

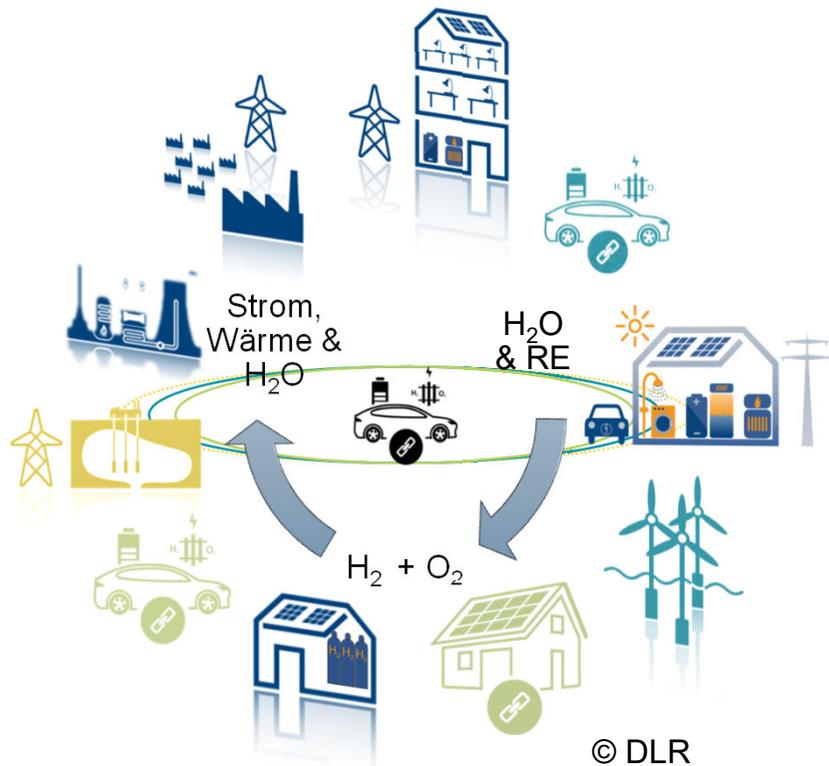
Wasserstoffforschung im DLR

Ein Überblick

von Jürgen Ortner, DLR



Agenda und Fahrplan



- Das DLR im Überblick
- Am Anfang war der Wasserstoff
- Von der Herstellung bis Verbrauch
- Erzeugung von Wasserstoff
- Speicherung
- Transport
- Nutzung - Auf dem Weg zur Anwendung
- Brennstoffzellen-Systeme als Game-Changer



Das DLR im Überblick

Aufgaben des DLR



- Forschungseinrichtung
- Raumfahrt-Agentur
- Projektträger

Standorte und Personal

- Ca 10.300 Personen
- 55 Instituten und Einrichtungen
- 30 Standorten



Finanzierung (Stand 2021)



Forschung finanziert durch

- Institutionelle Förderung (Bund und Länder) 775 Mio€
- Drittmittel: 573 Mio€

Verteilt auf Raumfahrt: 520 Mio€; Luftfahrt: 312 Mio€; Energie: 149 Mio€ und Verkehr: 112 Mio€

Raumfahrt-Agentur verwaltet

- nat. Projektmittel 316 Mio€ und ESA 1.028 Mio€

Projekträger verwaltet

- nat. Projektmittel 2.242 Mio€

Hintergrundwissen zu Wasserstoff

Am Anfang war der Wasserstoff

- **1766:** Entdeckt durch englischen Henry Cavendish:
brennbare Luft hergestellt aus $\text{Zn} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{ZnSO}_4 + \text{H}_2$
- **1898:** erste Verflüssigung von Wasserstoff durch den britischen Chemiker und Physiker James Dewar in London
- **1901:** erste Speicherung in Stahlflaschen durch Ernst Wiss
- **1909:** Ammoniaksynthese nach Haber-Bosch wird Wasserstoff zum Grundstoff der chemischen Industrie:
$$\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{NH}_3$$
- **Fazit:** Erfahrung im Umgang liegen vor

Motivation für Wasserstoff-Technologien

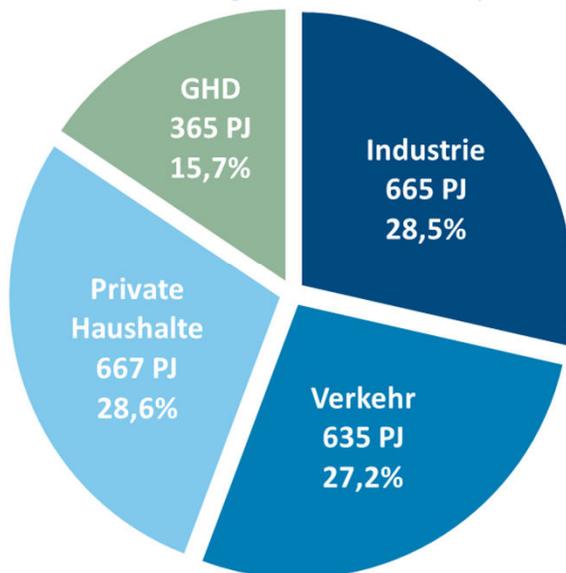


Übergeordnete Ziele

- Erfüllung des Pariser Klimaschutzabkommens
- National: Klimaneutralität bis 2045 in allen(!) Sektoren

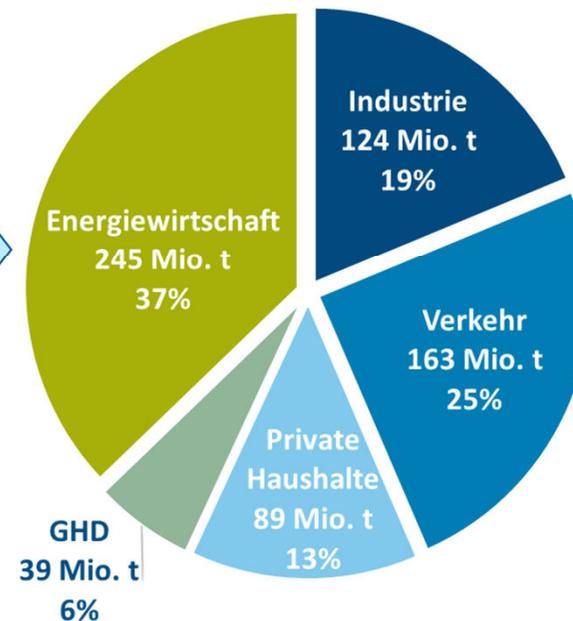


Endenergieverbrauch (2020)¹



Anteil Stromsektor an CO₂-Emissionen: < 40 %.
Was ist mit Verkehr, Haushalte & Industrie?

