

„Wasserstoff als tragende Säule der globalen Energiewende - eine systemische Einordnung“

Frithjof Staiß, Maike Schmidt

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung
Baden-Württemberg (ZSW)
www.zsw-bw.de

Weltklimakonferenz läutet den “Anfang des Endes” der Ära fossiler Brennstoffe ein



Credit: Kiara Worth | UN Climate Change
<https://unfccc.int/cop28/5-key-takeaways>

13. Dezember 2023... “Die Bestandsaufnahme [nach dem Klimaabkommen von Paris] folgt der wissenschaftlichen Erkenntnis, dass die globalen **Treibhausgasemissionen bis 2030 um 43 % gegenüber dem Stand von 2019 gesenkt werden müssen**, um die globale Erwärmung auf 1,5°C zu begrenzen.... In der Bestandsaufnahme werden die Vertragsparteien aufgefordert, Maßnahmen zu ergreifen, um bis 2030 weltweit eine **Verdreiblanchung der Kapazitäten für erneuerbare Energien und eine Verdoppelung der Energieeffizienz zu erreichen.**“ (Auszug aus dem Abschlussdokument, Übersetzt mit DeepL.com)

<https://unfccc.int/news/cop28-agreement-signals-beginning-of-the-end-of-the-fossil-fuel-era>

Szenarien der Internationalen Energie Agentur



energie- und prozessbedingte
CO₂-Emissionen [Mrd. t]*

40
35
30
25
20
15
10
5
0

1980 1990 2000 2010 2020 2030 2040 2050

*2021 ca. 33,6 Mrd. t energiebedingt
ca. 2,7 Mrd. t prozessbedingt



"Die Bestandsaufnahme folgt der wissenschaftlichen Erkenntnis, dass die globalen Treibhausgasemissionen bis 2030 um 43 % gegenüber dem Stand von 2019 gesenkt werden müssen..."

Stated Policies Scenario

Dieses Szenario spiegelt alle heute angekündigten politischen Absichten und Ziele wider, sofern sie durch detaillierte Maßnahmen zu ihrer Verwirklichung untermauert sind.

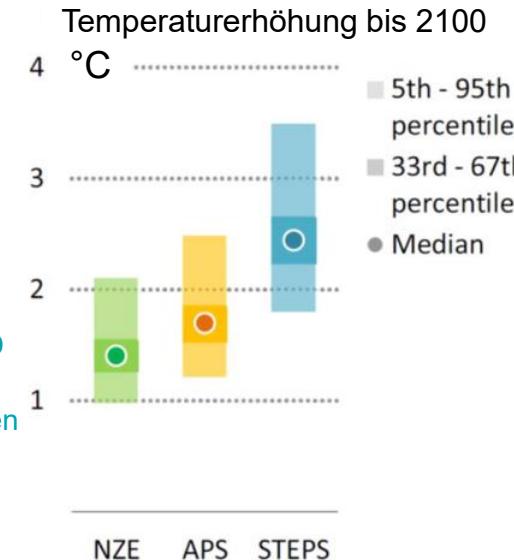
Announced Pledges Scenario

Dieses Szenario geht davon aus, dass alle angekündigten nationalen Energie- und Klimaziele der Regierungen vollständig und fristgerecht erreicht werden.

Net Zero Emissions by 2050 Scenario

Um die Ziele dieses Szenarios, das die globale Erwärmung auf 1,5 °C begrenzt, zu erreichen, sind noch erhebliche zusätzliche Fortschritte erforderlich..

Quelle: nach IEA, World Energy Outlook 2023
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
License: CC BY 4.0



Szenarien der Internationalen Energie Agentur



abgedeckte
Mrd. tJ*

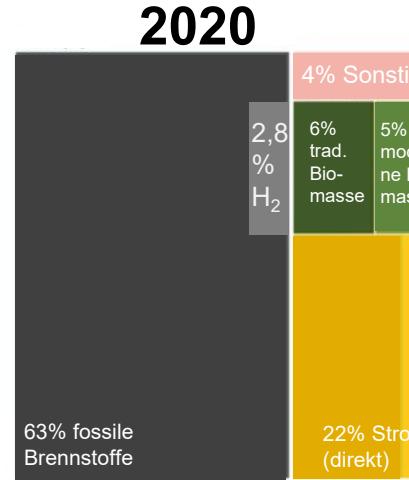
40



"Die Bestandsaufnahme folgt der wissenschaftlichen Erkenntnis, dass die globalen Treibhausgasemissionen bis 2030 um 43 % gegenüber dem Stand von 2019 gesenkt werden müssen..."

