz von klimaneutralem Wasserstoff und seinen Derivaten erfolgen müssen. Noch wird allerdings erforscht und erprobt, welche klimafreundlichen Schweröialternativen am besten geeignet sind.

Weltweit gibt es hierzu mehr als sechzig Projekte: In Küstennähe werden batterieelektrische Lösungen und gasförmiger Wasserstoff, zum Teil kombiniert mit fossilen Kraftstoffen, favorisiert. Für die Langstrecke ist flüssiger Wasserstoff aufgrund der höheren Energiedichte denkbar.

Auch Ammoniak wird als Schiffstreibstoff erprobt. Der Vorteil: Ammoniak ist leichter lagerbar als Wasserstoff und die volumetrische Energiedichte etwa fünfzig Prozent höher. Der Nachteil: Bei relativ geringer Konzentration ist Ammoniak bereits giftig und brennbar. Da es in Gasform leichter ist als Luft, muss eine entsprechende Entlüftung vorhanden sein.

Methanol ist ein weiterer Ersatzkandidat für fossile Treibstoffe, da heutige Motoren vergleichsweise leicht auf Methanol umgerüstet werden können. Allerdings sind die Energiekosten deutlich höher, da perspektivisch CO₂ aus der Luft gewonnen werden muss.

Ökonomische Aspekte

Die maritime Wirtschaft sicherte in Deutschland 2018 insgesamt circa 450.000 Arbeitsplätze mit einer Wertschöpfung von rund 30 Milliarden Euro bei einem Umsatz von rund 87 Milliarden Euro.^[9]

Historisch betrachtet gibt es eine starke Korrelation zwischen der Entwicklung des Güterverkehrs und dem Wachstum des globalen Bruttoinlandsprodukts (BIP).^[2] Es wird von einem weiteren signifikanten Anstieg des globalen Schiffswarentransports ausgegangen – bis zu einer Verdreifachung im Jahr 2035.^[1] Ebenso wird aller Wahrscheinlichkeit nach die Anzahl von Kreuzfahrtschiffen beziehungsweise Kreuzfahrten weiter steigen.

Versorgungssicherheit

Die Versorgungssicherheit mit allen relevanten Gütern, auch Energieträgern, ist auf freie Seerouten angewiesen.

Endenergiebedarf

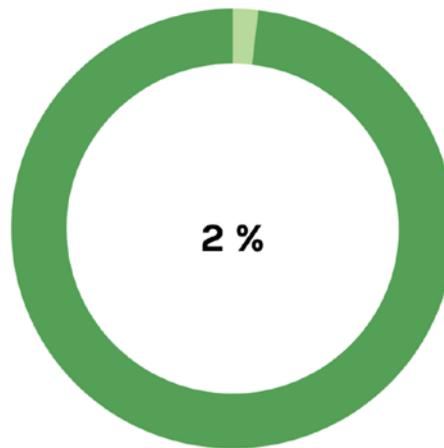
Die weltweite Seeschifffahrt hatte im Jahr 2021 einen Gesamtenergiebedarf von etwa 2.415 Terawattstunden, nahezu vollständig gedeckt durch fossile Energieträger.^[10]

Treibhausgasemissionen

In Summe ist der globale Schiffsverkehr für circa zwei Prozent aller Treibhausgasemissionen verantwortlich.^[1] Im Jahr 2021 waren dies etwa siebenhundert Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid (MtCO₂),^[1] was ungefähr dem Ausstoß Deutschlands im Jahr 2020 entspricht.

Treibhausgasemissionen in Megatonnen CO₂-Äquivalente

Anteil des globalen Schiffsverkehrs an globalen Treibhausgasemissionen (2021).^[1]



 Schiffsverkehr  Rest

AUSWAHL ÖFFENTLICH GEFÖRDERTER PROJEKTE

> AquaNavis

<https://aquaventus.org/projekt/aquanavis/>

PUBLIKATION

> Wasserstoff-Kompass (2022): Internationale Schifffahrt:
Klimaneutrale Antriebe und Treibstoffe.

https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Schiffsverkehr.pdf

Handlungsoptionen Wasserstoff

Wasserstoff in der Schifffahrt

Wie bei Kraftfahrzeugen kann Wasserstoff auch in der Schifffahrt für Brennstoffzellenantriebe genutzt werden. Auch die Direktverbrennung stellt eine technische Option dar. Zwar existieren noch technische Hürden, aber Reedereien im Verbund mit der Forschung streben mittel- bis langfristig die Einhaltung der Treibhausgas-minderungsvorgaben der Internationale Seeschifffahrts-Organisation unter anderem mit-hilfe von Wasserstoff an.^[3]

Voraussetzungen

- › Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger für die Schifffahrt setzt eine entsprechende Hafeninfrastruktur voraus.
- › Um die benötigten Mengen zur Verfügung zu stellen, ist der Import von Wasserstoff erforderlich.

Vorteile

- › Die Nutzung von Wasserstoff setzt keinerlei Emissionen frei; dies ist vor allem im Hafenumfeld ein wichtiger Aspekt.
- › Sofern der Wasserstoff aus erneuerbaren Energien produziert wird, kann die Schifffahrt, auch unter Berücksichtigung der Wasserstoffherstellung, vollständig emissionsfrei operieren.
- › Die Unterwasserlärmbelastung ist beim Einsatz von Brennstoffzellen niedriger als beim Einsatz von Verbrennungsmotoren.

Nachteile

- › Wasserstoff weist eine relativ geringe volumetrische Energiedichte auf. Um dies zu kompensieren, müssen mit relativ hohen Umwandlungsverlusten eine Verflüssigung oder Komprimierung vorgenommen werden.
- › Die Kosten für die Produktion, den Transport und die Speicherung von Wasserstoff sind im Vergleich zu konventionellen Schiffskraftstoffen hoch. Ohne finanzielle Anreize oder Kompensationen könnte es schwierig werden, Wasserstoff als Energieträger in der Schifffahrt zu etablieren.

Folgen

- › Wasserstoff in der Schifffahrt würde den emissionsfreien Verkehr auf kürzeren Routen erlauben.

Ökonomische Aspekte

Der Preis für schwefelarmes Schweröl (VLSFO – Very Low Sulphur Fuel Oil) belief sich im Juli 2023 aus circa 0,60 Euro je Kilogramm.^[12] Bei heutigen Containerschiffen mit 20.000 und mehr Containerplätzen ergeben sich bei einem Verbrauch von circa 2,7 Liter Schweröl pro Standard-14-Tonnen-Container und 100 Kilometer^[13] Kosten für den Transport von 20.000 Containern etwa 32.000 Euro pro 100 Kilometer.

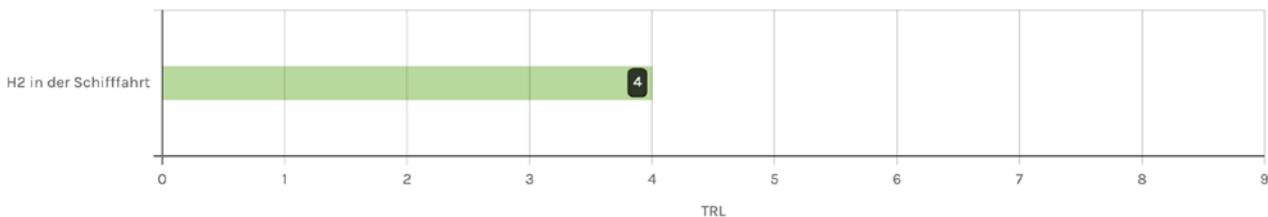
Als Beispielrechnung dient eine Ladung von 10.000 Containern über 10.000 Kilometer bei 0,60 Euro je Kilogramm schwefelarmen Schweröls und 6 Euro je Kilogramm erneuerbaren Wasserstoffs. Perspektivisch werden Preise von unter zwei Euro pro Kilogramm Wasserstoff für realistisch gehalten. Eine Preisparität zu konventionell hergestelltem Wasserstoff besteht, je nach Erzeugungsregion, bereits heute.