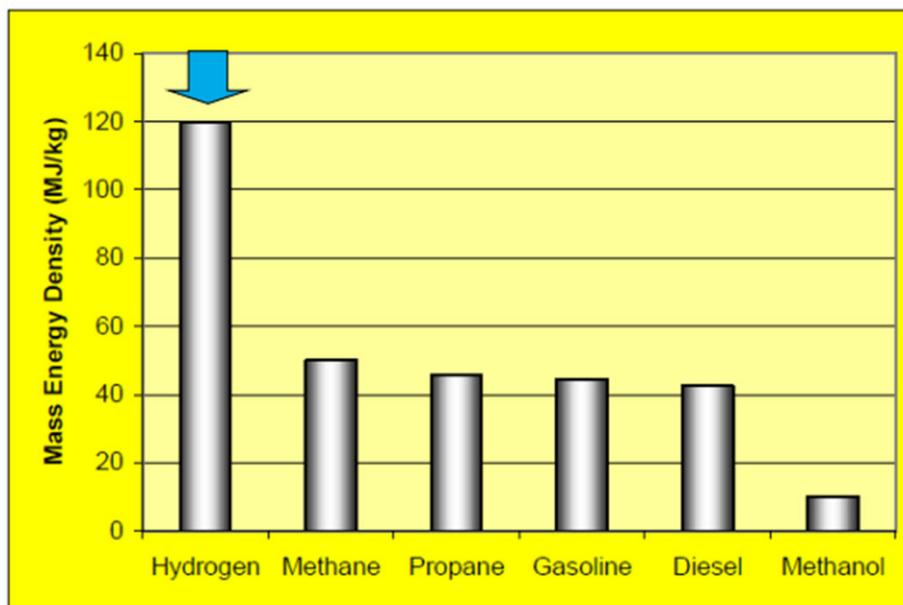
CO_{2,äq}-Emissionen (2019)¹



Was macht Wasserstoff so besonders? Blickwinkel Energieversorgung



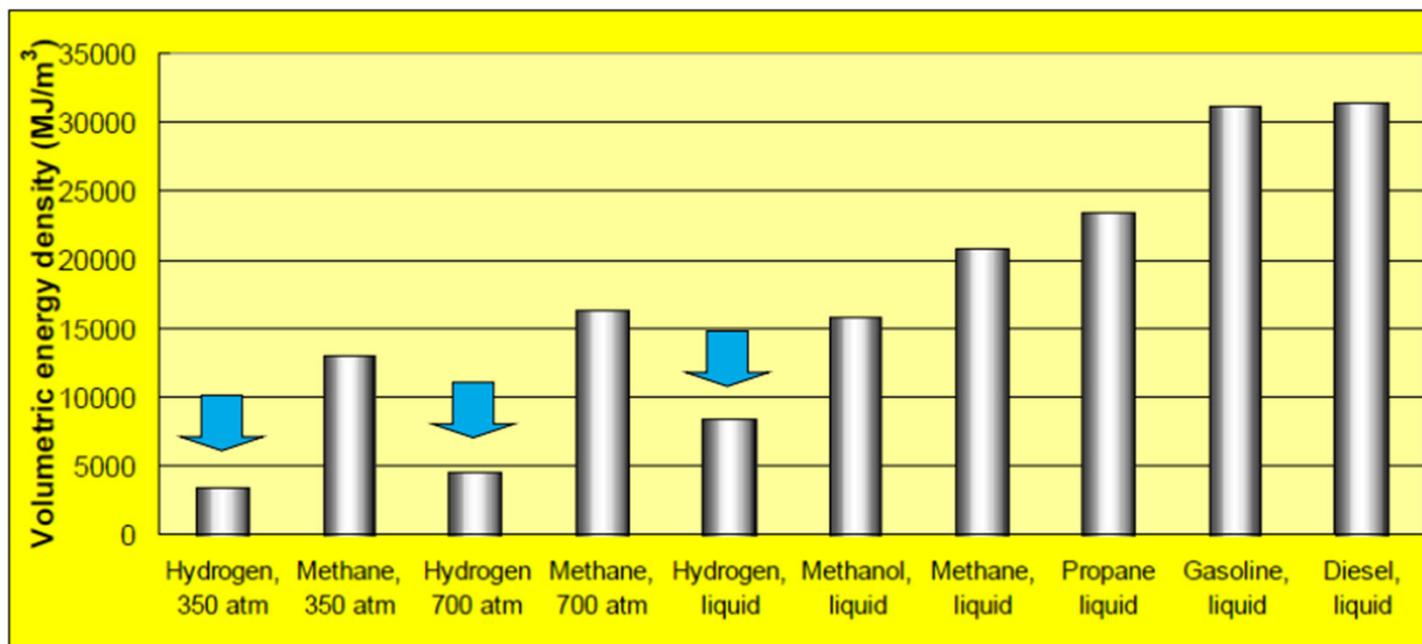
- **Vorteile:** nicht giftig, nicht ätzend, nicht wassergefährdend, nicht krebserregend, umweltneutral
 - höchste gravimetrische Energiedichte (33,3 kWh/kg) aller chemischen Verbindungen (Vergleich: Diesel ca. 12 kWh/kg)



Was macht Wasserstoff so besonders? Blickwinkel Energieversorgung



- **Vor- oder Nachteil:** gasförmig (14,4 mal leichter als Luft), farblos, leicht entflammbar, hohe Diffusionsfähigkeit, zum Teil versprödend von Metallen und Dichtungen, sehr geringe Zündenergie nötig, verbrennt mit kaum sichtbarer Flamme (UV-Bereich), breiter Zündfähiger Bereich von 4 und 73 Vol. % in der Luft
 - ein Drittel der volumetrischen Energiedichte (3 kWh/m³) im Vergleich zu Erdgas



DLR Forschung Von Herstellung bis Verbrauch

Übersicht: Herstellung bis Verbrauch



Herstellung

Strom und Sonne

Transport/Speicherung

Speicherkaverne, Tankschiff
Tank, Tankstelle

Verbrauch

Gebäude, Industrie, Kraftwerk,
Raffinerie, ÖPNV, Lastenrad,
PKW, LKW, Schiff, Flugzeug,
Rakete

A photograph of a complex industrial system for producing oxygen and hydrogen. Two large, perforated cylindrical vessels are the central focus. The left vessel is illuminated with blue light and has a white label with a blue 'O₂' symbol. The right vessel is illuminated with red light and has a white label with a red 'H₂' symbol. A central vertical stainless steel pipe with various fittings and valves connects the two vessels. The background shows more intricate machinery and piping, all set within a dark environment with dramatic lighting.

Herstellung / Erzeugung

Status-Quo der H₂-Erzeugung - Verfahren



- **Reformierung von (fossilen) Kohlenwasserstoffen** (Erdgas, Benzin, Schweröl)



- **Nebenprodukt bei chemischen Prozessen** (Ethylen-Herstellung, Kokerei)



- **Nebenprodukt der Chlor-Alkali-Elektrolyse** (Chlor/NaOH-Herstellung)



- **Weitere Verfahren**

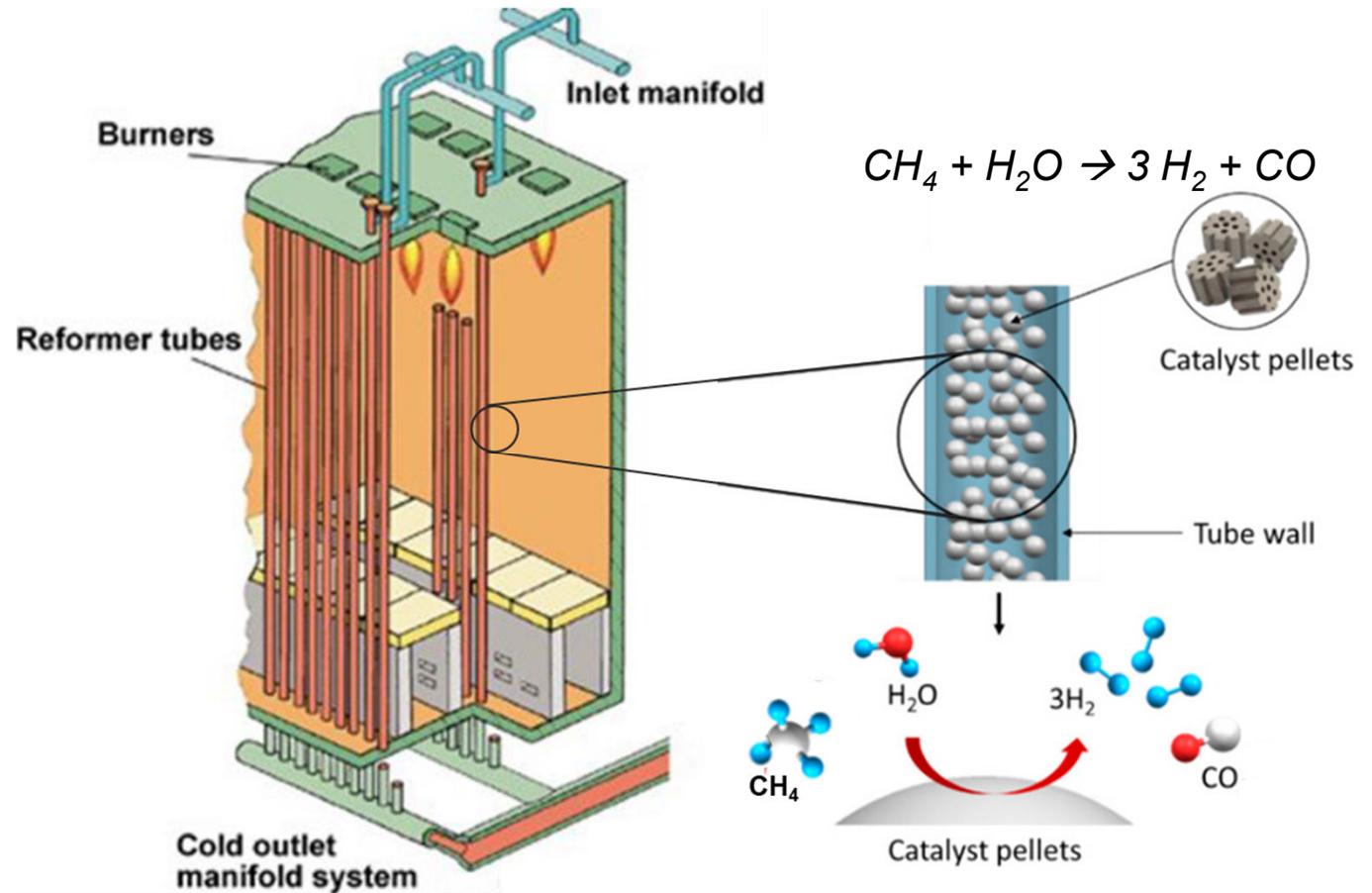
Wasser-Elektrolyse

Biomassevergasung

Thermische Spaltung/Pyrolyse z.B. von Erdgas (Forschung)