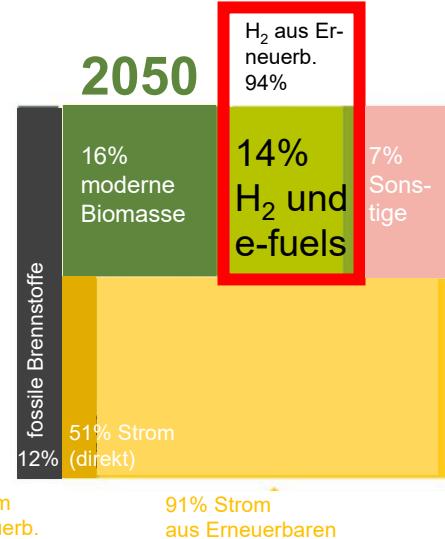
2020

Energiebedarf: 104.000 TWh

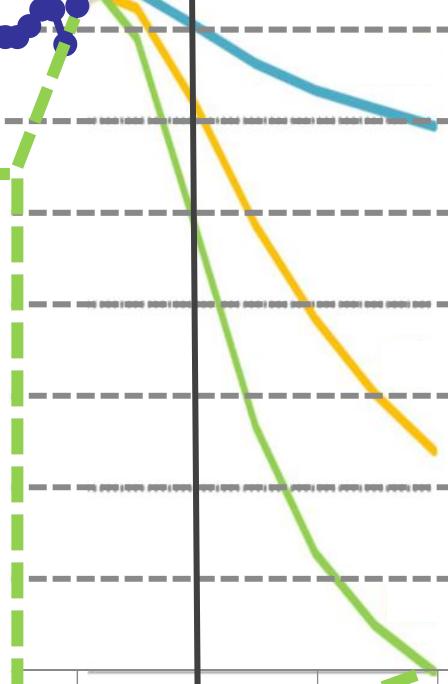


2050

Energiebedarf: 98.000 TWh

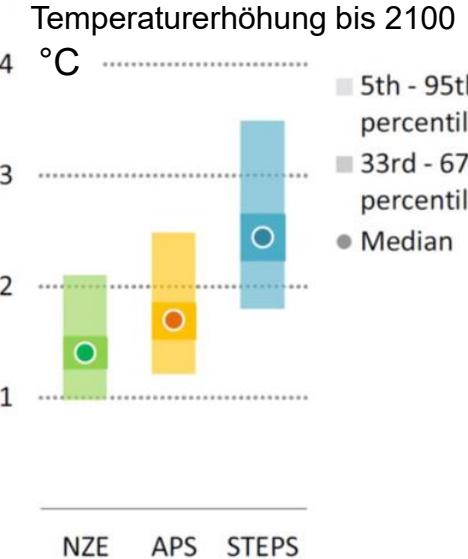


2020 2030 2040 2050



Stated Policies Scenario

Dieses Szenario spiegelt alle heute angekündigten politischen Absichten und Ziele wider, sofern sie durch detaillierte Maßnahmen zu ihrer Verwirklichung untermauert sind.