Sofern Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor mit ähnlichem Wirkungsgrad verwendet würde, ergäben sich bei einem Heizwert von 33,3 Kilowattstunden pro Kilogramm gegenüber Schweröl mit 11 Kilowattstunden pro Kilogramm Mehrkosten für die Wasserstoffnutzung von circa 4 Millionen Euro. Wenn Wasserstoff in einer Brennstoffzelle verwendet würde, die mit einem Wirkungsgrad von circa 70 Prozent wesentlich effizienter ist als ein Schiffsdiesel mit circa 49 Prozent, würde sich der Kostenaufschlag in dem Rechenbeispiel auf 2,8 Millionen Euro reduzieren.

Technologiereifegrad

Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad für die Nutzung von Wasserstoff in der Schifffahrt beträgt sowohl für Brennstoffzellenantriebe als auch für Verbrennungsmotoren 4.^[14]



STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG

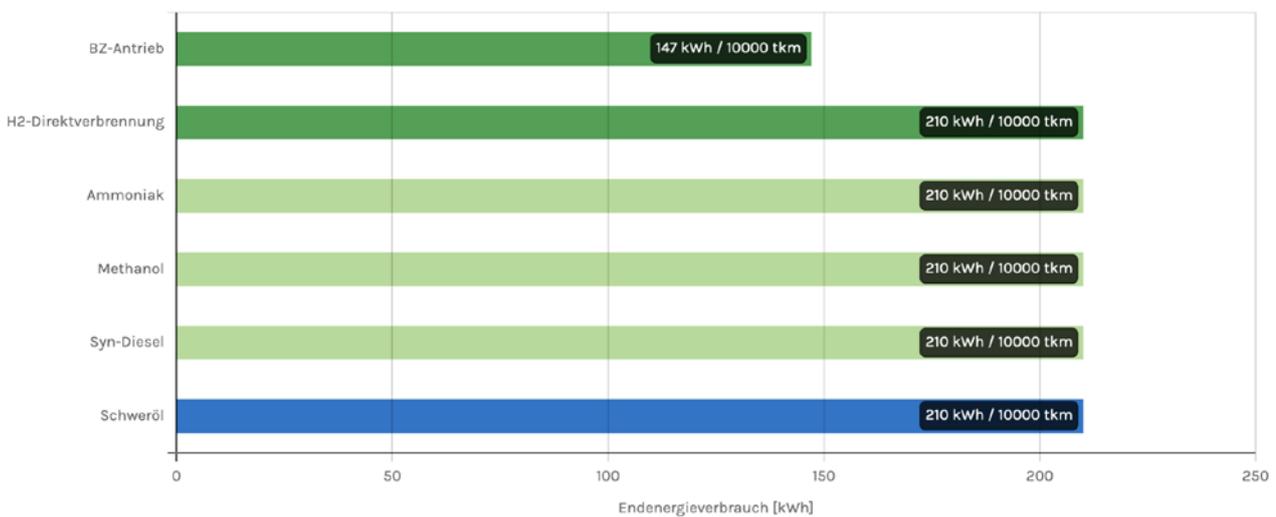


- > Zwischen den Stakeholder*innen herrschte weitestgehend Konsens, dass unterschiedliche Anwendungsfelder weiterhin unterschiedliche Kraftstoffe erfordern, beispielsweise für den Fährbetrieb, die Binnen- oder die Hochseeschifffahrt.
- > Zwischen den Stakeholder*innen bestand weitestgehend Konsens, dass der Einsatz reinen Wasserstoffs auf der Langstrecke eher eine untergeordnete Rolle einnehmen wird. Die Nachteile, insbesondere die geringe volumetrische Energiedichte, gegenüber Wasserstoffderivaten wie Ammoniak und Methanol sind hierfür die Ursache.

Endenergiebedarf

Endenergieverbrauch bezogen auf 10.000 Tonnenkilometer

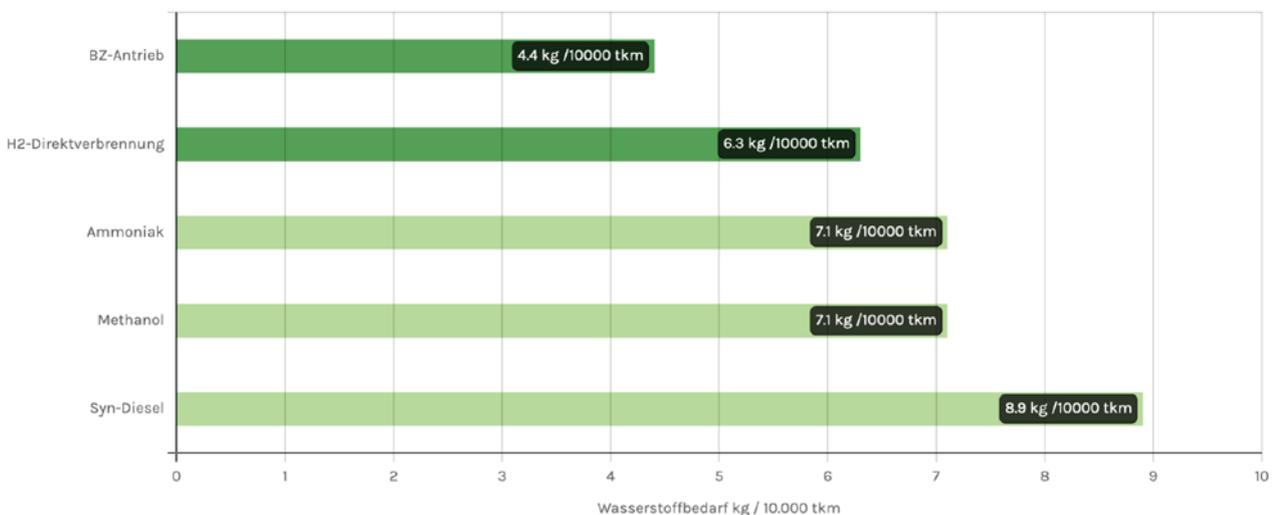
Mit Schweröl betriebene Containerschiffe der größten Klasse haben einen Energieverbrauch pro Tonnenkilometer von 0,021 Kilowattstunden (eigene Berechnung auf Basis der Werte für eines der weltweit größten Containerschiffe).^[20] Sofern Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor verwendet würde, wäre der Endenergiebedarf bei gleichem Schiffsdesign und ähnlich hohem Wirkungsgrad unverändert. Beim Einsatz von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle würde sich der Endenergiebedarf durch den höheren Wirkungsgrad von 70 Prozent gegenüber 49 Prozent bei Schiffsdiesel auf 0,0147 Kilowattstunden pro Tonnenkilometer reduzieren.



