

Wasserstoff - Eine kurze Einführung



INHALT

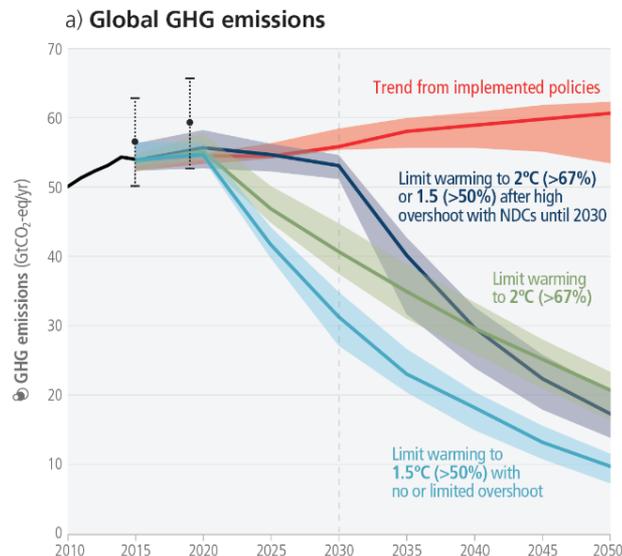
Gliederung

- Motivation und Einführung
- Grundlagen der Wasserstofftechnologie
- Anwendungen und Nutzung
- Wasserstoffsicherheit
- Wirtschaftliche Aspekte
- Zukunftsperspektive
- Wasserstoff in Österreich

EINFÜHRUNG

Motivation

- Bekämpfung des **Klimawandel** ist eine der größten **Herausforderungen** des 21. Jh.
- Zielerreichung benötigt massive **Anstrengungen in allen Emissionsbereichen** (Industrie, Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft, ...)
- **Netto-null** bei Emissionen ist extreme Herausforderung - **Wasserstoff** kann und wird dazu beitragen

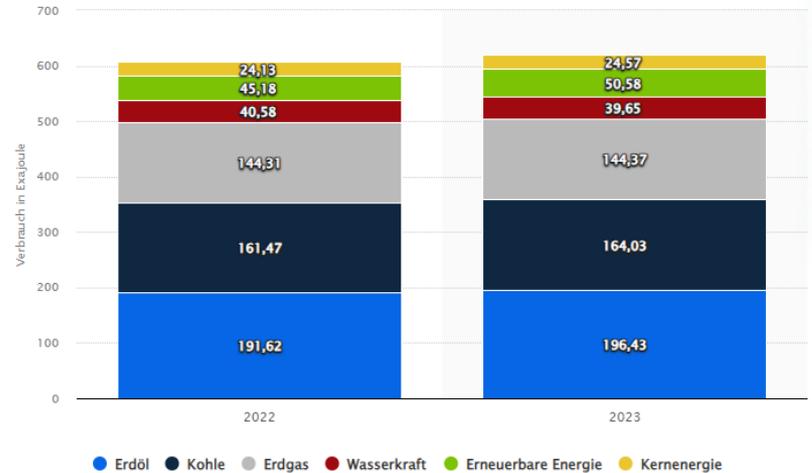


Quelle: IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647)

EINFÜHRUNG

Fossile Energieträger und Hard-to-abate Sektoren

- Anteil an **fossilen Energieträgern** am **Primärenergieverbrauch** (nicht nur Elektrizität) immer noch extrem hoch
- Einige Sektoren besonders schwer zu dekarbonisieren (**hard-to-abate**)
- Zusätzlich zur Energieaufbringung **auch prozessbedingte Emissionen** zu berücksichtigen (z.B. Stahl- und Zementerzeugung)

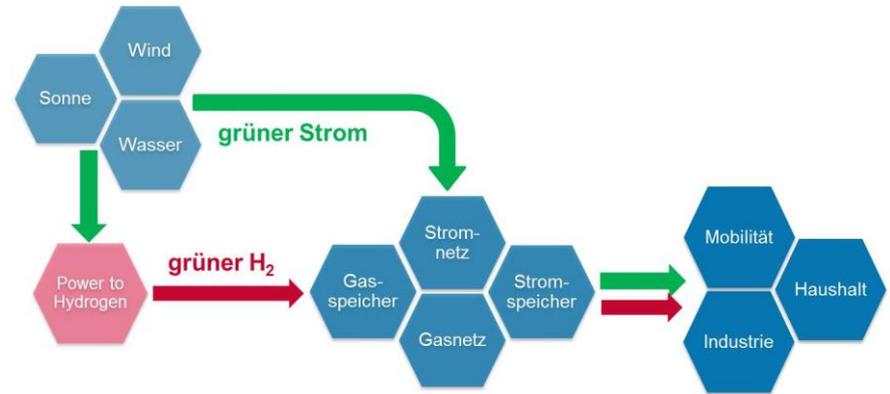


Quelle: Energy Institute. (20. Juni, 2024). Weltweiter Primärenergieverbrauch nach Energieträger in den Jahren 2022 und 2023 (in Exajoule) [Graph]. In Statista. Zugriff am 05. August 2024, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/42454/umfrage/weltweiter-primarenergieverbrauch-nach-brennstoffen-in-oelaequivalent/>

EINFÜHRUNG

Wasserstoff als Schlüssel zur Energiewende

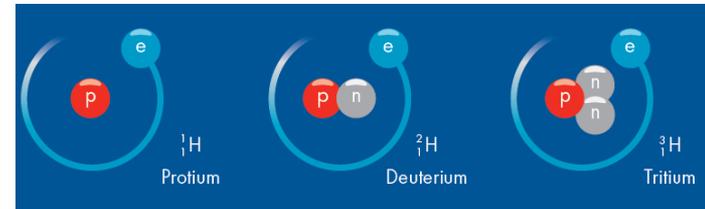
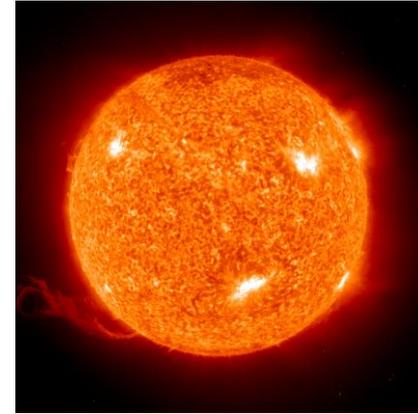
- **Wasserstoff** wird unverzichtbarer **Teil der Energiewende**
- Vielfältig einsetzbarer **Energieträger** und -speicher
- **Multiple Anwendungen** in Industrie, Mobilität und Haushalten
- Zusätzlich **stofflicher Einsatz** (z.B. als chemischer Ausgangsstoff, zur Reduktion von Eisen)
- Auch Relevanz in CCU (Carbon Capture and Utilization) Anwendungen