Announced Pledges Scenario

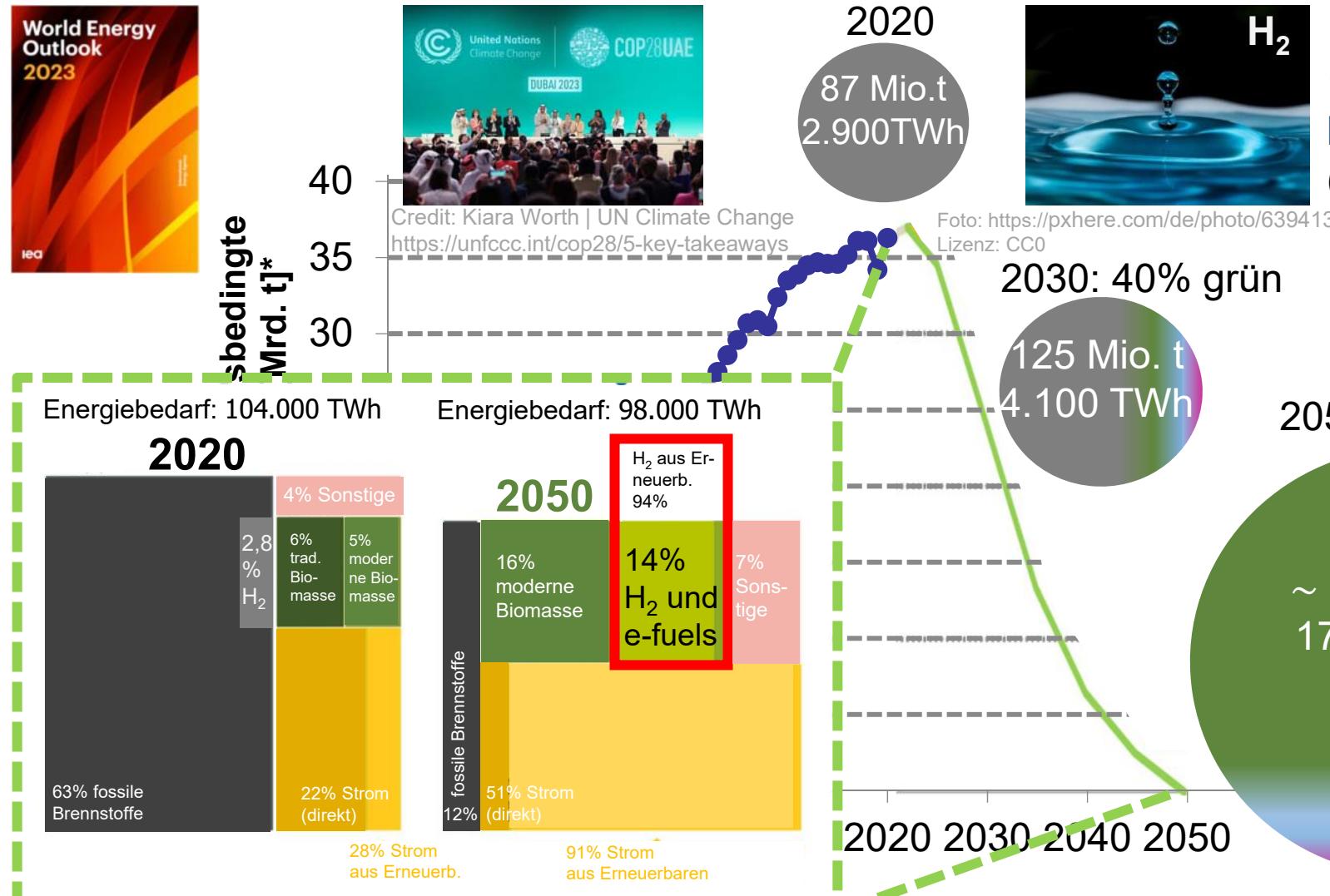
Dieses Szenario geht davon aus, dass alle angekündigten nationalen Energie- und Klimaziele der Regierungen vollständig und fristgerecht erreicht werden.

Net Zero Emissions by 2050 Scenario

Um die Ziele dieses Szenarios, das die globale Erwärmung auf 1,5 °C begrenzt, zu erreichen, sind noch erhebliche zusätzliche Fortschritte erforderlich..

Quelle: nach IEA, World Energy Outlook 2023
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
 License: CC BY 4.0

Szenarien der Internationalen Energie Agentur und mögliche Veränderung der Wasserstoff-“Farben”



Quelle: nach IRENA World Energy Transitions Outlook 2023

<https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>

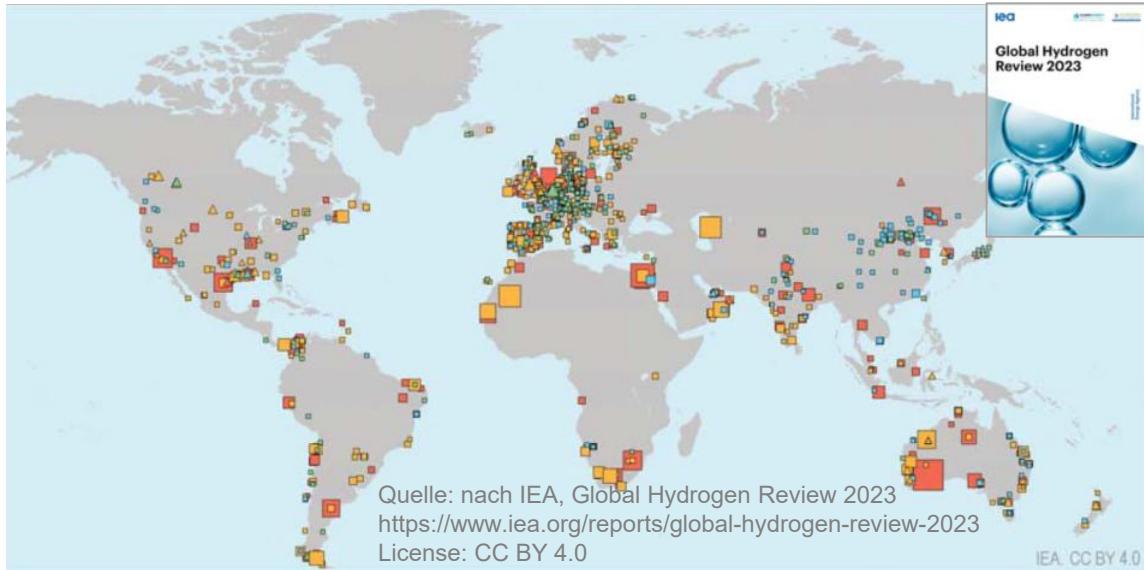
Wofür brauchen wir Wasserstoff kurz, mittel- und langfristig?