Wasserstoffbedarfe

Wasserstoffbedarf bezogen auf eine Verkehrsleistung von 10.000 Tonnenkilometern

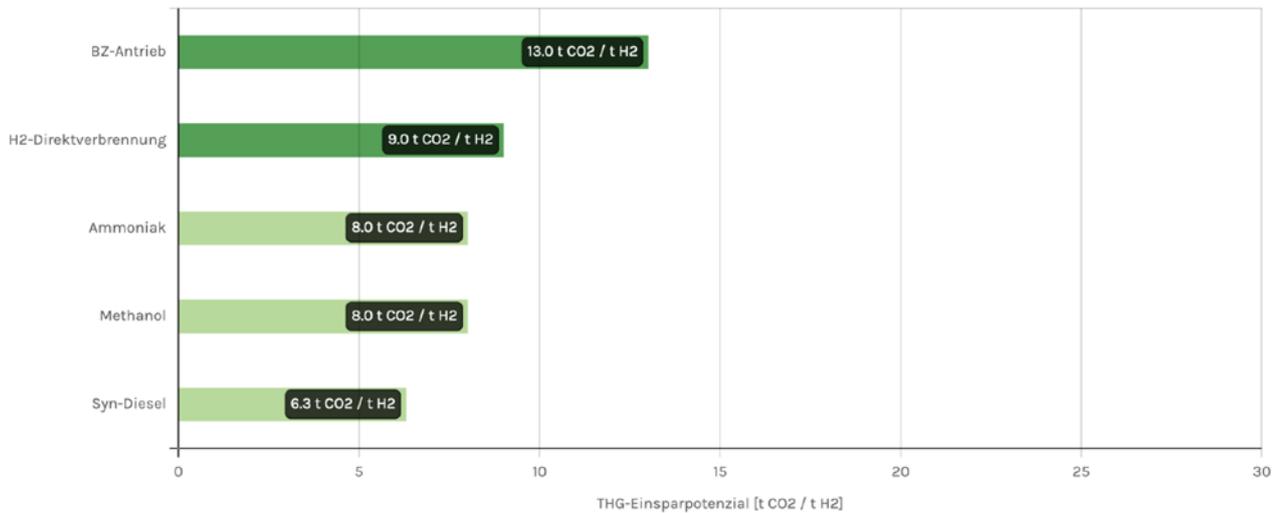
Bei einem Verbrennungsmotor würden pro Tonnenkilometer 0,63 g H₂, in einer Brennstoffzelle würden pro Tonnenkilometer 0,44 g H₂ benötigt.



Minderungspotential

Treibhausgaserminderungspotential in Tonnen CO₂ pro Tonne Wasserstoff

Bei der Verwendung von Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor können bis zu etwa 9 Tonnen CO₂ / t H₂ eingespart werden, bei Nutzung eines Brennstoffzellenantriebs sogar 13 Tonnen CO₂ / t H₂ erhöhen.



Akteur*innen

- > Schiffsbauer
- > Reedereien
- > Häfen

AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

- > AquaNavis
<https://aquaventus.org/projekt/aquanavis/>

MASSNAHME

MASSNAHME

> Förderung der Nutzung von Wasserstoff im Schiffsverkehr

Eine Förderung der Nutzung zielt darauf ab, die Nachfrage zu steigern. Hierfür sind Anpassungen im regulatorischen Rahmen notwendig.

Ammoniak im Schiffsverkehr

Ammoniak ist dank seiner Eigenschaften grundsätzlich als Treibstoff für Verbrennungsmotoren geeignet.

Allerdings ist der Einsatz bisher aufgrund der hohen Zündtemperatur auf Dual-Fuel-Motoren beschränkt, bei denen ein weiterer Treibstoff eingespritzt wird. Die ersten reinen Ammoniakverbrennungsmotoren sind in der Entwicklung und sollen in den nächsten Jahren auf den Markt kommen.^[14]

Voraussetzungen

- › Die Nutzung von Ammoniak als Energieträger für die Schifffahrt setzt eine entsprechende Hafeninfrastruktur voraus.
- › Um die benötigten Mengen zur Verfügung zu stellen, ist der Import von Ammoniak erforderlich.
- › Ammoniak als Gefahrgut stellt hohe Sicherheitsanforderungen an Nutzung und Lagerung, die vorab ausreichend berücksichtigt werden müssen.

Vorteile

- › Ammoniak ist ein bereits heute international gehandeltes Produkt. Es bestehen somit langfristige Erfahrungswerte, gerade auch beim Schifftransport.
- › Ammoniak weist schätzungsweise hohe Kostenvorteile gegenüber anderen erneuerbaren Kraftstoffen auf.

Nachteile

- › Ammoniak weist eine hohe Toxizität auf, was vor allem bei der Nutzung und Lagerung in Häfen umfangreiche Sicherheitsvorkehrungen erfordert.
- › Bei der Verbrennung von Ammoniak können Stickoxide entstehen. Diese können aber effektiv über die Behandlung der Abgase minimiert werden.

Folgen

- › Ein verstärkter Einsatz in der Schifffahrt würde in Konkurrenz zur Düngemittelproduktion stehen, für die der Großteil der jährlich produzierten rund 180 Millionen Tonnen Ammoniak bisher verwendet wird.

Ökonomische Aspekte

Ein Kilogramm Ammoniak wurde für etwa 0,45 Euro je Kilogramm im Juli 2023 gehandelt.^{[15][21]} Dies entspricht voraussichtlich nicht dem zukünftigen Preis von importiertem grünem Ammoniak.

Der Preis für schwefelarmes Schweröl (VLSFO – Very Low Sulphur Fuel Oil) belief sich im Juli 2023 auf circa 0,60 Euro je Kilogramm.^[12] Bei heutigen Containerschiffen mit 20.000 und mehr Containerplätzen ergeben sich bei einem Verbrauch von circa 2,7 Liter Schweröl pro Standard-14-Tonnen-Container und 100 Kilometer^[13] Kosten für den Transport von 20.000 Containern etwa 32.000 Euro pro 100 Kilometer.

Als Beispielrechnung dient eine Ladung von 10.000 Containern über 10.000 Kilometer bei 0,60 Euro je Kilogramm schwefelarmen Schweröls und 0,45 Euro je Kilogramm Ammoniak. Es wird von einem vergleichbaren Wirkungsgrad ausgegangen.

Bei einem vergleichbaren mit Ammoniak betriebenen Containerschiff würden sich bei einer Energiedichte von 5,2 Kilowattstunden pro Kilogramm gegenüber Schweröl mit 11 Kilowattstunden pro Kilogramm Mehrkosten für den Treibstoff von circa 950.000 Euro ergeben.

Technologiereifegrad

Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad für die Nutzung von Ammoniak in Verbrennungsmotoren als alternativer Kraftstoff in der Schifffahrt beträgt 6.^[14]



STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG



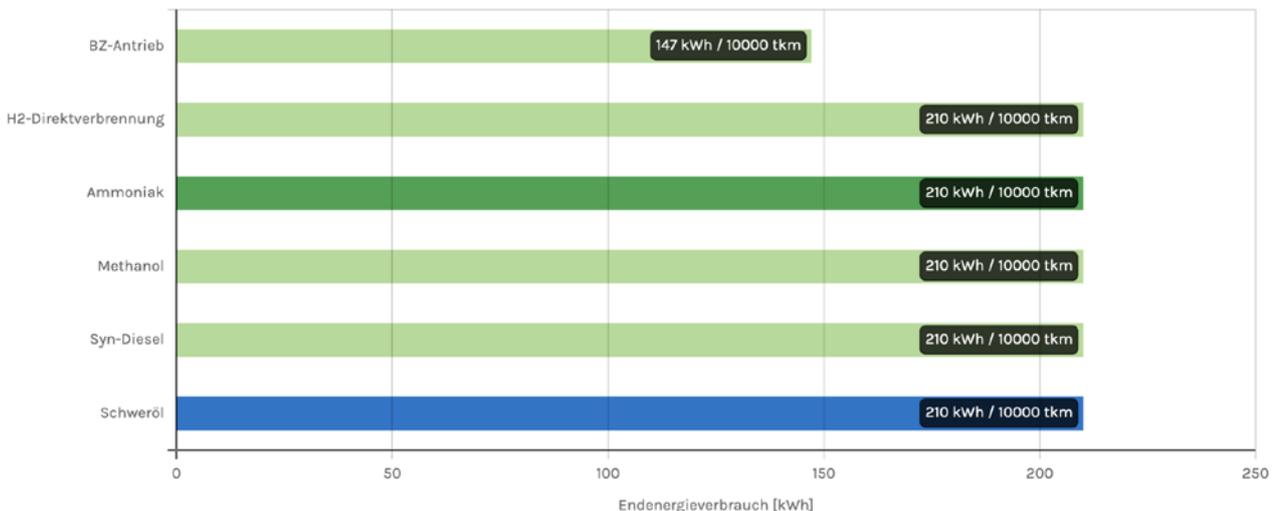
> Die Stakeholder*innen waren sich einig, dass Ammoniak aufgrund seiner Effizienz ein guter Kraftstoff für die Hochseeschifffahrt darstellt, sofern die sicherheitsrelevanten Herausforderungen berücksichtigt werden.

Endenergiebedarf

Endenergieverbrauch bezogen auf 10.000 Tonnenkilometer

Mit Schweröl betriebene Containerschiffe der größten Klasse haben einen Energieverbrauch pro Tonnenkilometer von 0,021 Kilowattstunden.

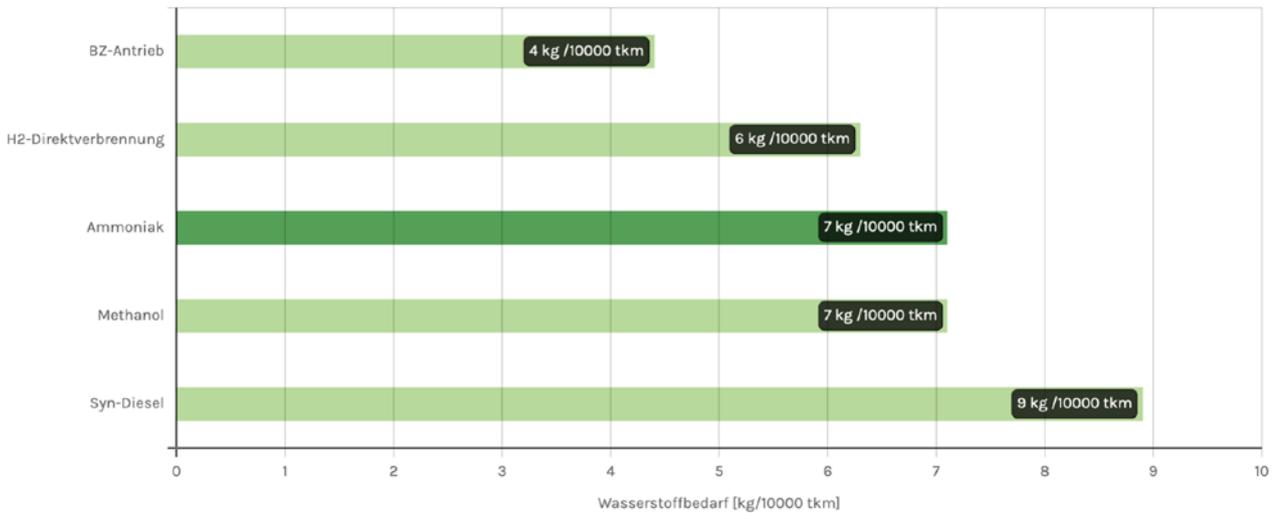
Bei Ammoniak als Treibstoff in einem Verbrennungsmotor wäre der Endenergiebedarf bei gleichem Schiffsdesign und ähnlich hohem Wirkungsgrad unverändert.



Wasserstoffbedarfe

Wasserstoffbedarf bezogen auf eine Verkehrsleistung von 10.000 Tonnenkilometern

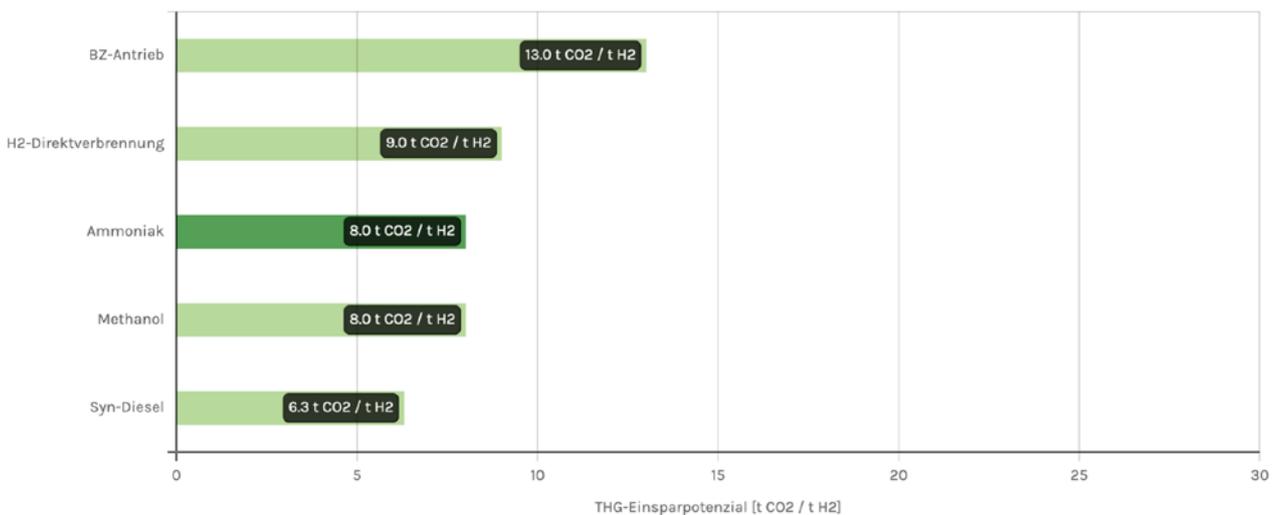
Pro Tonnenkilometer würden umgerechnet 0,71 Gramm H₂ benötigt. Dieser Wert ist vergleichbar dem von Methanol.



Minderungspotential

Treibhausgasminderungspotenzial in Tonnen CO₂ pro Tonne Wasserstoff

Schiffe mit Brennstoffzellenantrieben können gegenüber Schweröl betriebenen Schiffen der gleichen Klasse 13 Tonnen CO₂ / t H₂ einsparen



Akteur*innen

- > Schiffsbauer
- > Reedereien
- > Häfen

MASSNAHME

MASSNAHME

> Förderung der Nutzung von Ammoniak im Schiffsverkehr

Eine Förderung der Nutzung zielt darauf ab, die Nachfrage zu steigern. Hierfür wären Anpassungen im regulatorischen Rahmen notwendig.

Methanol im Schiffsverkehr

Aufgrund seiner Eigenschaften ist Methanol grundsätzlich als Treibstoff für Verbrennungsmotoren in der Schifffahrt geeignet. Der Wirkungsgrad bewegt sich im Bereich von fünfzig Prozent, vergleichbar mit Flüssiggasantrieben.^[14] Es existieren bereits erste kommerziell verfügbare 2-Takt-Dieselmotoren und 4-Takt-Ottomotoren. In den kommenden Jahren ist mit weiteren Modellen auf dem Markt zu rechnen.