EINFÜHRUNG

Physikalische Grundlagen

- Erstes Element im Periodensystem
- **Häufigstes Element** im Universum (>90 % aller Atome)
- Primärer Brennstoff der Sonne (Fusion)
- **Auf der Erde** nicht in atomarer Form (H), in reiner Form nur **sehr selten** (als H₂)
- In molekularer Form (H₂) **farbloses Gas** (Schmelzpunkt -259 °C, Siedepunkt -252 °C)
- Sehr **hohe gravimetrische Dichte** (33,33 kWh/kg), sehr **geringe volumetrische Dichte** (3 kWh/m³)



GRUNDLAGEN DER WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

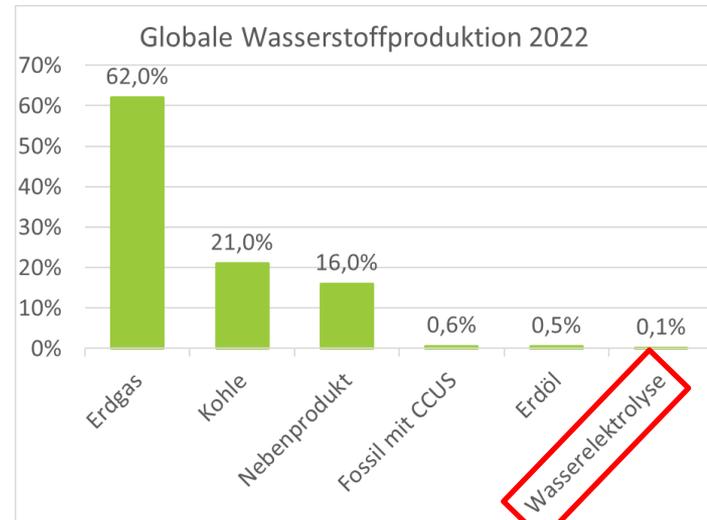
Terminologie der „Wasserstofffarben“

„Farbe“	Technologie	Ausgangsmaterial
Grün	Elektrolyse	Wasser + Erneuerbare Elektrizität
	Gasreformierung	Biogas/Biomasse
	Photoelektrolyse	Wasser + Sonnenlicht
	Biosynthese	Mikroorganismen
Pink	Elektrolyse	Wasser + Elektrizität (nuklear)
Gelb		Wasser + Elektrizität (Stromnetz)
Blau	Erdgas, Kohle + CCUS	Erdgas, Kohle
Türkis	Pyrolyse	Erdgas
Grau	Gasreformierung	
Braun	Vergasung	Braunkohle (Lignit)
Schwarz		Schwarzkohle

GRUNDLAGEN DER WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Erzeugung von Wasserstoff

- **Aktuell** größtenteils aus **fossilen Energieträgern** erzeugt (Dampfreformierung, $\text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2$, Vergasung)
- Fällt auch als **Nebenprodukt** von z.B. Chlor-Alkali Elektrolyse oder in der Kunststoffproduktion an
- „**Grüner**“ Wasserstoff aus **Wasserelektrolyse** noch eine Nische, aber stark wachsend
- „**Low-carbon**“ Wasserstoff: u.a. fossile Erzeugung + Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)

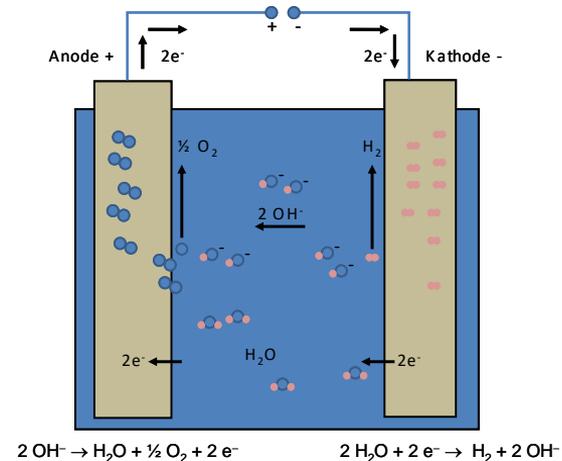


Quelle: Global Hydrogen Review 2023, IEA

GRUNDLAGEN DER WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Elektrolyse

- Spaltung von Wasser (H_2O) in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) mittels Elektrizität
- Technologie seit rund **100 Jahren** im Einsatz
- Bei Verwendung von erneuerbarem Strom ist Wasserstoff ebenfalls erneuerbar (grün)
- Verschiedene **Elektrolysetechnologien** am Markt (AEL, PEM, AEM, SOEC)
- Systemwirkungsgrad bis über 80%
- Elektrischer Wirkungsgrad ca. 55%-65%
- Moderne Anlagen in Containerbauweise (meist 40ft-Container)



GRUNDLAGEN DER WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Weitere „grüne“ Erzeugungsverfahren

- **Pyrolyse von Biomethan**
 $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2 \text{H}_2$
- **Chemische Wasserspaltung** mit Alkali- und Erdalkalimetallen
 $\text{M} + n \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{M}(\text{OH})_n + n/2 \text{H}_2 \quad n = 1, 2 \text{ und } 3$
- **Photolytische Prozesse**
Algen/Bakterien und Sonnenlicht
- **Photokatalytische Prozesse**
Künstliche Photosynthese mit Katalysatoren
- **Biologische Prozesse**
Bakterien und Enzyme durch Gärung