Wasserstoff und seine Folgeprodukte sind unerlässlich für eine klimaneutrale Weltenergieversorgung

- Als **Rohstoff zur Substitution von CO₂-behaftetem Wasserstoff** und seinen Folgeprodukten (Ammoniak, Methanol) in der Industrie, insbesondere in der Chemieindustrie.
- Für die **Umstellung fossil-basierter Industrieprozesse**, insbesondere in der Stahlindustrie (H₂), sowie zur Hochtemperatur-Prozesswärmebereitstellung.
- Als Energieträger zur Substitution fossiler Kraftstoffe in **Verkehrssektoren, die technisch oder wirtschaftlich nicht sinnvoll elektrifizierbar sind**, d. h. insbesondere im Flugverkehr, im Seeverkehr und in Teilen des Straßen-Schwerlastverkehrs und Schienenverkehrs (z. B. eKerosin, eDiesel).
- Als **Backup in der Stromversorgung** und zur verlustfreien **Langzeit-Speicherung großer Energiemengen**, insbesondere um saisonale Unterschiede der Stromerzeugung aus Wind und Sonne auszugleichen.
- Als **international handelbaren Energieträger**, insbesondere um die Nachfrage in Ländern bedienen zu können, die nicht inländisch gedeckt werden kann (z. B. Deutschland). Das Welthandelsvolumen kann längerfristig mehrere hundert Mrd. US\$ jährlich betragen.
- Zur **Transformation bestehender Infrastrukturen** und Vermeidung von stranded assets.....

Globaler Status der Projekte zur CO₂-armen Wasserstofferzeugung

als Frühindikator für den Markthochlauf von Wasserstoff(-technologien) insgesamt



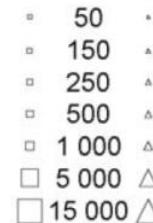
Elektrolyse-Projekte

- frühe Phase
- Machbarkeitsstudie
- FID/im Bau
- in Betrieb

CCUS-Projekte

- ▲ frühe Phase
- ▲ Machbarkeitsstudie
- ▲ FID/im Bau
- ▲ in Betrieb

Kapazität (kt H₂ pro Jahr)



→ **"Um bis 2050 Netto-Null-Emissionen zu erreichen, müssen die globalen kumulierten Investitionen [in Wasserstoff insgesamt] bis 2030 auf 1,2 Billionen US\$ und bis 2050 auf 10 Billionen US\$ steigen."**

(IEA: Global Hydrogen Review 2021)

Die Europäische Wasserstoffbank zur Förderung des Markthochlaufs



„Wasserstoff ist unverzichtbar, um die Dekarbonisierung der europäischen Industrie voranzutreiben und die Klimaziele der EU bis 2030 sowie Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen. Wasserstoff gehört zu den Schlüsseltechnologien der europäischen Netto-Null-Industrie-Verordnung.“

Durch den Ausbau der Wasserstofferzeugung werden wir den Einsatz fossiler Brennstoffe in der europäischen Industrie verringern und den Bedürfnissen schwer zu elektrifizierender Sektoren gerecht werden.“

Ziele im REPowerEU-Plan:
Steigerung der Erzeugung und Einführen von erneuerbarem Wasserstoff in der EU auf
20 Mio. Tonnen
bis 2030



Grüner Wasserstoff soll bereits bis 2030 ein Äquivalent von 7,4% des Endenergieverbrauchs decken.

Die vier Säulen der Europäischen Wasserstoffbank



Hinweis: Wasserstoffbedarf 2020: ca. 8,7 Mio. t. (EU/EFTA/UK), davon > 95% fossil

Quelle: Europäische Kommission 2023; FÖRDERUNG VON WASSERSTOFF DURCH EINE EUROPÄISCHE WASSERSTOFFBANK
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/fs_23_1610
Lizenz „Creative Commons Namensnennung 4.0 International“
Kartendarstellung: <https://fra.europa.eu/en/cooperation/eu-member-states>

Die Europäische Wasserstoffbank zur Förderung des Markthochlaufs



Ziele im REPowerEU-Plan:
Steigerung der Erzeugung
und Einführen von erneuerbarem
Wasserstoff in der EU auf
20 Mio. Tonnen
bis 2030



Für die erste
Auktion der
Wasserstoffbank
sind
800 Mio. EUR
vorgesehen.