Voraussetzungen

- > Die Nutzung von Methanol als Energieträger für die Schifffahrt setzt eine entsprechende Hafeninfrastruktur voraus.
- > Um die benötigten Mengen zur Verfügung zu stellen, ist der Import von Methanol erforderlich.

Vorteile

- > Methanol ist deutlich einfacher in der Handhabung als Ammoniak, das ebenfalls als alternativer Kraftstoff im Schiffsverkehr infrage kommt.
- > Methanol kann als Drop-In-Fuel bei LNG-Schiffen genutzt werden.

Nachteile

- > Methanol ist teurer als Ammoniak. Allerdings ist in der Nachrüstung der Wechsel zu Methanol absehbar mit geringeren Investitionen verbunden.

Ökonomische Aspekte

Ein Kilogramm Methanol kostete circa 0,40 Euro je Kilogramm im Juli 2023.^[16] Dies entspricht voraussichtlich nicht dem zukünftigen Preis für importiertes grünes Methanol.

Der Preis für schwefelarmes Schweröl (VLSFO – Very Low Sulphur Fuel Oil) belief sich im Juli 2023 auf circa 0,60 Euro je Kilogramm.^[12] Bei heutigen Containerschiffen mit 20.000 und mehr Containerplätzen ergeben sich bei einem Verbrauch von circa 2,7 Liter Schweröl pro Standard-14-Tonnen-Container und 100 Kilometer^[13] Kosten für den Transport von 20.000 Containern etwa 32.000 Euro pro 100 Kilometer.

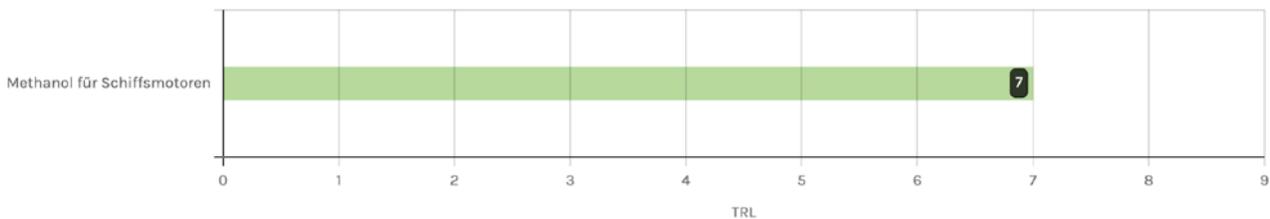
Als Beispielrechnung dient eine Ladung von 10.000 Containern über 10.000 Kilometer bei 0,60 Euro je Kilogramm schwefelarmen Schweröls und 0,40 Euro je Kilogramm Methanol. Es wird von einem vergleichbaren Wirkungsgrad ausgegangen.

Bei einem vergleichbaren, mit Methanol betriebenen Containerschiff würden sich bei einer Energiedichte von 5,5 Kilowattstunden pro Kilogramm gegenüber Schweröl mit 11 Kilowattstunden pro Kilogramm Treibstoffmehrkosten von circa 540.000 Euro ergeben.

Technologiereifegrad

Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad für die Nutzung von Methanol in Verbrennungsmotoren in der Schifffahrt beträgt 7.^[14]

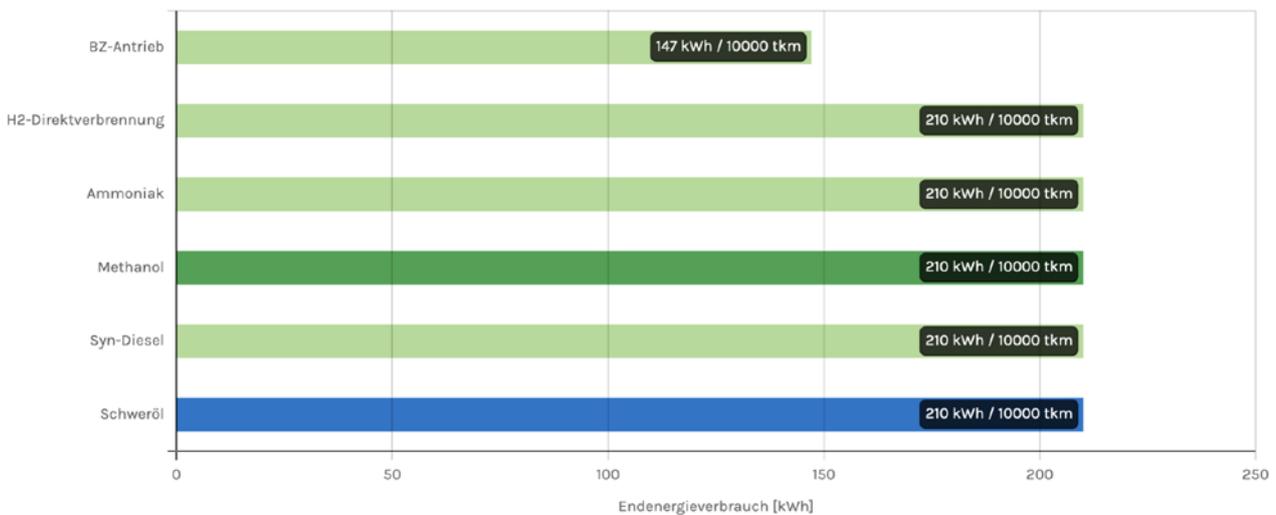


Endenergiebedarf

Endenergieverbrauch bezogen auf 10.000 Tonnenkilometer pro Kilowattstunde

Mit Schweröl betriebene Containerschiffe der größten Klasse haben einen Energieverbrauch pro Tonnenkilometer von 0,021 Kilowattstunden.

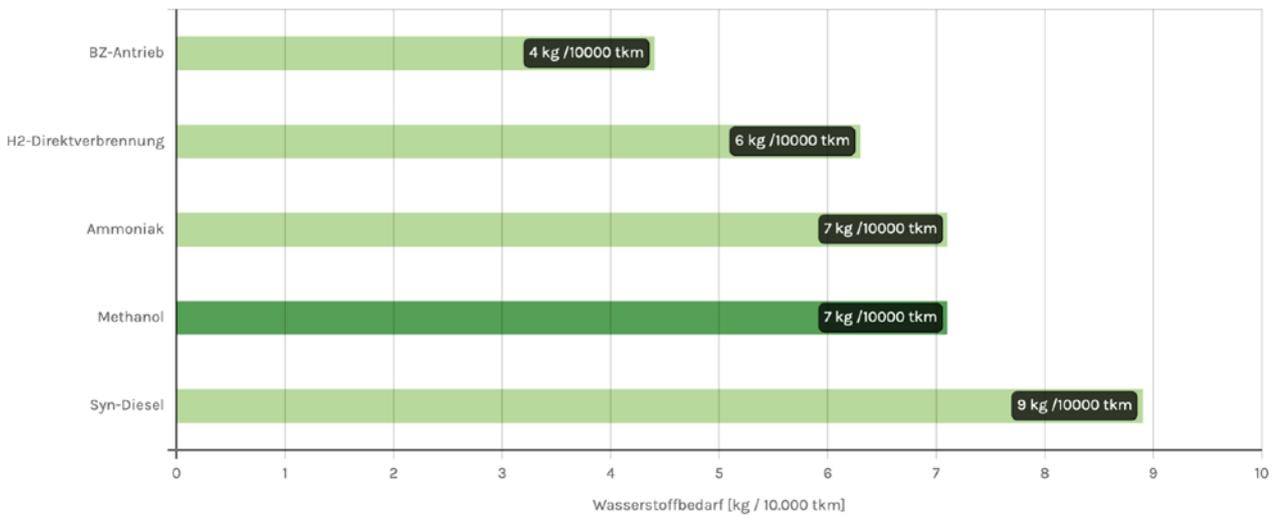
Bei Methanol als Treibstoff in einem Verbrennungsmotor wäre der Endenergiebedarf bei gleichem Schiffsdesign und ähnlich hohem Wirkungsgrad unverändert.