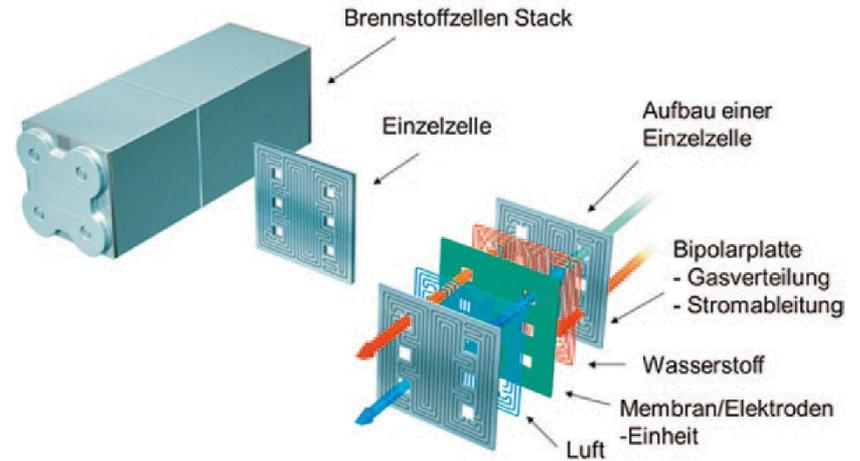


Erst im Labormaßstab

GRUNDLAGEN DER WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Brennstoffzelle

- Umgekehrte Reaktion zur Elektrolyse: aus H_2 und O_2 werden Wasser und Strom
- Direkte **Umwandlung** von **chemischer** in **elektrische Energie**
- Keine Emissionen von Schadstoffen oder Lärm, keine bewegten Bauteile
- Einsatz in Mobilität und Stromerzeugung

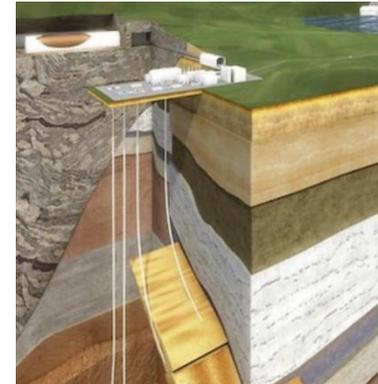
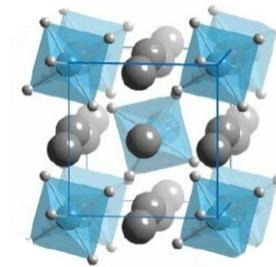
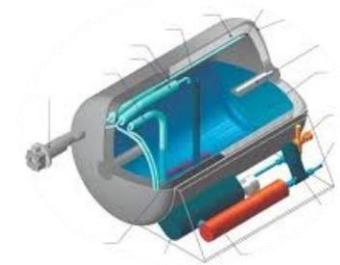
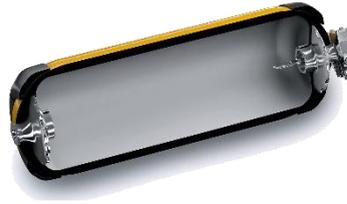


Quelle: Wüchner, E.: Wasserstoff - Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge. Daimler Chrysler AG, Forum Zukunftstechnologien 05. Juli 2007.

GRUNDLAGEN DER WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Speicherung von Wasserstoff

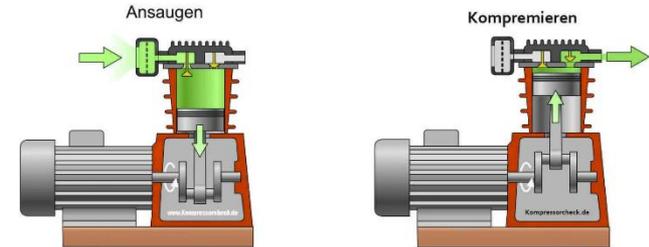
- Als komprimiertes Gas (bis zu Drücken von 1.000 bar)
- Als Flüssigwasserstoff ($T < -253^{\circ}\text{C}$)
- In gebundener Form (Metallhydride, organische Träger)
- Geologische Speicher (Salzkavernen, Porenspeicher, Felskavernen, ... z.B. [Underground Sun Storage 2030 in OÖ](#))



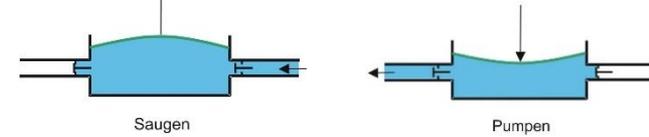
GRUNDLAGEN DER WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Verdichtung von Wasserstoff

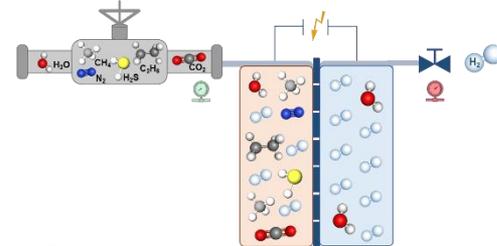
- Drücke bis über 1.000 bar
- Gängigste Technologien: **Hubkolbenverdichter, Membranverdichter**
- Alternative Technologien: elektrochemische Kompression, ionische Verdichter, Kryopumpen, Adsorptionsverdichter (Metallhydride)
- Wasserstoffkompressoren sehr **kostenintensiv** (Anschaffung, Wartung und Betrieb)
- **Energieaufwand:** bis zu einige % des Energieinhalts