Die vier Säulen der Europäischen
Wasserstoffbank



Hinweis: Wasserstoffbedarf 2020: ca. 8,7 Mio. t.
FTA/UK), davon > 95% fossil

„Um das Kostengefälle in der EU zwischen erneuerbarem und fossilem Wasserstoff zu verringern und die Kapitalkosten zu senken, wird Wasserstofferzeugern im Rahmen der Auktion ein Zuschuss in Form einer **festen Prämie pro erzeugtem kg Wasserstoff für eine Betriebsdauer von höchstens zehn Jahren gewährt.**“

Quelle: Europäische Kommission 2023; FÖRDERUNG VON WASSERSTOFF DURCH EINE EUROPÄISCHE WASSERSTOFFBANK
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/fs_23_1610
Lizenz „Creative Commons Namensnennung 4.0 International“
Kartendarstellung: <https://fra.europa.eu/en/cooperation/eu-member-states>

Ergebnisse der europäischen Pilotauktion 2023 für grünen Wasserstoff

Stand Mai 2024

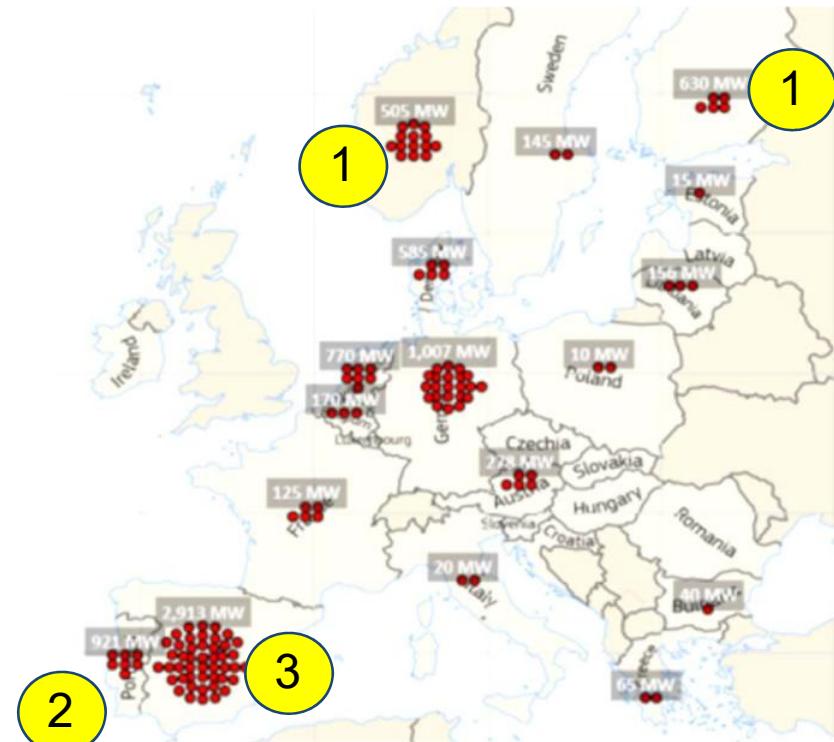


- 132 Gebote aus 17 Ländern mit einer Elektrolyseleistung von etwa 8.350 MW elektrisch.
- 7 Gebote wurden für die Förderung aus dem Budget von 800 Mio. € ausgewählt (720 Mio. €).

- Der **clearing price** der Auktion lag bei 0,48 €/kg H₂



- Ausgewählte Projekte:
- 1,5 Mio. t H₂ über 10 Jahre
- Förderung 0,37-0,48 €/kgH₂



Quelle: nach: EU Kommission 2024, European Hydrogen Bank pilot auction results, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/competitive-bidding_en?prefLang=de
Lizenz: Creative Commons BY 4.0

- Die aktuell bezuschlagten Projekte bewegen sich im kleinräumigem Kontext und dienen vor allem der H₂-Produktion und -Weiterverarbeitung vor Ort (z. B. Raffinerien, Ammoniak-Herstellung).
Aber: Innereuropäische Projekte befinden sich ebenfalls in der Planung/Realisierung...

Importoptionen für grünen Wasserstoff bis zum Jahr 2030

Beispiel: Der „Green Hydrogen Corridor“ dürfte sehr realistisch sein.



27 February 2023

MoU: A green hydrogen corridor between southern Spain and the Netherlands, ... Cepsa will supply renewable ammonia imports to ACE Terminal in Rotterdam from 2027...

<https://www.cepsa.com/en/press/cepsa-and-ace-terminal-will-create-green-hydrogen-supply-chain>

Das spanische Mineralölunternehmen CEPSA will zunächst die bestehenden Ammoniak-Produzenten in Andalusien (derzeit 400.000 t NH₃/a) mit grünem H₂ versorgen und das Regierungsziel in Spanien erfüllen (25% des industriellen H₂-Bedarfs bis 2030 regenerativ). Überschüsse sollen ab 2027 nach Rotterdam geliefert werden (MoU 02/2023) und können dort direkt genutzt (Yara betreibt in NL eine Düngemittelproduktion) oder dehydriert werden. Bis 2030 plant CEPSA Investitionen von 3 Mrd. € für die Produktion von ca. 1 TWh_{H2} bei Gestehungskosten um 3 €/kg_{H2} (2 GW_{H2} mit 7 GW Wind/PV). Je nach Marktpreis kann dies sehr lukrativ sein.