Wasserstoffbedarfe

Wasserstoffbedarf bezogen auf eine Verkehrsleistung von 10.000 Tonnenkilometer text="Pro Tonnenkilometer würden umgerechnet 0,71 Gramm H₂ benötigt. Dieser Wert ist vergleichbar dem von Ammoniak.

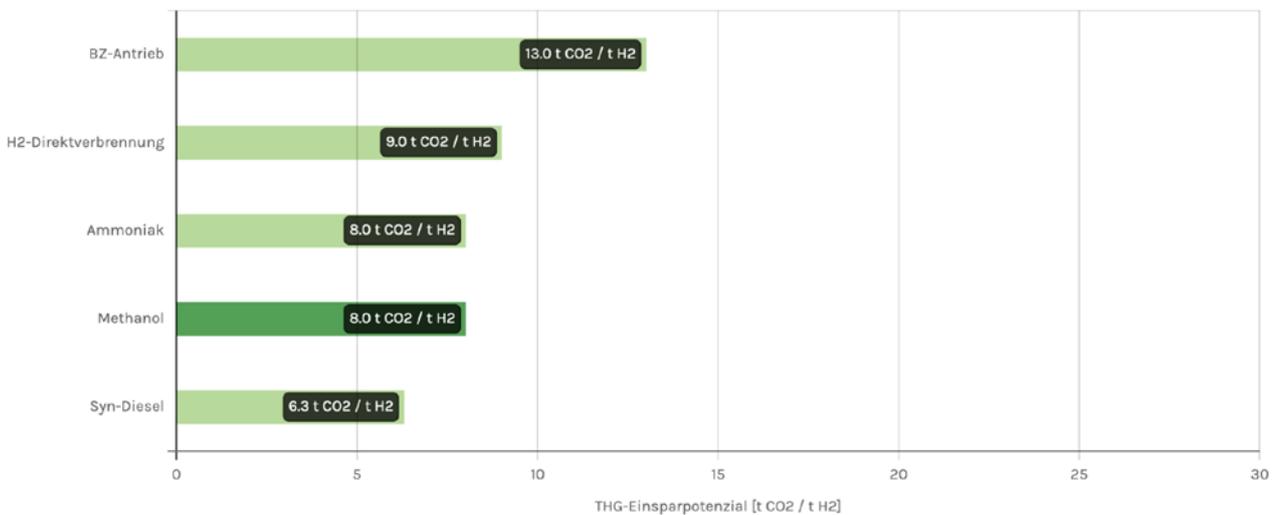
Pro Tonnenkilometer würden umgerechnet 0,71 Gramm H₂ benötigt. Dieser Wert ist vergleichbar dem von Ammoniak.



Minderungspotential

Treibhausgasreduzierungsbedarf in Tonnen CO₂ pro Tonne Wasserstoff

Durch Nutzung von klimaneutral erzeugtem Methanol können 8 Tonnen CO₂ pro Tonne H₂ eingespart werden.



Akteur*innen

- > Schiffsbauer
- > Reedereien
- > Häfen

MASSNAHME

MASSNAHME

> Förderung der Nutzung von Methanol im Schiffsverkehr

Eine Förderung der Nutzung zielt darauf ab, die Nachfrage zu steigern. Hierfür wären Anpassungen im regulatorischen Rahmen notwendig.

Synthetischer Diesel aus Fischer-Tropsch-Synthese

Zur Defossilisierung der Schifffahrt ist auch der Einsatz synthetisch hergestellten Diesels eine Option. Dieser wird per Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt. Die stofflichen Eigenschaften von konventionellem beziehungsweise fossilem Schiffsdiesel können durch dieses Verfahren weitestgehend nachgebildet werden. Gleichwohl gibt es derzeit noch keine nennenswerten Produktionskapazitäten für synthetischen Diesel.^[14]

Voraussetzungen

> Um signifikante Mengen synthetischen Diesel zur Verfügung stellen zu können, wäre ein erheblicher Aufbau entsprechender Erzeugungskapazitäten notwendig.

Vorteile

> Die Fischer-Tropsch-Synthese ist ein etabliertes Verfahren in der Chemie.
> Ein Großteil der globalen Bestandsschiffsflotte könnte mit synthetischem Diesel betrieben werden.

Nachteile

> Synthetische Kraftstoffe sind bezüglich ihres energetischen Gesamtwirkungsgrads vergleichsweise ineffizient.

Ökonomische Aspekte

Ein Kilogramm synthetischer Diesel kostet circa 4,5 Euro je Kilogramm.

Der Preis für schwefelarmes Schweröl (VLSFO – Very Low Sulphur Fuel Oil) belief sich im Juli 2023 auf circa 0,60 Euro je Kilogramm.^[12] Bei heutigen Containerschiffen mit 20.000 und mehr Containerplätzen ergeben sich bei einem Verbrauch von circa 2,7 Liter Schweröl pro Standard-14-Tonnen-Container und 100 Kilometer^[13] Kosten für den Transport von 20.000 Containern etwa 32.000 Euro pro 100 Kilometer.

Als Beispielrechnung dient eine Ladung von 10.000 Containern über 10.000 Kilometer bei 0,60 Euro je Kilogramm schwefelarmen Schweröls und 4,5 Euro je Kilogramm synthetischen Diesels. Es wird von einem vergleichbaren Wirkungsgrad ausgegangen.

Bei synthetischem Diesel mit einem Heizwert von 11,5 Kilowattstunden pro Kilogramm würden sich gegenüber Schweröl mit 11 Kilowattstunden pro Kilogramm Treibstoffmehrkosten von circa 9,9 Millionen Euro ergeben.

Technologiereifegrad

Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad für die Nutzung von Syn-Diesel) in der Schifffahrt beträgt 4.^[14]