Quelle: kompressorcheck.de



Quelle: Wikipedia

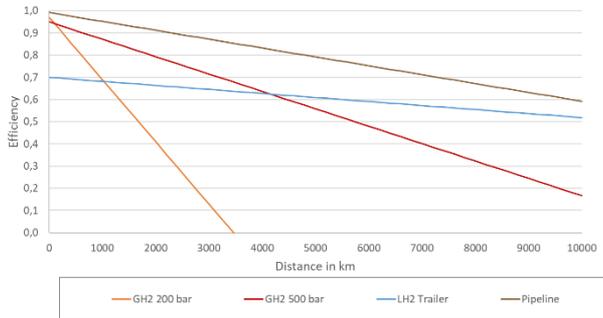


Quelle: HyCentA

GRUNDLAGEN DER WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Transport

- **Pipelines** (gasförmig, auch Umwidmung von bestehenden Erdgaspipelines möglich)
- **Trailer** (gasförmig und flüssig, LKW, Bahn)
- **Schiff** (flüssig)
- Effizienz und Wirtschaftlichkeit hängen von Transportdistanz und Mengen ab



Quelle: PRpetuum GmbH

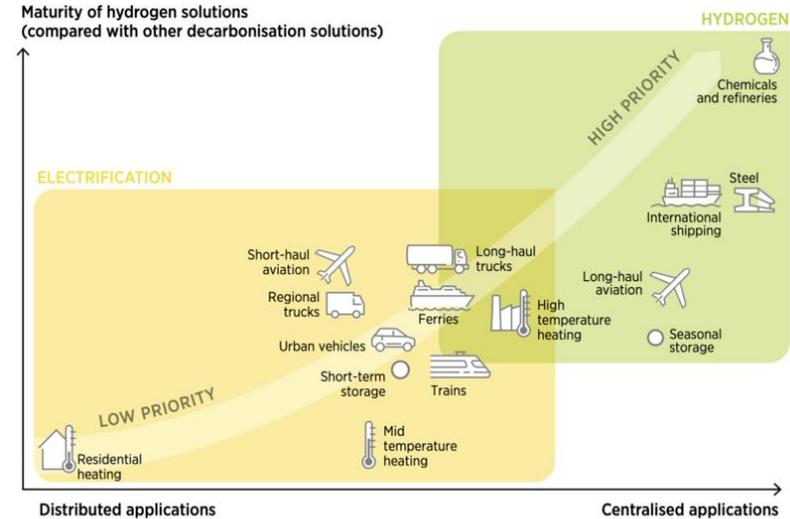


Quelle: Kawasaki Report 2016

ANWENDUNG UND NUTZUNG

Anwendungsbereiche

- **Industrie** (stoffliche Nutzung, Reduktionsmittel, Hochtemperaturprozesse)
- **Treibstoff** für Transport
- **Energiespeicherung** (auch saisonal)
- Erzeugung von Elektrizität
- (Gebäudeheizung)

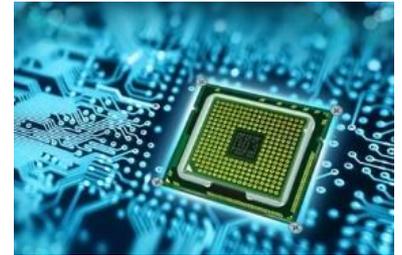


Source: (IRENA, 2022e)

ANWENDUNG UND NUTZUNG

Industrieanwendungen von Wasserstoff

- **Raffination (Hydro-cracking)**
- **Ammoniakherstellung**
- Ausgangsstoffe für chemische Industrie
- Reduktionsmittel in Metallurgie (z.B. **Stahlerzeugung**)
- Hochtemperaturprozesse (ca. 2.000° C, mit reinem O₂ ca. 3.000° C)
- **Trägergas** (z.B. Halbleiterindustrie)



ANWENDUNG UND NUTZUNG

Transport

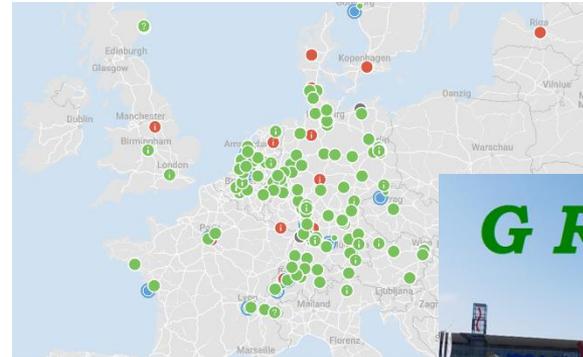
- Antrieb mittels **Brennstoffzelle** (elektrisch) oder **Verbrennungsmotor**
- **Betankung in wenigen Minuten** möglich (PKWs 5 Minuten, LKWs, Busse 15 Minuten)
- **Hohe Reichweiten** (PKW > 500 km; LKW >400 km)
- Komplementäre Technologie zu batterieelektrischen Fahrzeugen
- Auch für Schiff- und Luftfahrt interessant
- H₂ auch als Ausgangsstoff für **E-Fuels**



ANWENDUNG UND NUTZUNG

Wasserstofftankstellen

- Über 900 Wasserstofftankstellen weltweit
- Europa: 160 in Betrieb, 60 in Bau
- **Österreich: 5 öffentliche Tankstellen**
- 350 bar (Busse, LKWs) und 700 bar (PKWs, Busse, LKW), flüssig (LKWs)
- Wichtigste **Komponenten**: Speicher, Kompressoren, Kühlung, Dispenser (Zapfsäule), Abfüllstation