Importoptionen für grünen Wasserstoff bis zum Jahr 2030

Beispiel: Der „Green Hydrogen Corridor“ dürfte sehr realistisch sein.



27 February 2023

MoU: A green hydrogen corridor between southern Spain and the Netherlands, ... Cepsa will supply renewable ammonia imports to ACE Terminal in Rotterdam from 2027...

<https://www.cepsa.com/en/press/cepsa-and-ace-terminal-will-create-green-hydrogen-supply-chain>

14 June 2023

Yara Clean Ammonia and Cepsa seal an alliance to connect southern and northern Europa with clean hydrogen... <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-clean-ammonia-and-cepsa-seal-an-alliance-to-connect-southern-and-northern-europe-with-clean-hydrogen/>

Überschüssiges Ammoniak soll in Rotterdam dehydriert und der H₂ in das niederländische H₂-Netz eingespeist werden. Der dafür geplante ACE-Terminal soll 2026 in Betrieb gehen. Ziel: 1.200 km Pipeline bis 2030.

Das spanische Mineralölunternehmen CEPSA will zunächst die bestehenden Ammoniak-Produzenten in Andalusien (derzeit 400.000 t NH₃/a) mit grünem H₂ versorgen und das Regierungsziel in Spanien erfüllen (25% des industriellen H₂-Bedarfs bis 2030 regenerativ). Überschüsse sollen ab 2027 nach Rotterdam geliefert werden (MoU 02/2023) und können dort direkt genutzt (Yara betreibt in NL eine Düngemittelproduktion) oder dehydriert werden. Bis 2030 plant CEPSA Investitionen von 3 Mrd. € für die Produktion von ca. 1 TWh_{H2} bei Gestehungskosten um 3 €/kg_{H2} (2 GW_{H2} mit 7 GW Wind/PV). Je nach Marktpreis kann dies sehr lukrativ sein.

Importoptionen für grünen Wasserstoff bis zum Jahr 2030

Beispiel: Der „Green Hydrogen Corridor“ dürfte sehr realistisch sein.



27 February 2023

MoU: A green hydrogen corridor between southern Spain and the Netherlands, ... Cepsa will supply renewable ammonia imports to ACE Terminal in Rotterdam from 2027...

<https://www.cepsa.com/en/press/cepsa-and-ace-terminal-will-create-green-hydrogen-supply-chain>

14 June 2023

Yara Clean Ammonia and Cepsa seal an alliance to connect southern and northern Europa with clean hydrogen...

<https://www.yara.com/corporate-releases/yara-clean-ammonia-and-cepsa-seal-an-alliance-to-connect-southern-and-northern-europe-with-clean-hydrogen/>

Überschüssiges Ammoniak soll in Rotterdam dehydriert und der H₂ in das niederländische H₂-Netz eingespeist werden. Der dafür geplante ACE-Terminal soll 2026 in Betrieb gehen. Ziel: 1.200 km Pipeline bis 2030.

Das spanische Mineralölunternehmen CEPSA will zunächst die bestehenden Ammoniak-Produzenten in Andalusien (derzeit 400.000 t NH₃/a) mit grünem H₂ versorgen und das Regierungsziel in Spanien erfüllen (25% des industriellen H₂-Bedarfs bis 2030 regenerativ). Überschüsse sollen ab 2027 nach Rotterdam geliefert werden (MoU 02/2023) und können dort direkt genutzt (Yara betreibt in NL eine Düngemittelproduktion) oder dehydriert werden. Bis 2030 plant CEPSA Investitionen von 3 Mrd. € für die Produktion von ca. 1 TWh_{H2} bei Gestehungskosten um 3 €/kg_{H2} (2 GW_{H2} mit 7 GW Wind/PV). Je nach Marktpreis kann dies sehr lukrativ sein.

14 November 2023

Niederländischer König Willem-Alexander in Duisburg und Marl um Wasserstoffprojekte voranzutreiben

<https://www.deutschlandfunk.de/niederlaendischer-koenig-willem-alexander-in-duisburg-und-marl-um-wasserstoffprojekte-voranzutreiben-100.html>

Geplant sind zwischen den Niederlanden und Deutschland

- bis 2027 eine Wasserstoffpipeline zwischen Rotterdam und Duisburg
- eine gemeinsame Ausschreibung von H₂-Importen über H2Global

Wann kommt das Wasserstoffnetz in Deutschland?