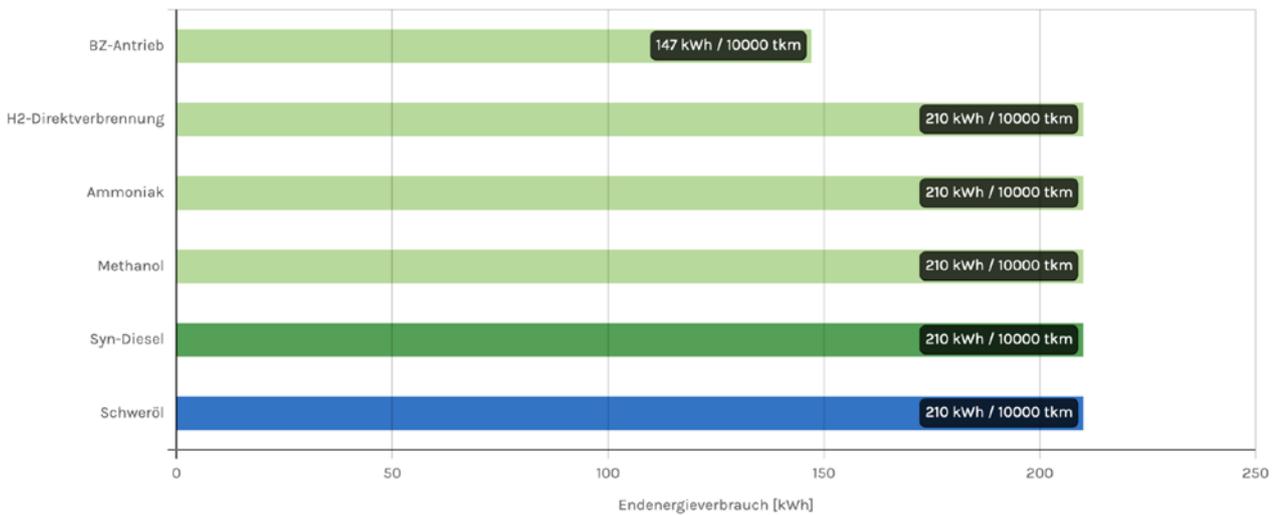


Endenergiebedarf

Endenergieverbrauch bezogen auf Tonnenkilometer pro Kilowattstunde

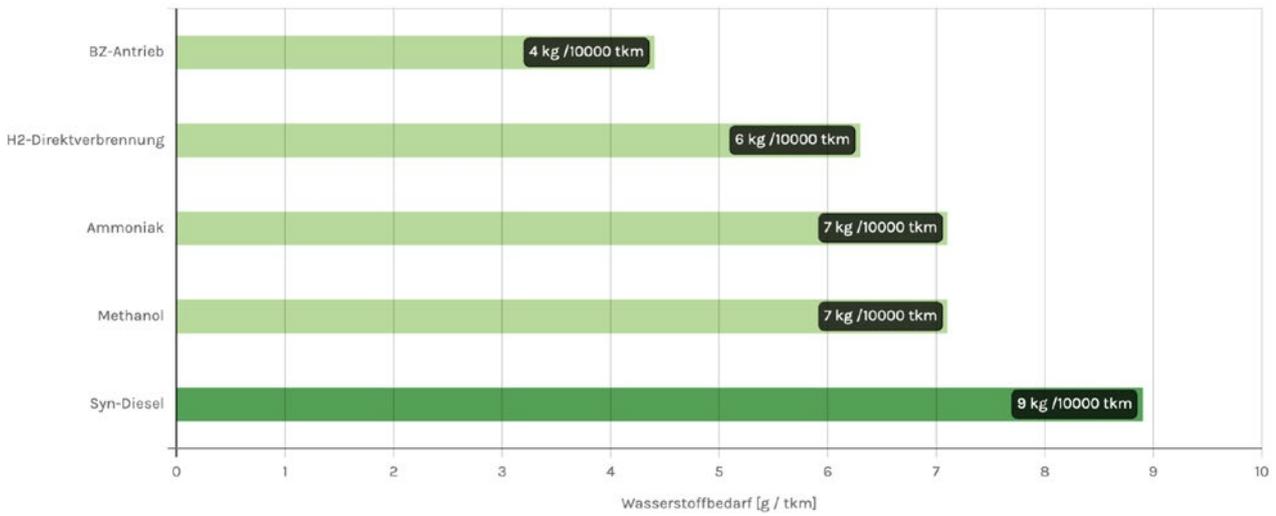
Mit Schweröl betriebene Containerschiffe der größten Klasse haben einen Energieverbrauch pro Tonnenkilometer von 0,021 kWh.

Bei Syn-Diesel als Treibstoff in einem Verbrennungsmotor wäre der Endenergiebedarf bei gleichem Schiffsdesign und ähnlich hohem Wirkungsgrad unverändert.



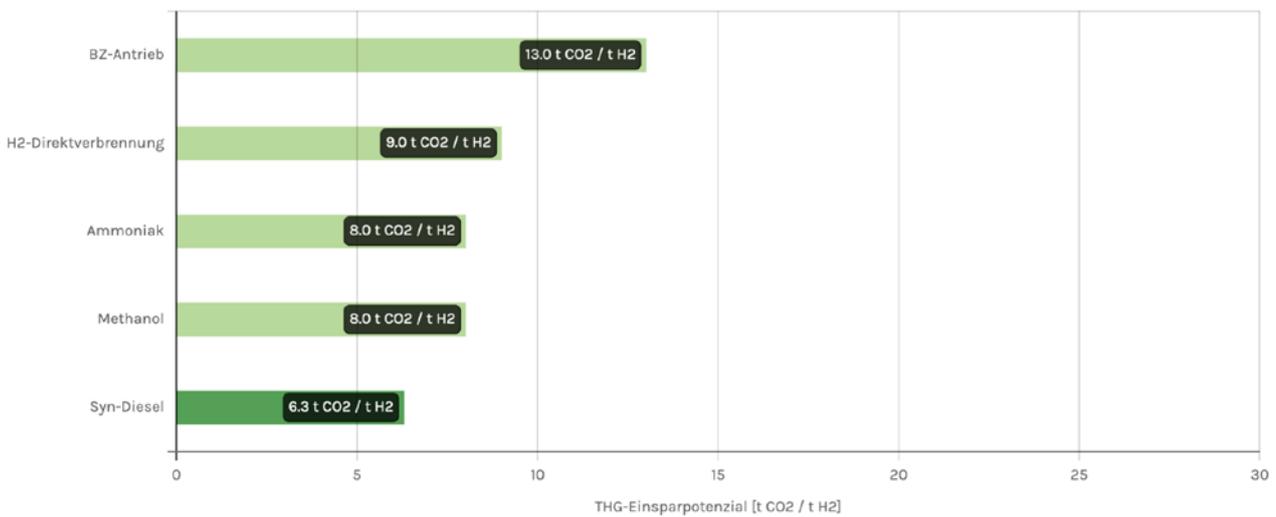
Wasserstoffbedarfe

Wasserstoffbedarf bezogen auf eine Verkehrsleistung von 100 Tonnenkilometern
 Pro Tonnenkilometer würden umgerechnet 0,89 g H₂ benötigt.



Minderungspotential

Treibhausgasminderungspotenzial in Tonnen CO₂ pro Tonne Wasserstoff
 Schiffe mit synthetischem Diesel können gegenüber mit Schweröl betriebenen Schiffen der gleichen Klasse 6,3 Tonnen CO₂ pro Tonne H₂ einsparen.



Akteur*innen

- > Raffinerien
- > Reedereien
- > Schiffsbauer
- > Häfen

MASSNAHME
MASSNAHME
**> Förderung der Nutzung von synthetischem Diesel
 im Schiffsverkehr**

Eine Förderung der Nutzung zielt darauf ab, die Nachfrage zu steigern. Hierfür wären Anpassungen im regulatorischen Rahmen notwendig.

Handlungsoptionen Andere Technologien

Batterieelektrische Antriebe in der Schifffahrt

Durch Fortschritte in der Batterietechnologie ist der kommerzielle Einsatz als Option zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Schifffahrt denkbar. Stand Juli 2023 existiert weltweit mit der Yara Birkeland ein rein batterieelektrisch angetriebenes Containerschiff.^[17] Mit einer Kapazität von 120 Containern, was gegenüber 20.000 Containern der Neopanamax-Klasse jedoch vergleichsweise gering erscheint, wird es seit 2022 in einem Zweijahres-Testbetrieb eingesetzt. Ferner existieren wenige weitere Autofähren mit batterieelektrischem Antrieb, die allerdings nicht in der Hochseeschifffahrt eingesetzt werden, sondern in Küstennähe, wo vergleichsweise geringe Batteriekapazitäten ausreichen.