Photokatalyse (Grundlagenforschung)

Status-Quo der H₂-Erzeugung: Dampfreformierung (Steam Reforming)



Bilder: Linde, Thyssen Krupp

Erste Arbeiten zu Wärmequelle durch Solarenergie bereitstellen (90er)

DLR Forschung: Solarthermische Verfahren



- Indirekte und direkte Wasserstoffherzeugung

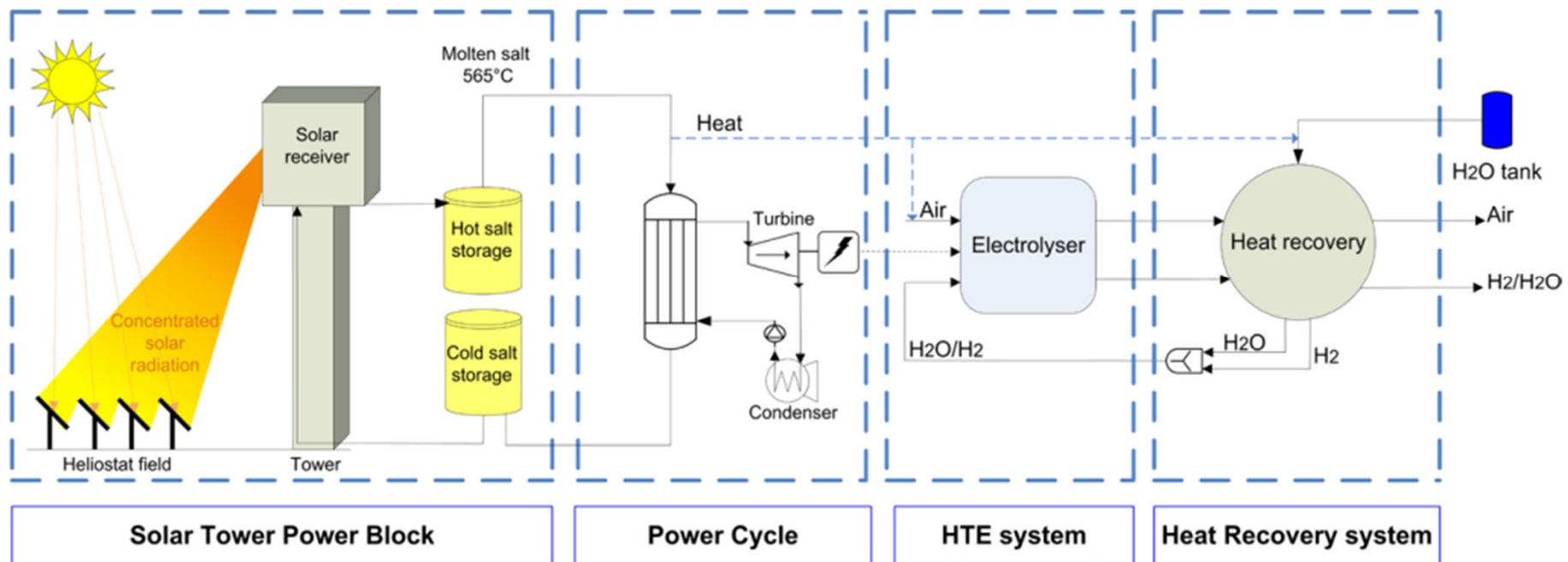
Grundlage thermische Wasserspaltung



Energie: Wärme, Licht, Strom

Problem: Trennung des entstehenden H_2 und O_2 (Knallgas)

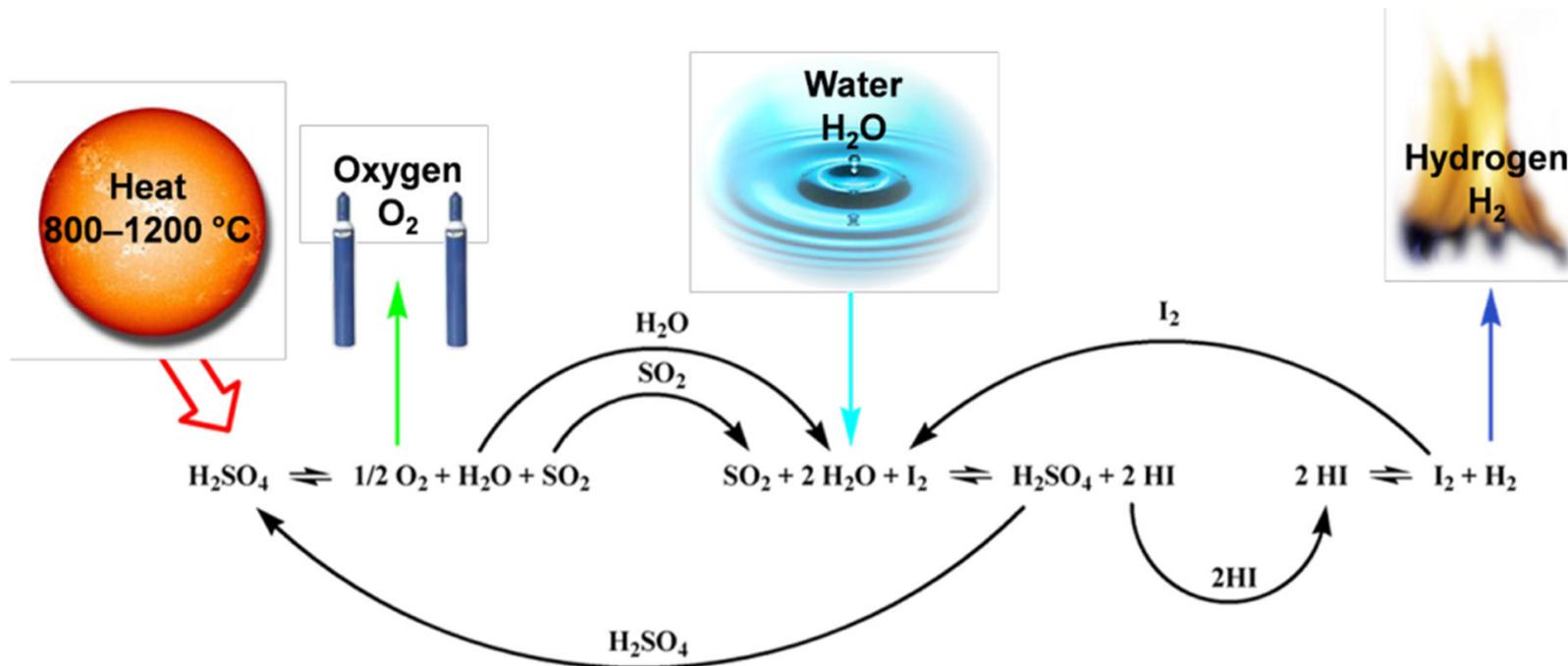
Indirekte Herstellung: Hochtemperaturelektrolyse