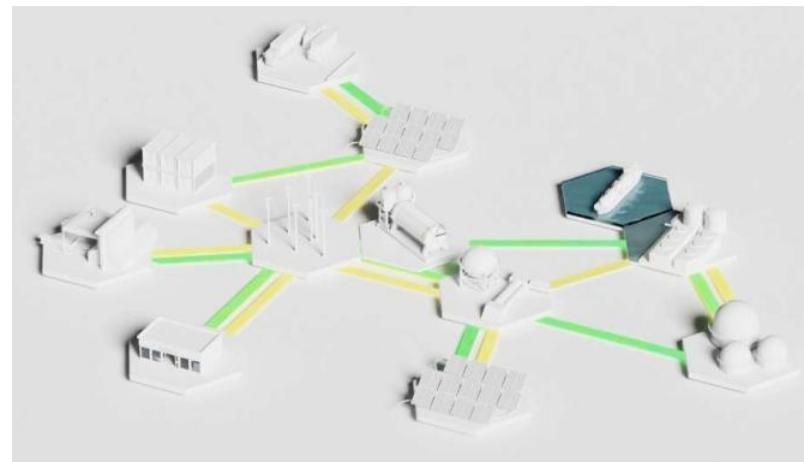
Wasserstoff-Kernnetz 2032



Quelle: FNB Gas e.V., 2024
<https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/>

Deutschlandweite Abfrage von Infrastrukturbedarf für das Strom- und Wasserstoffnetz (März 2024)

Quelle: <https://infrastrukturbedarf-abfrage-nep.de/>



Quelle: FNB Gas e.V., 2024
<https://fnb-gas.de/pressematerialien/erklaervideo-so-planen-die-fnb-gas-das-wasserstoffnetz/>

Wasserstoff H2 Infrastruktur EU backbone 24.pptx



12.04.2024 – Pressemitteilung

12.04.2024 PRESSEMITTEILUNG Energiedaten und -szenarien

Gesetz zur Wasserstoff-Netzentwicklungsplanung und zur Kernnetz-Finanzierung im Deutschen Bundestag beschlossen

Quelle:
<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/04/20240412-gesetz-zur-wasserstoff-netzentwicklungsplanung.html>