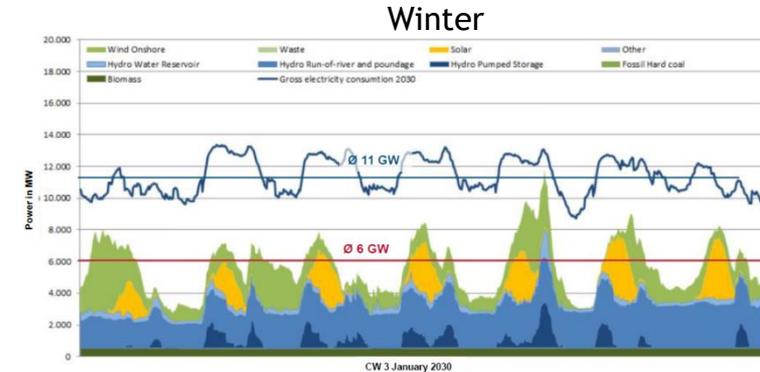
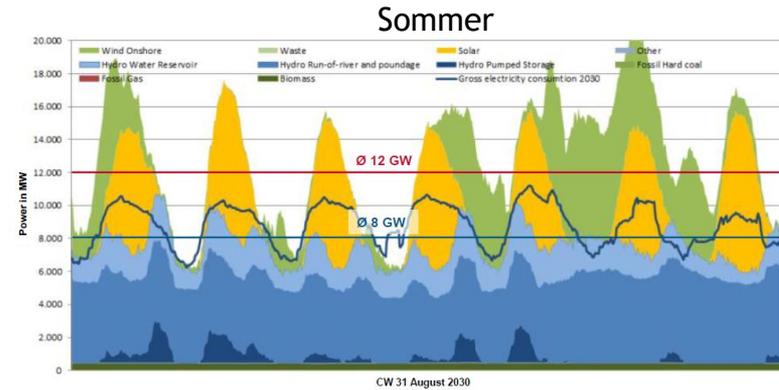
Quelle: [H2.live](https://www.h2.live)



ANWENDUNG UND NUTZUNG

Energiewirtschaft

- **Langfristige Energiespeicherung** möglich (saisonaler Ausgleich)
- **Hohe Energiemengen** speicherbar (TWh)
- **Netzdienlicher Betrieb** (Lastmanagement, Regelenergiemarkt) möglich
- **Kraft-Wärme-Kopplung**
- **Notstromversorgung**

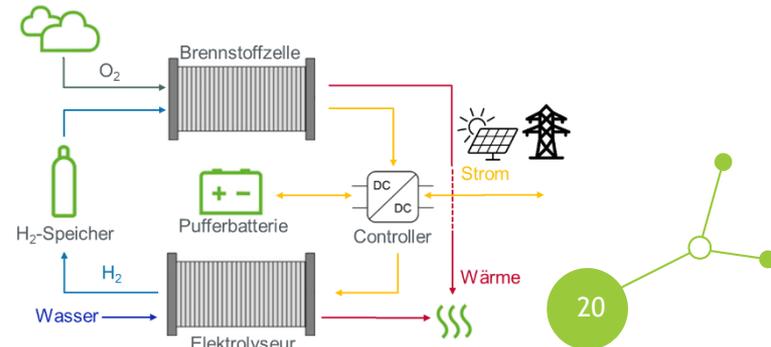
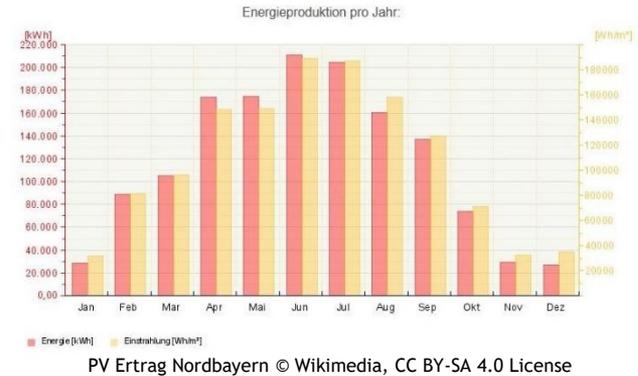


Quelle: AEA

ANWENDUNG UND NUTZUNG

Beispiel saisonale Energiespeicherung Haushalt

- **Durchschnittshaushalt** in Österreich: ca. 3.700 kWh/Jahr (rd. 10 kWh/Tag)
- Für 3.700 kWh/Jahr benötigt man PV mit ca. 3,9 kWp
- Entspricht PV Anlage mit ca. 20-25 m²
- **Aber:** Leistung im Sommerhalbjahr 3x so groß wie im Winterhalbjahr
- Tagesversorgung benötigt ca. 2-4 kWh (Batterie-) Speicher, **Ganzjahresversorgung** ca. 1.000 kWh Speichermöglichkeit
- Entspricht ca. 60 kg H₂ bei Rückverstromung mit Brennstoffzelle



ANWENDUNG UND NUTZUNG

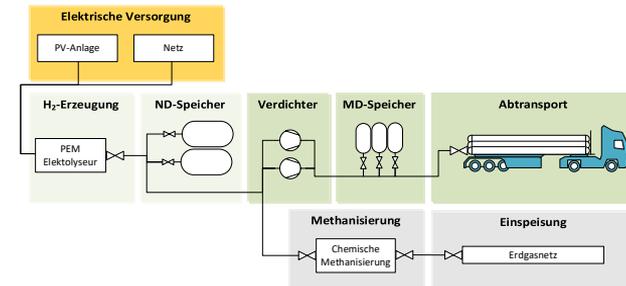
Beispiel 1 MW Elektrolyseur

- Ungefähre* Errichtungskosten:
 - Elektrolyseur: 1,5 Mio. €
 - Speicher + Kompressor: >1 Mio. €
 - Trailerabfüllstation: 0,1-0,2 Mio. €
 - Trailer: 0,3-1,2 Mio. €
 - Planung, Bau, Inbetriebnahme: 1-1,5 Mio.€
- Produktionskapazität: ~19 kg/h, 450 kg/d, 150 t/a
- Anwendungen:
 - 5.000 MWh/a thermische Energie
 - 3.000 MWh/a elektrische Energie (~800 Haushalte)
 - 150.000 PKW km/a
 - 20.000 Bus/LKW km/a

*Tatsächliche Kosten hängen stark vom jeweiligen Projekt ab, es handelt sich hier nur um eine grobe Kostenindikation nach derzeitigem Stand. Zukünftig ist mit deutliche Kostenreduktionen zu rechnen



Quelle: Renewable Gasfield Gabersdorf: Zwei Jahre Erfahrung mit Power-to-Gas (P2G) Technologie - EnviCare® Engineering GmbH