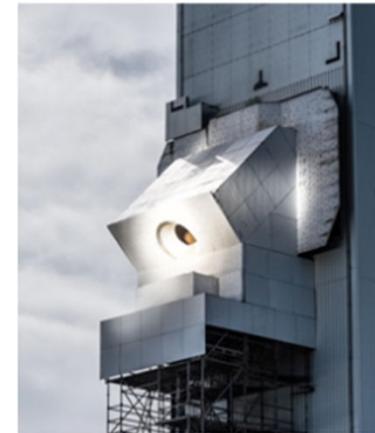
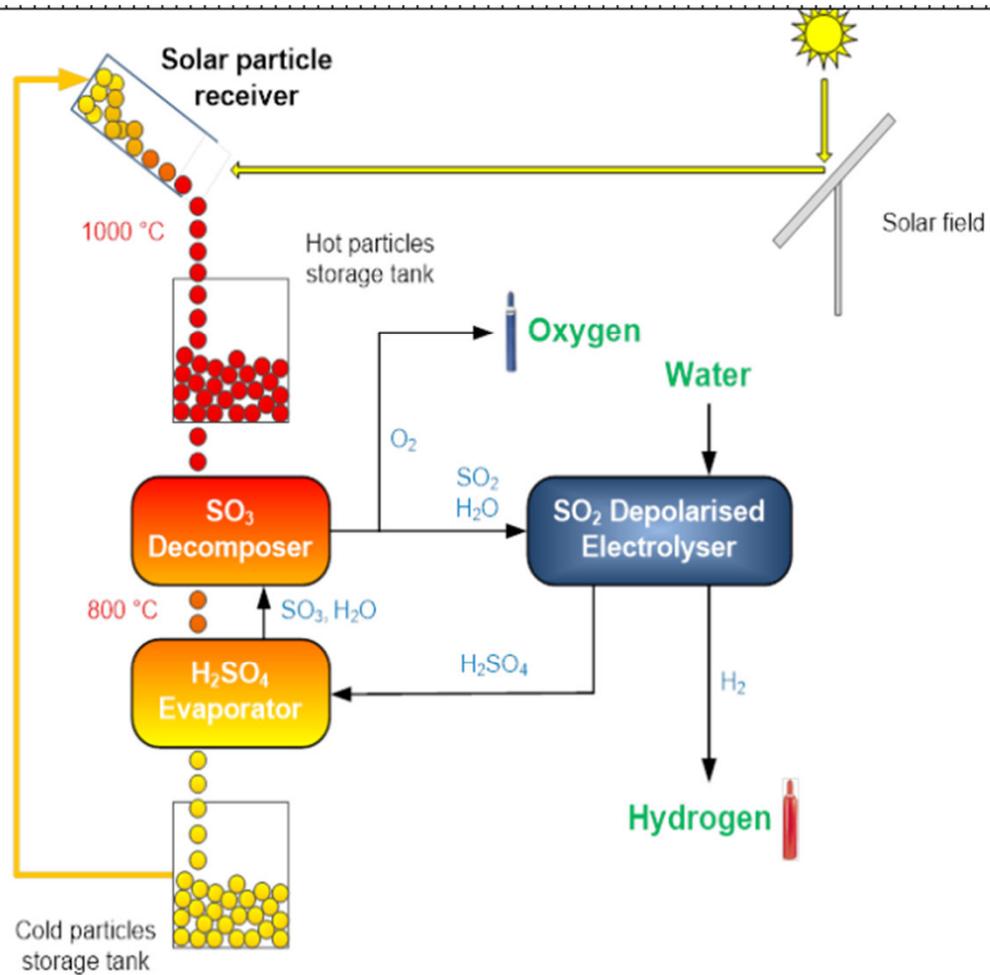
Indirekte Herstellung: Thermochemischer Kreisprozess über Metalloxide



Indirekte Herstellung: Thermochemischer Kreisprozess über Schwefeloxide



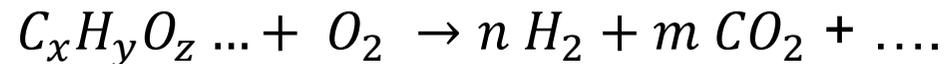
Indirekte Herstellung: Thermochemischer Kreisprozess über Schwefeloxide



Indirekte Herstellung: Thermochemischer Kreisprozess über Schwefeloxide



Indirekte Herstellung: Thermochemische Umsetzung org. Verbindungen

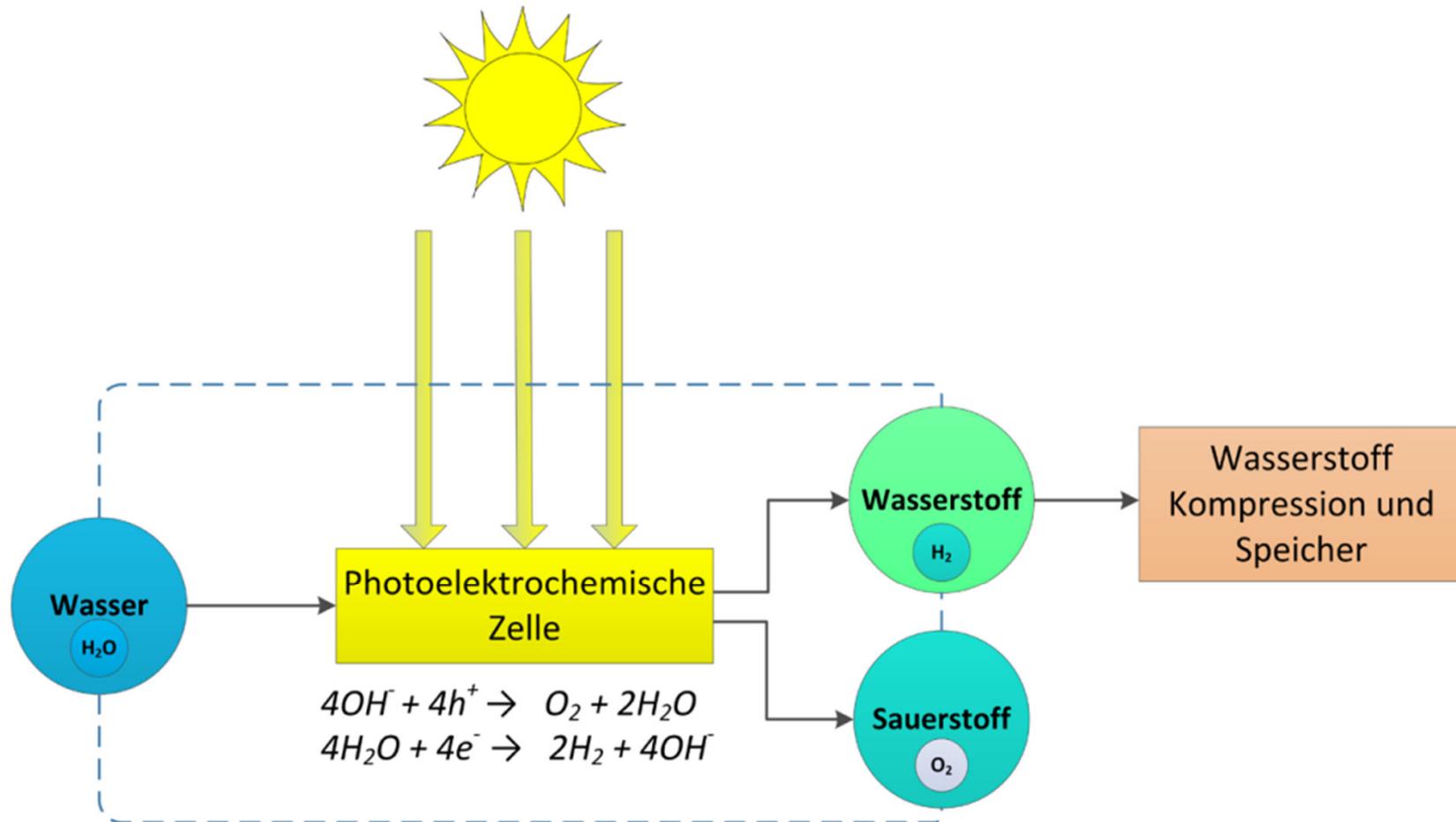


Material aus Kohlenstoff, Wasserstoff und anderen Elementen wird mit einem Sauerstoffträger wie Wasser, Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff etc. bei hohen Temperaturen in Anwesenheit eines Katalysators umgesetzt

DLR arbeitet an Reaktoren, Prozessführung zur Bereitstellung der Energie für hohe Temperaturen mittels Sonnenergie