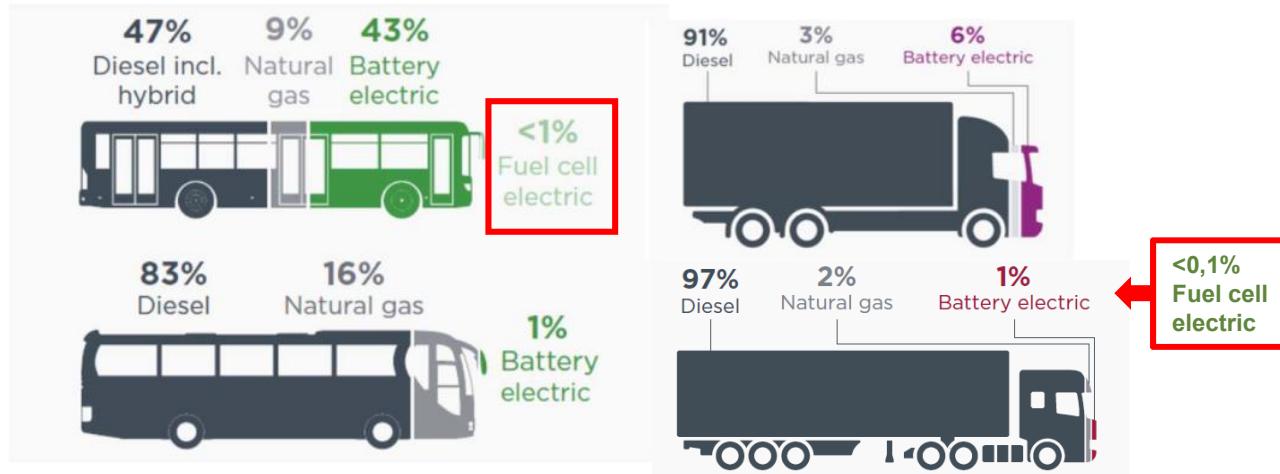


Spatenstich
Süddeutsche
Erdgasleitung
SEL (H₂ ready)
8.3.2024
Fotos: F. Staß



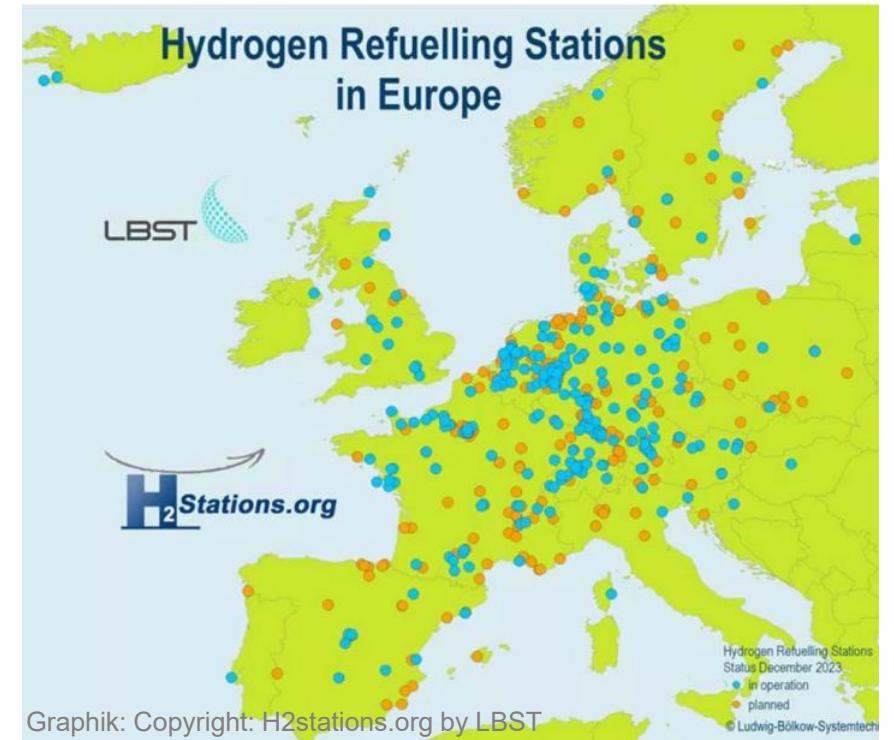
Wann kommt der Wasserstoff im Verkehr?

Der EU-27-Markt für emissionsfreie Nutzfahrzeuge hat sich 2023 mit 11.000 Fahrzeugen gegenüber dem Vorjahr verdoppelt, allerdings spielt Wasserstoff noch keine Rolle.



Graphik: icct 2024: Race to Zero - European heavy-duty vehicle market development quarterly (January–December 2023), <https://theicct.org/>. Copyright: THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION THEICCT.ORG Lizenz: CC BY-SA 4.0

Von 265 Tankstellen in der EU (Stand Ende 2023) eignen sich bisher etwa 100 für die Betankung von Nutzfahrzeugen. Der Absatz ist jedoch gering.



Graphik: Copyright: H2stations.org by LBST

Wann kommt der Wasserstoff im Verkehr?



13. Mai 2024

Schwere Nutzfahrzeuge: Rat beschließt strengere CO₂-Emissionsnormen

Für schwere Lkw ab 16 t Gesamtgewicht* gilt für die Neufahrzeugflotte gegenüber 2019:

- 45 % ab 2030
 - 65 % ab 2035
 - 90 % ab 2040

Für Stadtbusse gilt

- 90 % ab 2030
 - 100 % ab 2035 (Emissionsfreiheit)

Hintergrund:

Auf den Schwerlastverkehr entfallen mehr als 25 % der Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs in der EU

* Die Vorgaben gelten ab 2035 auch für mittelschwere Lastkraftwagen, schwere Lastkraftwagen über 7,5 t und Reisebusse.

<https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2024/05/13/heavy-duty-vehicles-council-signs-off-on-stricter-co2-emission-standards/>
Graphik: Lizenz „Creative Commons Namensnennung 4.0 International“
Wasserstoff H2 Infrastruktur EU backbone 24.pptx

Alternative Fuels Infrastructure Regulation AFI

in Kraft seit 13.4.2024

Bis 2030 Wasserstoftankstellen

- alle 200 Kilometer entlang des TEN-V-Kernnetzes und
 - an städtischen und multimodalen Knotenpunkten.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0812>



Kartendarstellung: Europäische Kommission 2021; TEN-T Core Network; https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2021-06/ten-t-core-networks_en.pdf

Corridors Schematic map (Regulation (EU) 1153/2021
<https://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/site/en/maps.htm>
Lizenz „Creative Commons Namensnennung 4.0 International“

26.07.2023

"Wir schaffen Klarheit und Planungssicherheit für die Wasserstoffwirtschaft"



Das Bundeskabinett hat am 26. Juli die Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie beschlossen.

<https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/2023/07/230725-nws.html>



Deutscher Bundestag
10. Mai 2024

„Was den ... „Wasserstoffhochlauf im Verkehrssektor“ angeht, so teilt die Bundesregierung mit, dass für die noch offenen Anträge ... für die Errichtung von Wasserstofftankstellen und Elektrolyseanlagen **keine Haushaltsmittel** zur Verfügung stünden.... Kurzfristig seien [auch] keine neuen Förderprogramme zur Stärkung der Wasserstoffmobilität geplant...“

<https://www.bundestag.de/presse/hib/kurzmeldungen-1002104>



**Wir werden nicht an unseren Zielen gemessen,
sondern an unseren Erfolgen!**