Projekt Renewable Gasfield, Gabersdorf, Steiermark

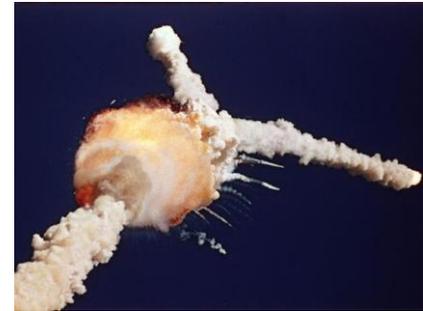
WASSERSTOFFSICHERHEIT

Gefahren von Wasserstoff

- Brennbares Gas
- Weite Explosionsgrenzen (4 %_{Vol} - 76 %_{Vol} in Luft)
- Unsichtbares Gas
- Unsichtbare Flamme (UV-Licht)
- Hohe Speicherdrücke (bis 1.000 bar)
- Geringe Dichte → Ansammlung an höchstem Punkt
- Wasserstoffversprödung



Hindenburg (1937)



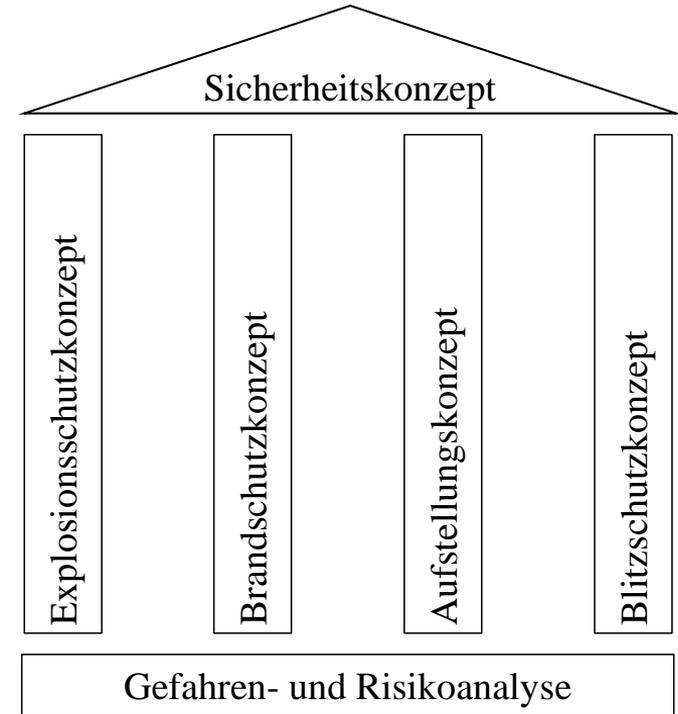
Challenger (1986)



WASSERSTOFFSICHERHEIT

Sicherheitskonzept

- **Allgemeine Anforderungen**
 - > Zutritt nur für berechtigte Personen
 - > Abtrennung durch Zäune
 - > Betrieb nur durch geschultes Personal
 - > Korrosionsschutz beachten
- **Gefahren- und Risikoanalyse**
 - > Gefahren ermitteln
 - > Davon ausgehende Risiken bestimmen
 - > Bestehende Risiken durch Maßnahmen unter duldbares Restrisiko minimieren



WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE

Chancen der Wasserstoffwirtschaft

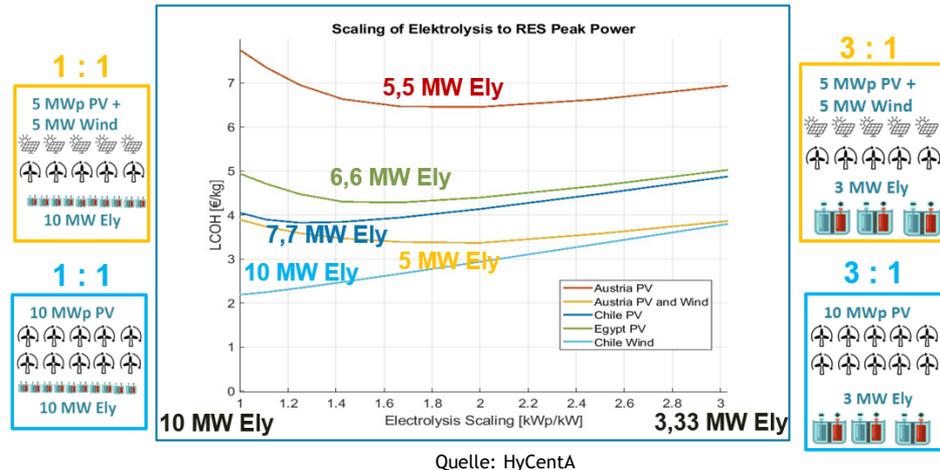
- **Treibhausgasreduktion**, Luftreinhaltung und Lärmschutz
- Energiewende rasch und effizient umzusetzen
- Nutzung erneuerbarer und **eigener Ressourcen**
- Außenhandelsbilanz verbessern
- Neue Märkte und Technologieführerschaft
- Hohe **Wertschöpfung im Land**
- Neue Arbeitsplätze (**Green Jobs**)



WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE

Wasserstoffgestehungskosten

- Wasserstoffgestehungskosten hängen stark vom **Strompreis** ab
- Je nach Art und Preis des Stroms ergeben sich ideale Konfigurationen
- Gegenden mit viel günstigem Wind- und/oder PV-Strom begünstigt
- Mit Kombination **Wind+PV** theoretisch auch in AUT passable Kosten möglich



WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE

Transportkosten

- Transportkosten tragen **wesentlich zum Endpreis** bei
- Transport gasförmig (Pipeline), flüssig (LH2) oder in gebundener Form (Ammoniak, Methanol, LOHC)
- Hohe Transportkosten können günstige Gesteungskosten konterkarieren
- Für Mitteleuropa **Pipelinetransport** aus Nordafrika und/oder Süd- bzw. Osteuropa vielversprechend