Problem: CO_2 Ausstoß immer dabei

Indirekte Herstellung: Photo-elektrochemische Wasserspaltung



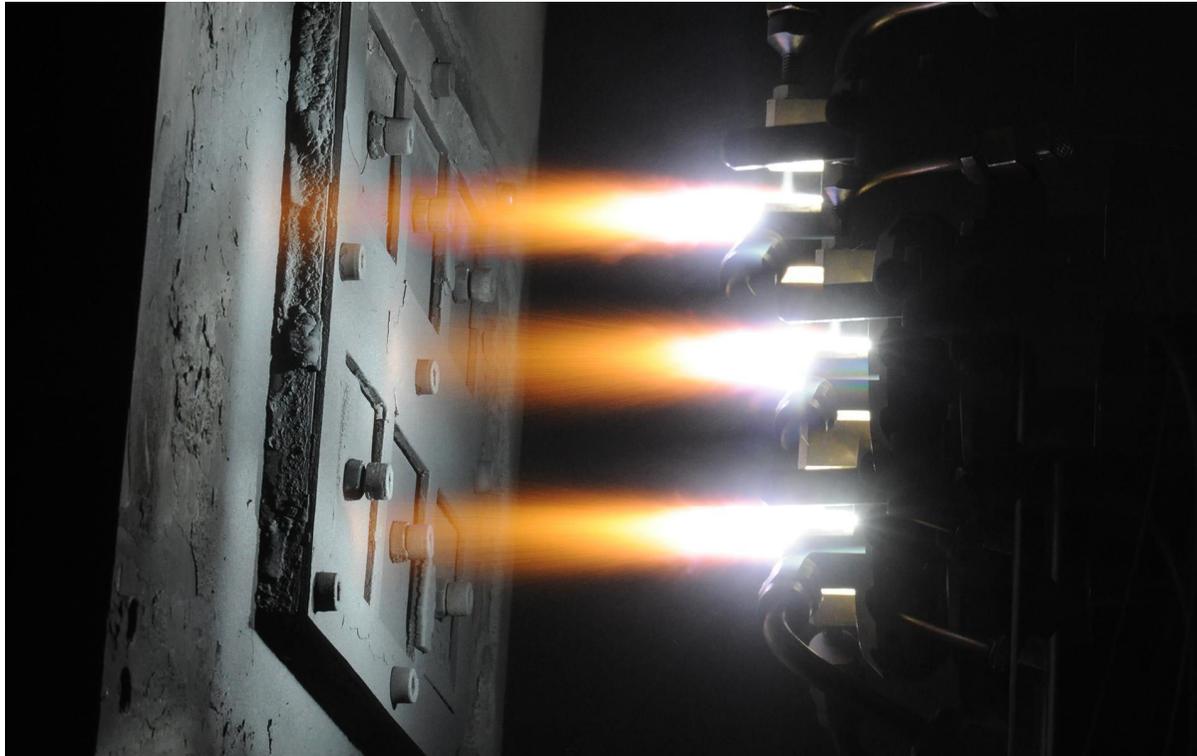
Indirekte Herstellung: Photo-elektrochemische Wasserspaltung



Forschungsziele sind Zellen mit

- hohem Wirkungsgrad
- Großer aktiver Fläche
- Langzeitstabilität

DLR Forschung: Nutzung von Strom durch Elektrolyse



- Plasmaspritzverfahren für die Herstellung von Elektroden mit dem Ziel: Einsparung von Strom durch Reduzierung des Widerstands
- Übertragung von Kenntnissen aus Beschichtungen für Brennstoffzellen und Turbinen

Speicherung

Arten der Speicherung

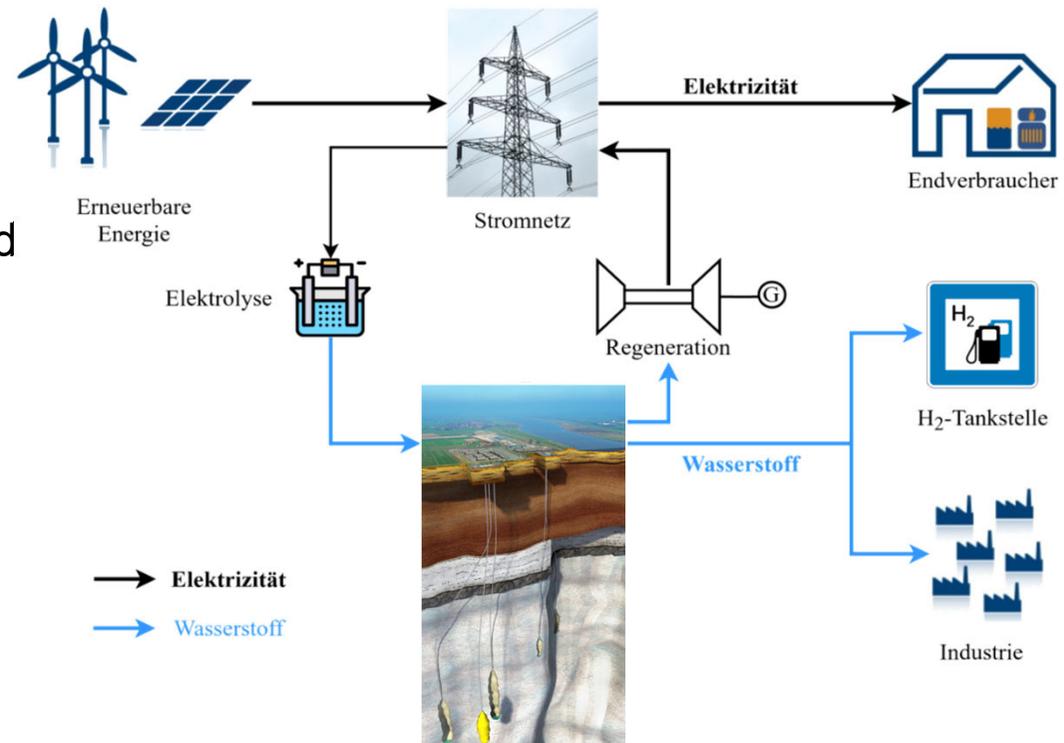


- Druckwasserstoffspeicherung
- Flüssigwasserstoffspeicherung
- Transkritische Speicherung (cryo compressed)
- Metallhydridspeicher
- Adsorptive Speicherung
- Chemisch gebundener Wasserstoff
 - Methanol
 - Kohlenwasserstoffe
 - Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)
 - Ammoniak

H₂-Kavernen als Speicher Infrastruktur



- Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen müssen mittels Gasnetz verkoppelt werden
- Kavernen dienen als Langzeitspeicher und verfügen über sehr große Kapazitäten, Be- und Entladeleistungen der Speicher müssen angepasst werden
- Neue Kavernen lassen sich nicht „schnell“ erschließen
- Was ist im Zusammenhang mit Kavernen zu beachten
 - Einfluss auf die Gasqualität
 - Validierung Materialeignung
 - Anpassung der Obertagetechnik
 - Systemintegration



Druck- und Flüssigspeicherung

- Sicherheit ist das Kernthema!



Druck und Flüssigspeicher



- Materialentwicklungen: leichter, sicherer
- Handhabung in kryogenen Tanksystemen
- Speicher für mobile Anwendungen



Materialforschung: Kohlefaser verstärkte Kunststoffe



Schwabverhalten in Behältern

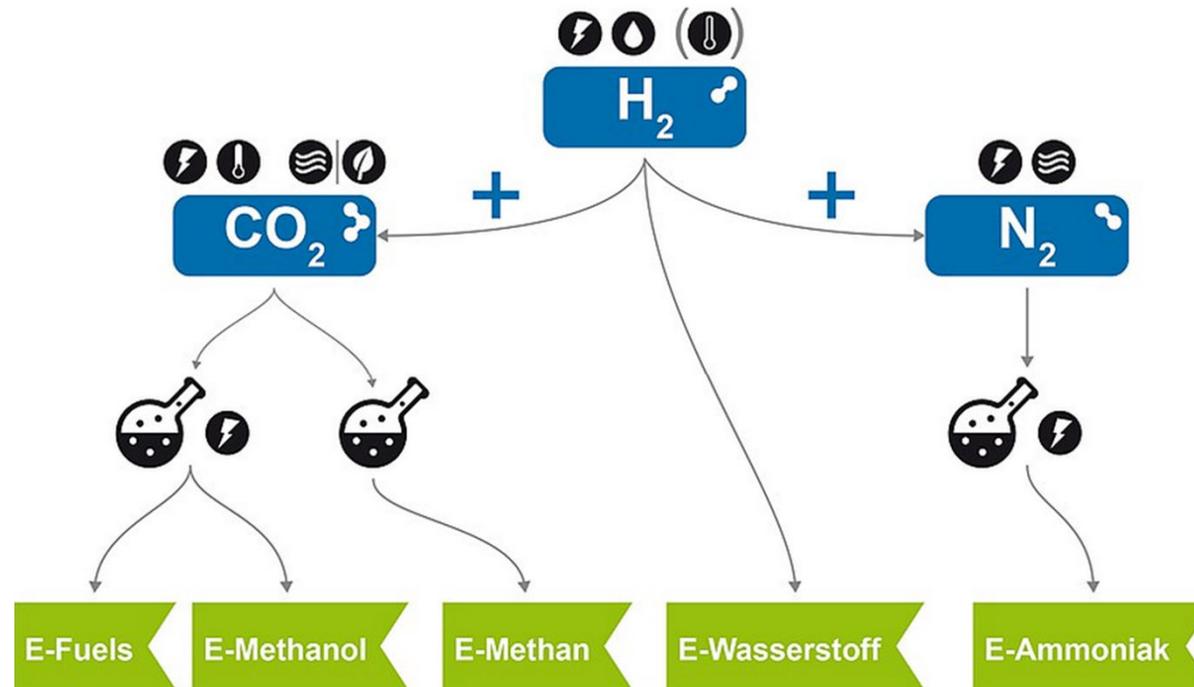


Crashversuche

Kohlenwasserstoffe Power to X



Power-to-X: Überblick Ausgangsstoffe, Prozesse und PtX-Produkte
Wie aus Strom Brennstoffe und chemische Grundstoffe entstehen