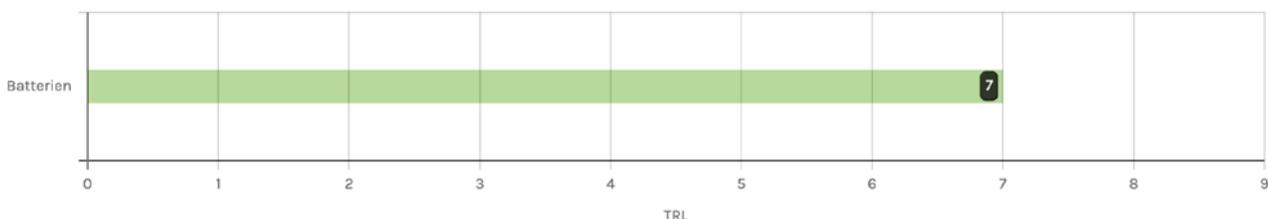
Voraussetzungen

> Gegebenenfalls sind Anpassungen der hafenseitigen Strominfrastruktur notwendig, um die Batterien der Schiffe laden zu können.

Technologiereifegrad

Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad für die Nutzung von Batterien in der Schifffahrt beträgt 7.^[19]



Vorteile

- › Sofern der Strom für das Laden der Batterien aus erneuerbaren Energien produziert wird, kann die Schifffahrt unter Berücksichtigung der Stromerzeugung vollständig emissionsfrei operieren.
- › Die Unterwasserlärmbelastung ist beim Einsatz von Batterien niedriger als beim Einsatz von Verbrennern.
- › Die Technologieoption ist bereits einsatzreif und auf kürzeren Strecken sowohl wirtschaftlich als auch praktikabel (die Batterien können während eines durchschnittlichen Aufenthalts am Hafen vollständig geladen werden).^[18]

Nachteile

- › Durch die geringe Energiedichte werden großvolumige Batterien benötigt, um genügend Energie vorhalten zu können. Dies führt zu geringeren Frachtkapazitäten.

Akteur*innen

- › Schiffsbauer
- › Reedereien
- › Häfen

Literatur

- [1] **Baumann et al. (2021):** IEA's Hydrogen TCP Task 39 Hydrogen in the Maritime – Final Report, International Energy Agency. <https://www.ieahydrogen.org/tasks-reports/>
- [2] **Wasserstoff-Kompass (2022):** Internationale Schifffahrt- Klimaneutrale Antriebe und Treibstoffe. acatech und DECHEMA, Berlin. https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Schiffsverkehr.pdf
- [3] **International Maritime Organization:** International Maritime Organization (IMO) adopts revised strategy to reduce greenhouse gas emissions from international shipping, zuletzt aufgerufen am: 07.08.2023. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted.aspx>
- [4] **European Environmental Agency:** Rail and waterborne – best for low-carbon motorised transport, zuletzt aufgerufen am: 04.07.2023. <https://www.eea.europa.eu/publications/rail-and-waterborne-transport>
- [5] **International Maritime Organization (2021):** Energy Efficiency of Ships – Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption, Database in GISIS (Reporting year: 2019). <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC%2076-6-1%20-%202019%20report%20of%20Fuel%20Oil%20Consumption%20Data%20submitted%20to%20the%20IMO%20Ship%20Fuel%20Oil%20Consumption%20Database%20in%20GISIS.pdf>
- [6] **International Maritime Organization (2021):** Energy Efficiency of Ships – Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption, Database in GISIS (Reporting year: 2020). <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC%2077-6-1%20-%202020%20report%20of%20fuel%20oil%20consumption%20data%20submitted%20to%20the%20IMO%20Ship%20Fuel%20Oil%20Consumption%20Database%20in%20GISIS.pdf>
- [7] **Det Norske Veritas – DNV (2022):** Maritime Forecast to 2050. <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2022/download-the-report.html>
- [8] **IEA:** International Shipping – CO₂ emissions, zuletzt aufgerufen am: 09.08.2023. <https://www.iea.org/energy-system/transport/international-shipping>
- [9] **Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2021):** Maritime Wirtschaft – Lebensader im Welthandel. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Schlaglichter/2021/07/download-maritime-wirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [10] **IEA:** Scaling up low-carbon fuels is the key to decarbonising international shipping, zuletzt aufgerufen am: 30.06.2023. <https://www.iea.org/reports/international-shipping>
- [11] **Crippa et al. (2022):** CO₂ emissions of all world countries – 2022 Report, EUR 31182 EN, Publications Office of the European Union, 32–33. <https://dx.doi.org/10.2760/07904>
- [12] **Ship & Bunker:** VLSFO - Global 20 Ports Average, zuletzt aufgerufen am: 01.08.2023. <https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-g20-global-20-ports-average#VLSFO>

- [13] Zellbeck, Hans (2017): Zukunft Energie Zukunft – Energiefragen im 21. Jahrhundert, Technische Universität Dresden, Lehrstuhl Verbrennungsmotoren. https://tu-dresden.de/bu/verkehr/iad/lvm/ressourcen/dateien/publikationen-wissenschaftliche-arbeiten/oeffentliche-vortraege/20170703-Mobil_mit_Energie.pdf?lang=de
- [14] Ramboll (2021): Kraftstoffanalyse in der Schifffahrt nach Segmenten Abschlussbericht. <https://dmz-maritim.de/wp-content/uploads/2022/06/20220601-Kraftstoffanalyse-in-der-Schifffahrt-nach-Segmenten-final.pdf>
- [15] S&P Global Commodity Insights, Interactive: Ammonia price chart, zuletzt aufgerufen am: 10.08.2023. <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/051023-interactive-ammonia-price-chart-natural-gas-feedstock-europe-usgc-black-sea#article0>
- [16] Methanex: About Methanol – Current Posted Prices, zuletzt aufgerufen am: 10.08.2023. <https://www.methanex.com/about-methanol/pricing/>
- [17] Doll, Scooter, 25.08.2021: World's first autonomous, 7MWh electric cargo ship to make voyage with zero crew onboard, electrek. <https://electrek.co/2021/08/25/worlds-first-autonomous-7mwh-electric-cargo-ship-to-make-voyage-with-zero-crew-onboard/>
- [18] Klimareporter: Batterien lohnen sich selbst bei Containerschiffen, zuletzt aufgerufen am: 31.07.2023. <https://www.klimareporter.de/verkehr/batterien-lohnen-sich-selbst-bei-containerschiffen>
- [19] Kersey, Jessica; Popovich, Natalie D. und Phadke, Amol A. (2022): Rapid battery cost declines accelerate the prospects of all-electric interregional container shipping, Nature Energy, 7, 664-674. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01065-y>
- [20] Preuß, Olaf, 17.04.2010: »Elly Maersk« – an Bord des größten Containerschiffs der Welt, Hamburger Abendblatt. <https://www.abendblatt.de/region/article106514532/Elly-Maersk-an-Bord-des-groessten-Containerschiffs-der-Welt.html>
- [21] Business Analytiq: zuletzt aufgerufen am 01.12.2023. <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/ammonia-price-index/>

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



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

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
- > **Dr. Andrea Lübcke**
luebcke@acatech.de

Ansprechpartner*innen DECHEMA

- > **Dr. Jens Artz**
jens.artz@dechema.de
- > **Dr. Michaela Löffler**
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: swissa

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

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