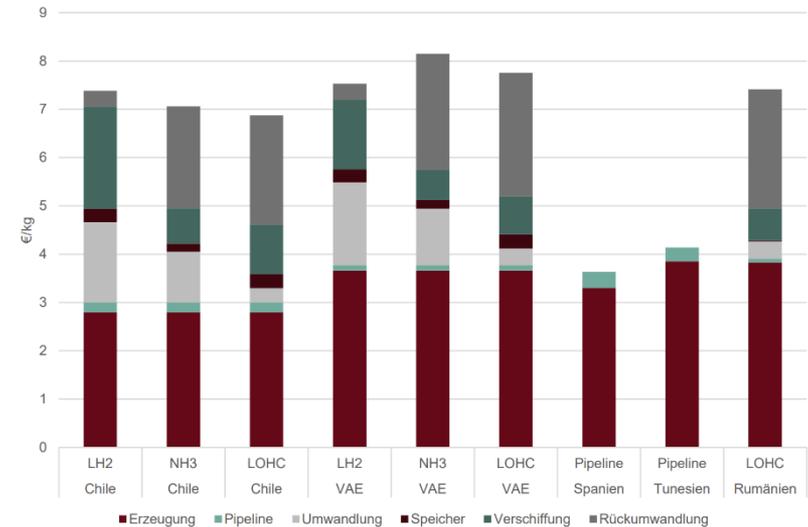


Abbildung 4-8: Kosten für den Wasserstoff-Import aller Transportrouten im optimistischen Szenario 2030

Quelle: Importmöglichkeiten für erneuerbaren Wasserstoff, J. Kathan et al., AIT 2022

WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE

Zahlungsbereitschaft

- Zahlungsbereitschaft in **Mobilitätsanwendungen** am höchsten
- Bei allen anderen Anwendungen (noch) große **Differenz zwischen Gestehungskosten und Zahlungsbereitschaft**
- **Sektorkopplung** von Mobilität und Industrie als potenzieller Beschleuniger des Markthochlaufs

DOE National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap (Draft)

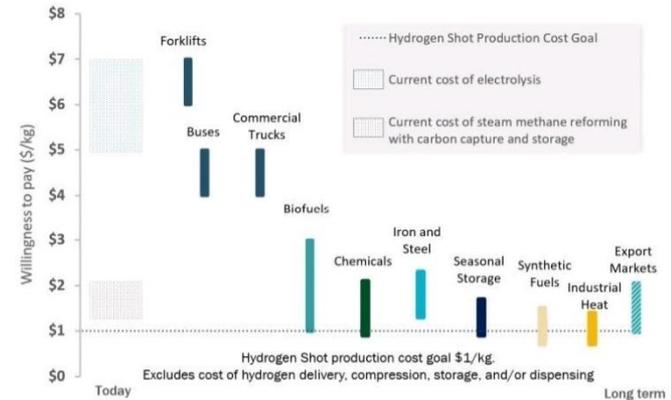


Figure 10: Willingness to pay, or threshold price, for clean hydrogen in several current and emerging sectors (including production, delivery, and conditioning onsite, such as additional compression, storage, cooling, and/or dispensing).⁴⁸

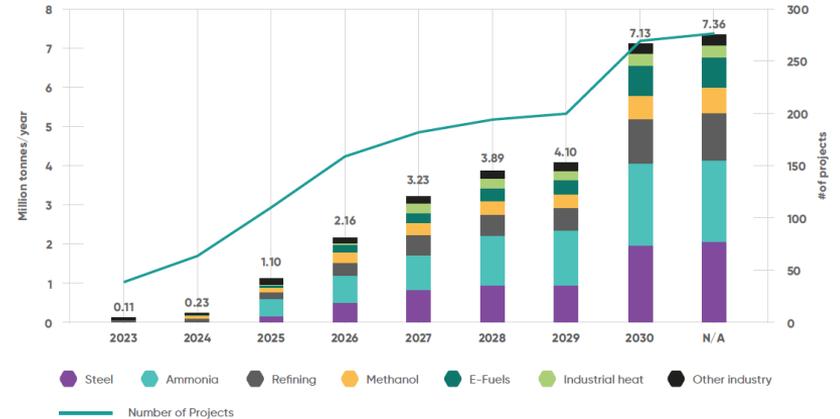
Quelle: US Department of Energy

ZUKUNFTSPERSPEKTIVE

Bedarfsprognosen

- **Bedarf** für grünen Wasserstoff **wird** die nächsten Jahre **massiv steigen**
- Bis 2030 sollen z.B. in EU 42% des in der Industrie eingesetzten H₂ erneuerbar sein, bis 2035 60%
- Bis 2030 mind. 1% der Kraftstoffe im Verkehr erneuerbar (H₂ und E-Fuels)

Cumulative announced consumption of clean hydrogen in industry by 2030 in Europe (Mt/year and # of projects)

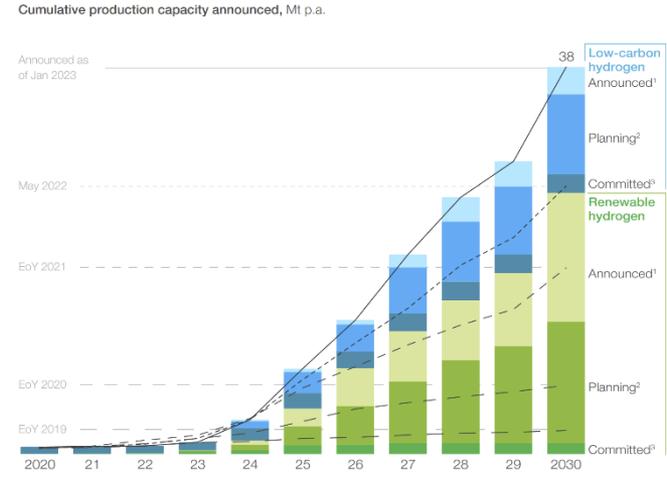


Quelle: Clean Hydrogen Monitor 2023, Hydrogen Europe

ZUKUNFTSPERSPEKTIVE

Geplante Produktionskapazitäten und Projekte

- Derzeit weltweit über 1.000 Wasserstoffprojekte angekündigt
- Produktion von „sauberem“ Wasserstoff (erneuerbar und low-carbon) von 1 Mio. t/a heute auf 38 Mio. t/a 2030
- Bis 2030 Elektrolyseleistung von 232 GW geplant (2022: 0,7 GW)