Zufuhr von:

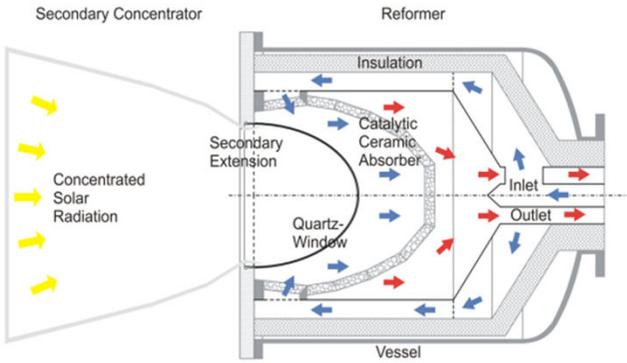
- Strom
- Wasser
- Luft
- Niedertemperaturwärme
- Hochtemperaturwärme
- nachhaltige Biomasse

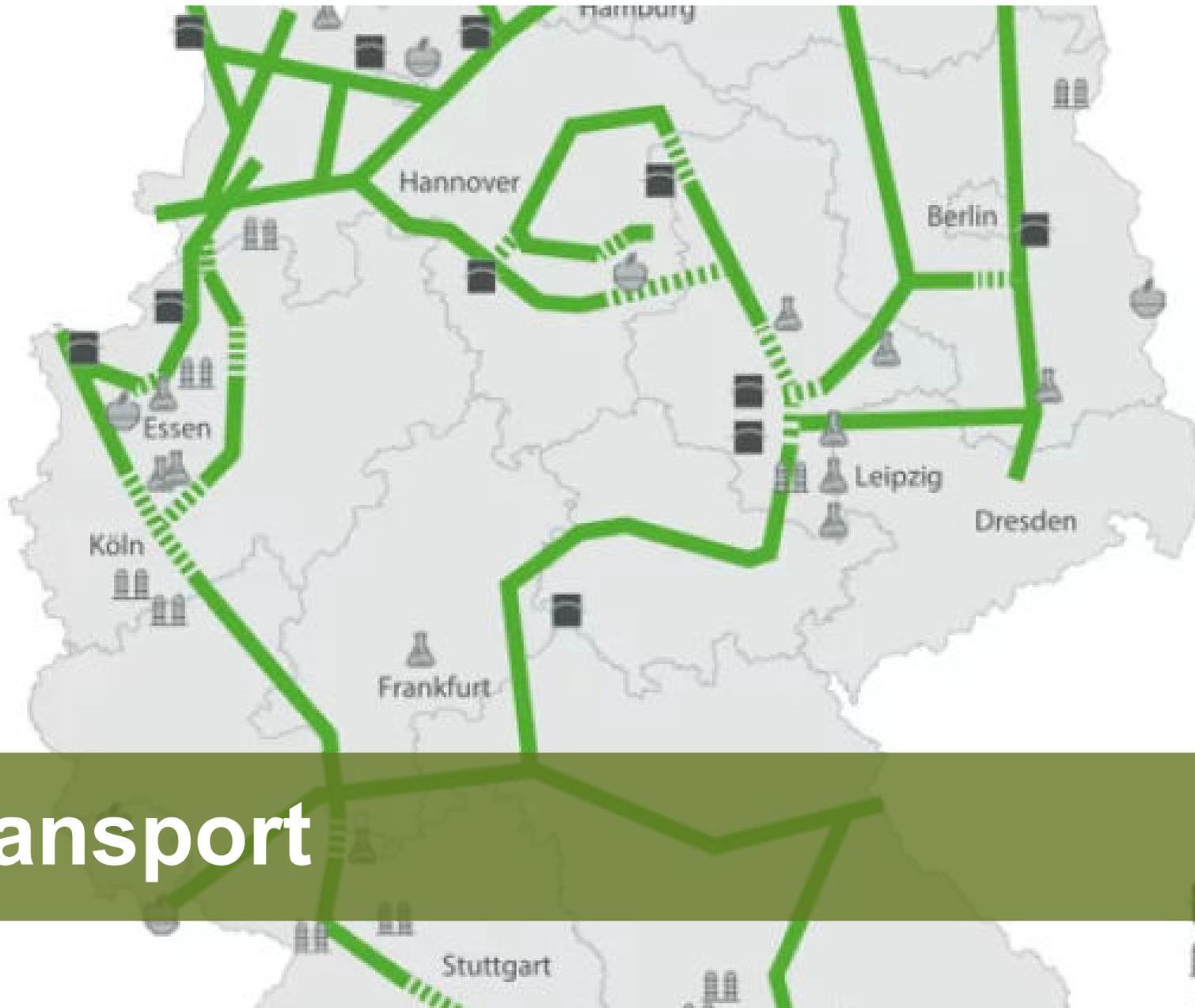
Syntheseprozess



QUELLE: OKO-INSTITUT 2019, CC BY-SA 2.0

Solare Synthese von Wasserstoffverbindungen





Transport

H₂-Distribution zum Verbraucher

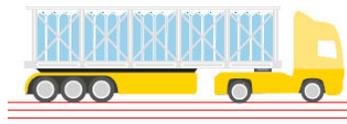
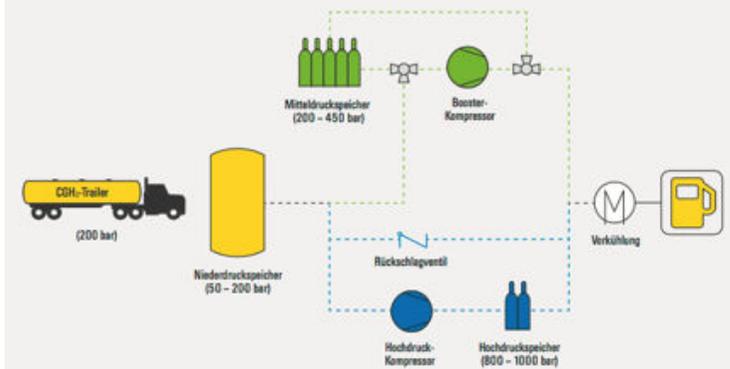


- Mittelfristig 3 Transportoptionen
 - Komprimierter gasförmiger Wasserstoff
 - Verflüssigter Wasserstoff
 - Wasserstoff-Träger
- Dies ist abhängig von
 - Entfernung zwischen Produktions- und Nutzungsstandort
 - Standortspezifischen Bedingungen
 - Wirtschaftlichen Kriterien
- Wie wird das Produkt spezifiziert?
 - Regulatorische Randbedingung
 - Erzeugungsort
 - Transport

Wasserstofftransport - Versorgungsoptionen

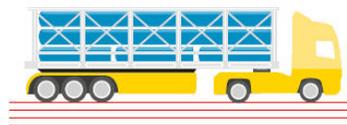


GH2-Transport



CONTAINER TRAILER

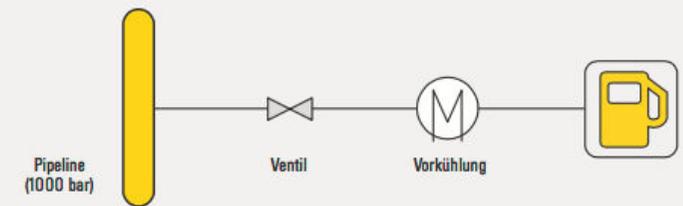
500 bar, ≈ 1.000 kg, Umgebungstemperatur



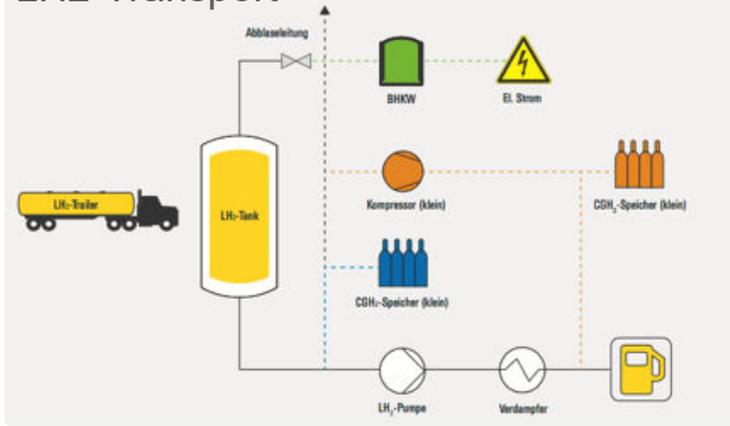
TUBE TRAILER

200 - 250 bar, ≈ 500 kg, Umgebungstemperatur

Pipeline-Transport



LH2-Transport



LIQUID TRAILER

1 - 4 bar, ≈ 4.000 kg, tiefkalt

Quellen: Fraunhofer ISE, Shell Wasserstoff-Studie

Lanseitiger Wasserstofftransport - Vergleich



CGH ₂ -Anlieferung	LH ₂ -Anlieferung	Pipeline
Hohe Investitionskosten	Mittlere Investitionskosten	Sehr hohe Investitionskosten für gemeinsame Pipeline
Geringe Abgabemengen pro Tag möglich	Hohe Abgabemengen pro Tag und viele Betankungen möglich	Sehr hohe Abgabemenge pro Tag möglich
Mittlerer Platzbedarf	Geringer Platzbedarf	Sehr geringer Platzbedarf
Geringe Wasserstoffkosten	Höhere Wasserstoffkosten	Geringe Wasserstoffkosten
Max. 800 kg pro Anlieferung	Max. 3,5 t pro Anlieferung	Kein Limit für Tankstellendurchsatz
Versorgungssicherheit abhängig von Trailern	Versorgungssicherheit abhängig von Trailern	Da meist Speicherung auf Pipelineebene sehr große Versorgungssicherheit
	Abdampfverluste (Boil-off) müssen genutzt werden	Kein Logistikaufwand (vgl. On-site-Erzeugung)
	Energiebilanz in Gesamtsumme schlechter als CGH ₂ oder Pipeline	

Quelle: Fraunhofer ISE

Zukünftige Entwicklungen für die Schifffahrt – Transport und Antrieb

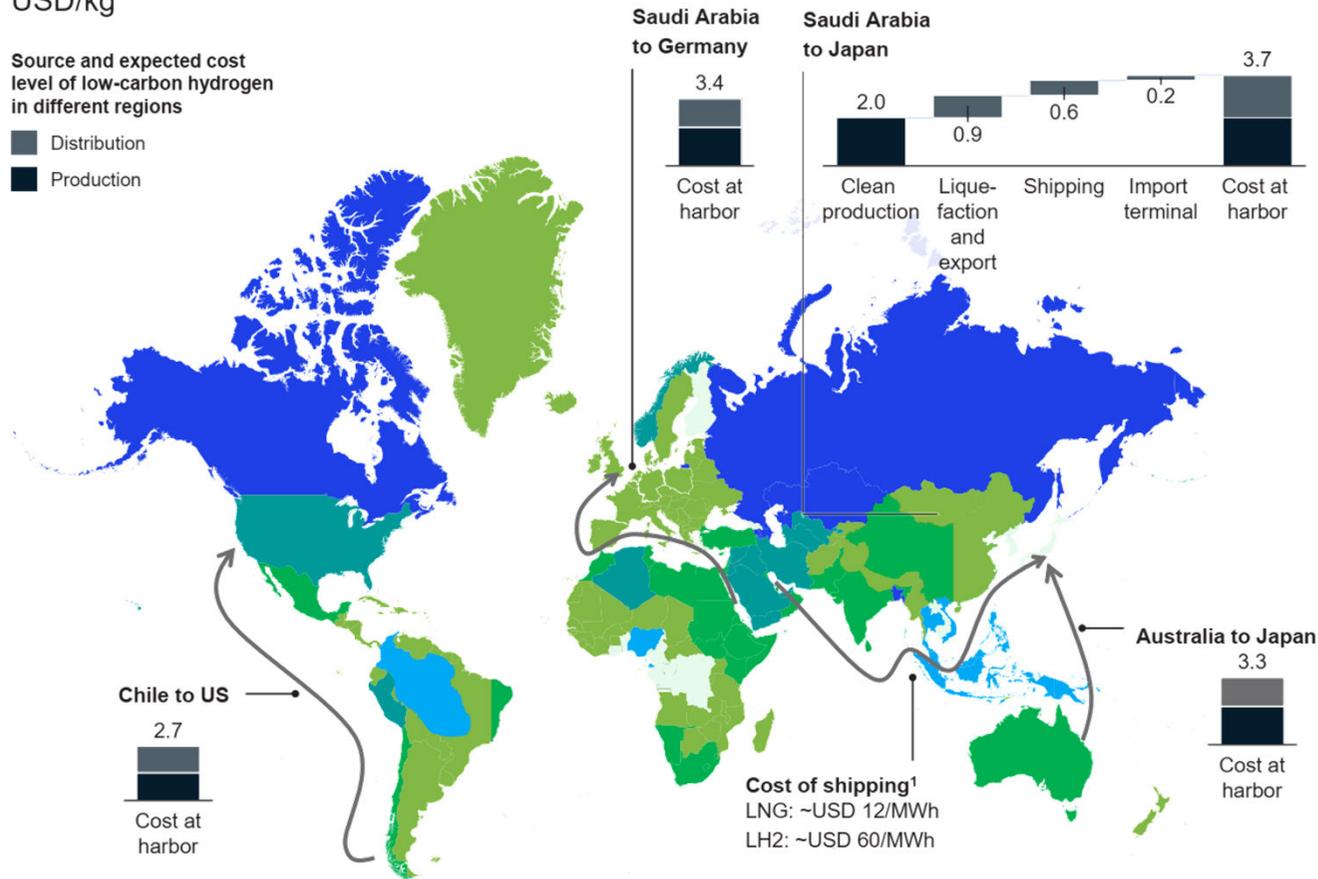


Cost of shipping liquid hydrogen across regions, 2030

USD/kg

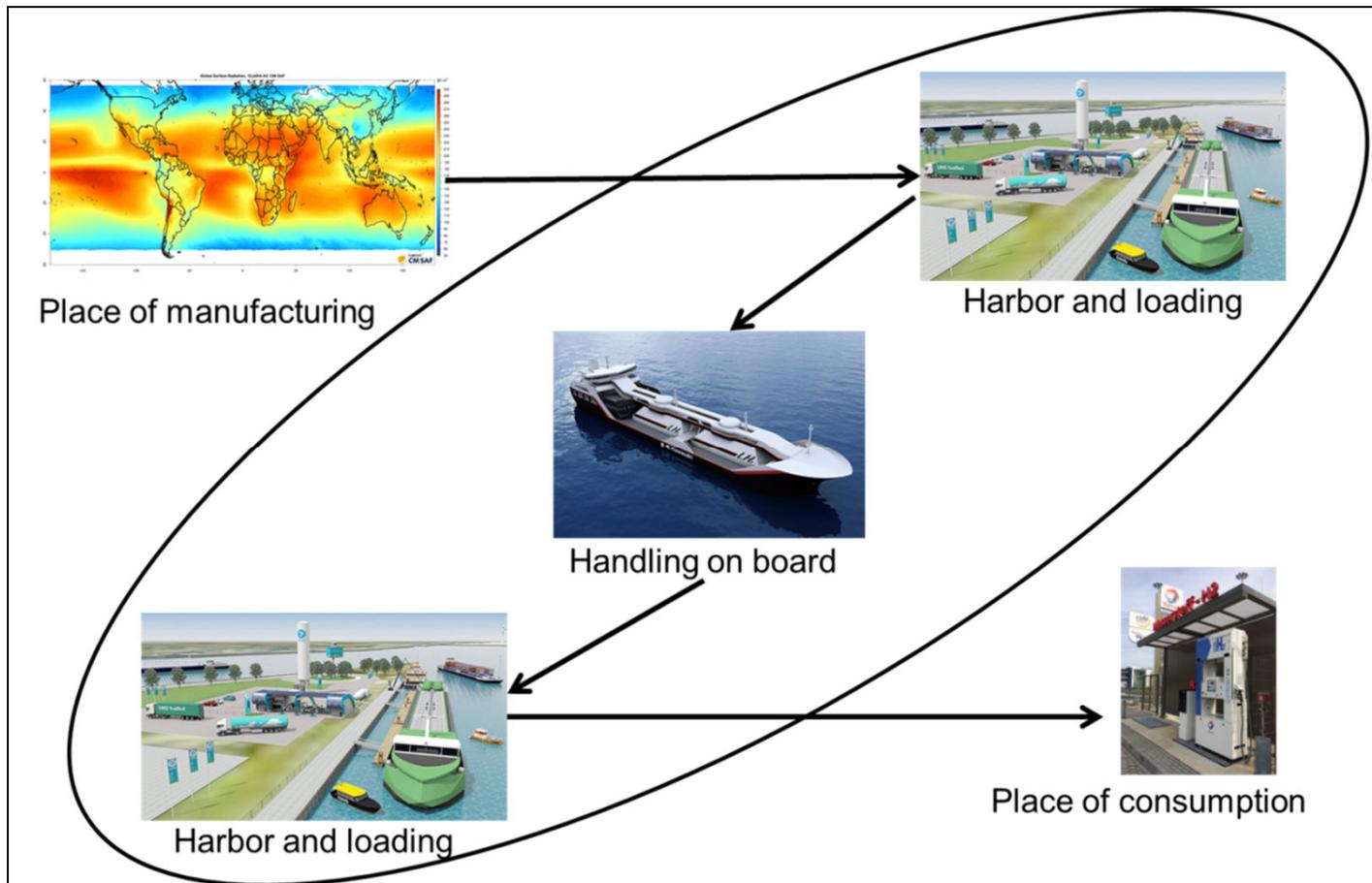
Source and expected cost level of low-carbon hydrogen in different regions