Quelle: [Hydrogen Insights 2023](#), Hydrogen Council

ZUKUNFTSPERSPEKTIVE

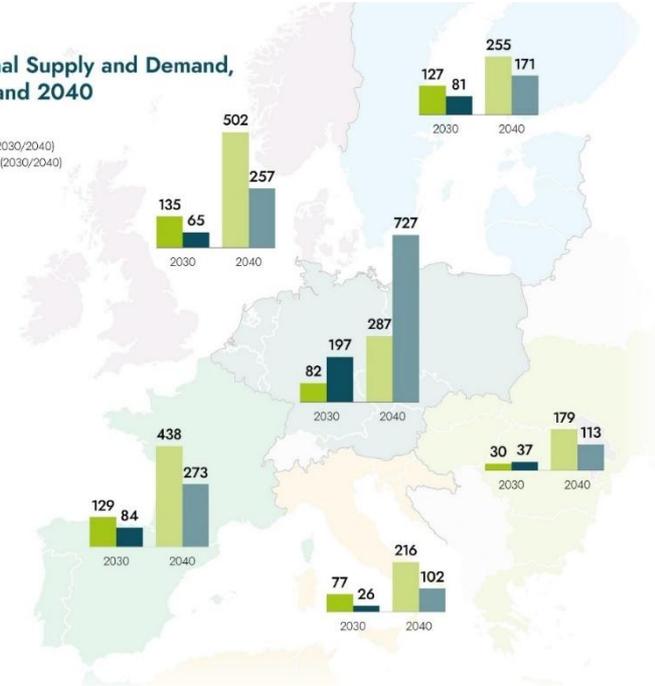
Angebot und Nachfrage in Europa

- Prognostizierte Nachfrage in Europa nach erneuerbarem Wasserstoff übersteigt Angebot regional deutlich
- **Mitteleuropa mit größtem (ungedeckten) Bedarf**
- **Umverteilung innerhalb und Import von außerhalb Europas nötig, um Bedarf decken zu können**

Regional Supply and Demand,
2030 and 2040

(TWh)^{1,2,3}

■ Supply (2030/2040)
■ Demand (2030/2040)



Quelle: [European Hydrogen Backbone. Five hydrogen supply corridors for Europe in 2030](#)

ZUKUNFTSPERSPEKTIVE

European Hydrogen Backbone

- Europa wird grünen Wasserstoff importieren müssen
- **Verteilung** innerhalb Europas **hauptsächlich via Pipeline** → European Hydrogen Backbone
- Großteils **Umwidmung** bestehender Erdgaspipelines
- **Importregionen:** Nordafrika, Südeuropa, Osteuropa, Nordeuropa, Südamerika (?)
- **H2South Corridor** von Tunesien über IT, AT bis DE



Quelle: Extending the European Hydrogen Backbone -
A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 21 Countries, April 2021

ZUKUNFTSPERSPEKTIVE

Europäische H₂-Gesetzgebung

- Ambitionierte Zielsetzung in der EU durch **Europäischer Green Deal, Fit für 55, REPowerEU**
- Renewable Energy Directive (RED) II und III definieren erneuerbaren und low-carbon Wasserstoff und geben ambitionierte Ziele vor
- z.B. RED III: bis 2030 40%, bis 2035 60% Anteil an erneuerbarem H₂ in der Industrie
- **Beträchtliche europäische Forschungs- und Fördermittel** (z.B. Horizon-JTI-CleanH2 bzw. EU Wasserstoffbank)



Quelle: Greentech Cluster

WASSERSTOFF IN ÖSTERREICH

Österreichische Wasserstoffstrategie

- Aktueller **Bedarf** der Industrie **140.000 t/a**, quasi zur Gänze aus fossilen Quellen (Erdgas)
- Entspricht **1,4 % Anteil** im **Primärenergiesystem**, würde ca. **830 MW Elektrolyseleistung** entsprechen
- **Ziel für 2030: 1 GW** Elektrolyseleistung
- Fokus klar auf **Industrieanwendungen**, **Mobilität** nur in Ausnahmefällen

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

 **Bundesministerium**
Digitalisierung und
Wirtschaftsstandort

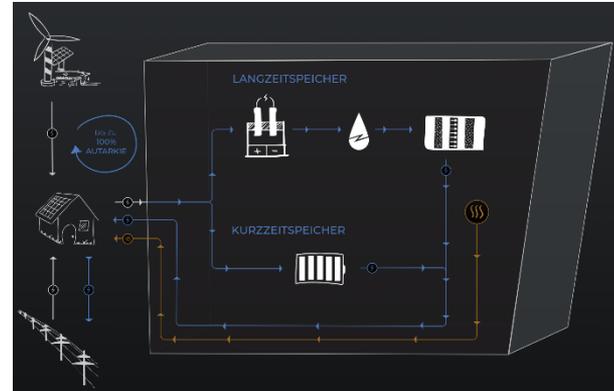


Quelle: BMK

WASSERSTOFF IN ÖSTERREICH

Wasserstofftechnologie Made in Austria

- Zahlreiche **Technologieanbieter** in Österreich
- Beispiele aus der Steiermark:
 - **Andritz**: Elektrolyse Großanlagen
 - **AVL List**: Brennstoffzellenentwicklung, Prüfstände
 - **Elements Energy GmbH**: Hybrid Energiespeichersystem



Quelle: Elements Energy GmbH

WASSERSTOFF IN ÖSTERREICH

Beispiele Ausbildung und Forschung

- **TU Graz** inkl. Spin-Offs: über 250 Forschende im Bereich Wasserstoff, mehrere Lehrveranstaltungen zum Thema
- Davon **HyCentA** (seit 2005): ca. 100 Forschende, Betreuung von zahlreichen Bachelor-, Master- und Doktorarbeiten
- H₂-Forschungszentrum an der **FH Oberösterreich Campus Wels** (seit 2023)
- Ab 2024/25 Bachelorstudium Wasserstofftechnik am **FH Technikum Wien**
- Berufsausbildungsprogramme zu Wasserstoff von **TÜV Austria Akademie**





THANK YOU