- Distribution
- Production



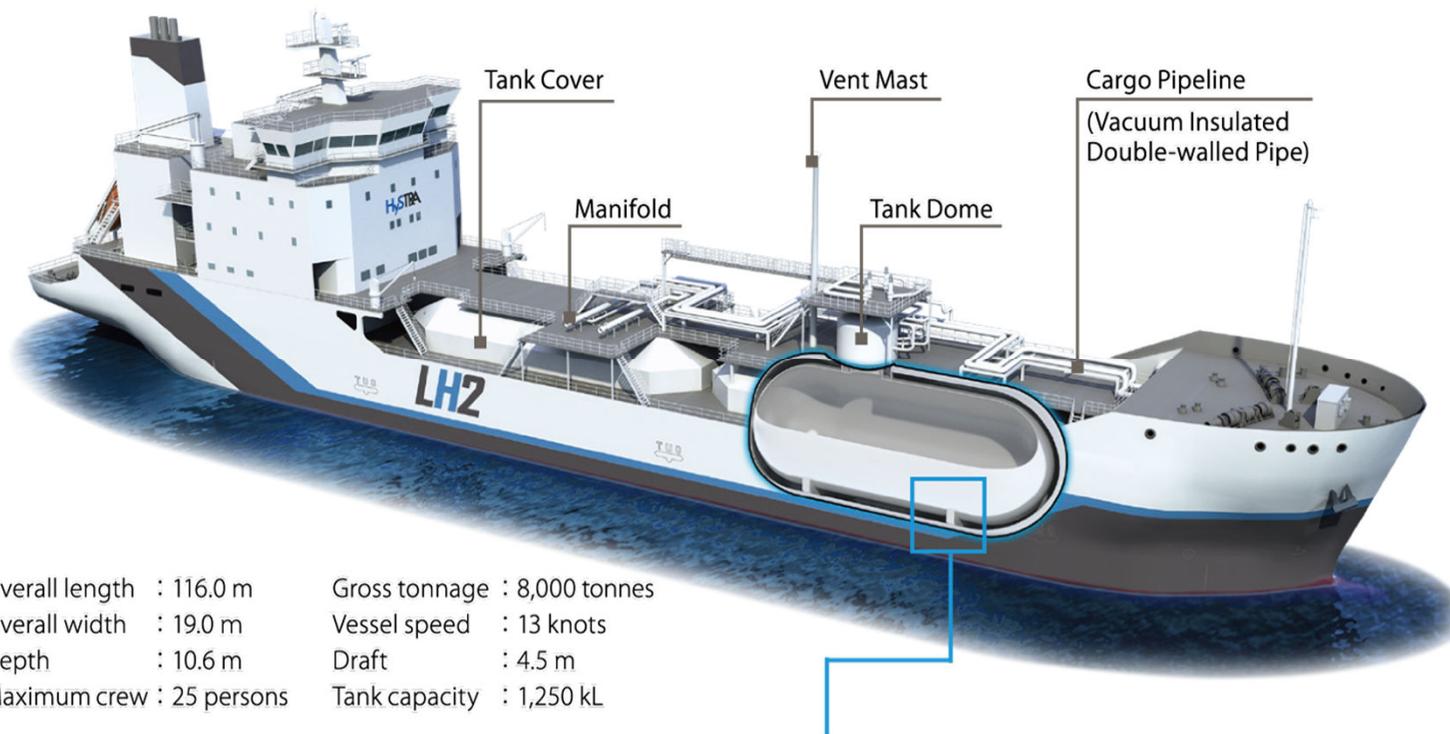
1. Includes liquefaction, terminals, and shipping
SOURCE: McKinsey Energy Insights

Zukünftige Entwicklungen für die Schifffahrt – Transport und Antrieb



Import oder Anlandung Erneuerbarer Energien

- Das erste Schiff mit LH2 Tanks aber weiterhin Diesel-Antrieb



Overall length : 116.0 m	Gross tonnage : 8,000 tonnes
Overall width : 19.0 m	Vessel speed : 13 knots
Depth : 10.6 m	Draft : 4.5 m
Maximum crew : 25 persons	Tank capacity : 1,250 kL

Anlandung von flüssigem Wasserstoff in Kobe (Japan)



Credit: Kawasaki Heavy Industries
<https://safety4sea.com/worlds-first-liquefied-hydrogen-receiving-terminal-completed/>

A large, stylized representation of a hydrogen molecule (H₂) is centered in the image. It features two large, overlapping, translucent blue spheres that resemble water droplets or bubbles, with a white "H" and a white "2" positioned between them. The background is a blurred industrial or airport setting with a jet engine and various structures under a blue sky.

H₂

Nutzung

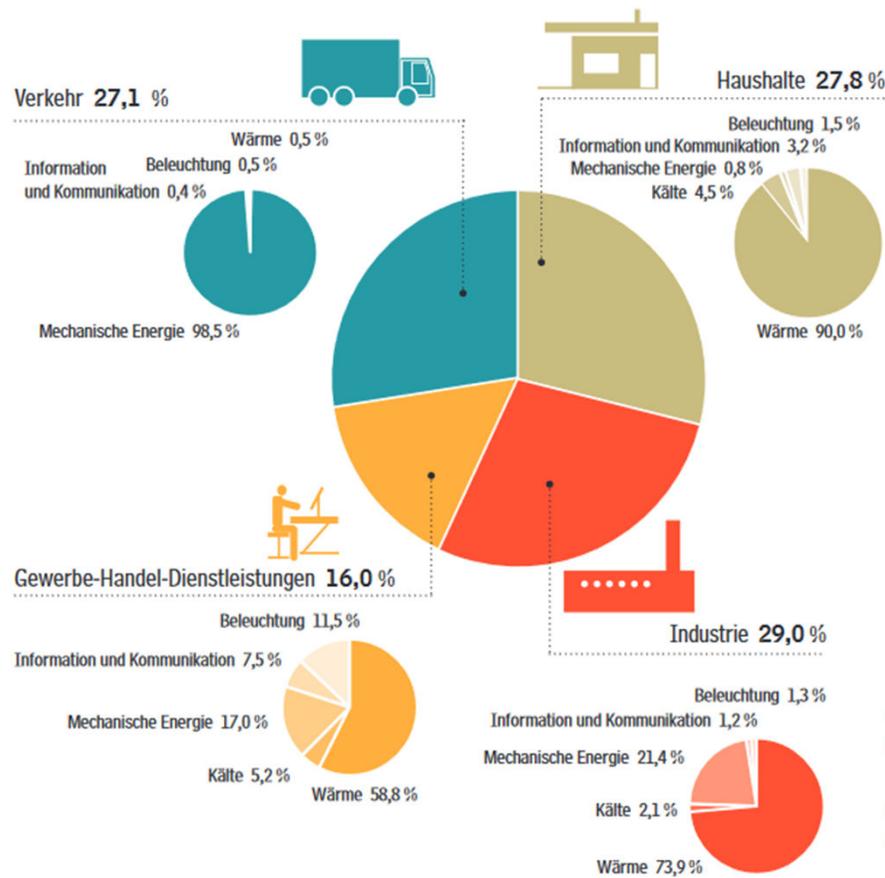
Quelle: futurefuels.blog

Energieverbrauch

Nach Sektoren - Anteile in Prozent 2021 – gesamt 8.667 Petajoule (PJ)



AGEB
AG Energiebilanzen e.V.



Arbeitsgemeinschaft
Energiebilanzen e.V.

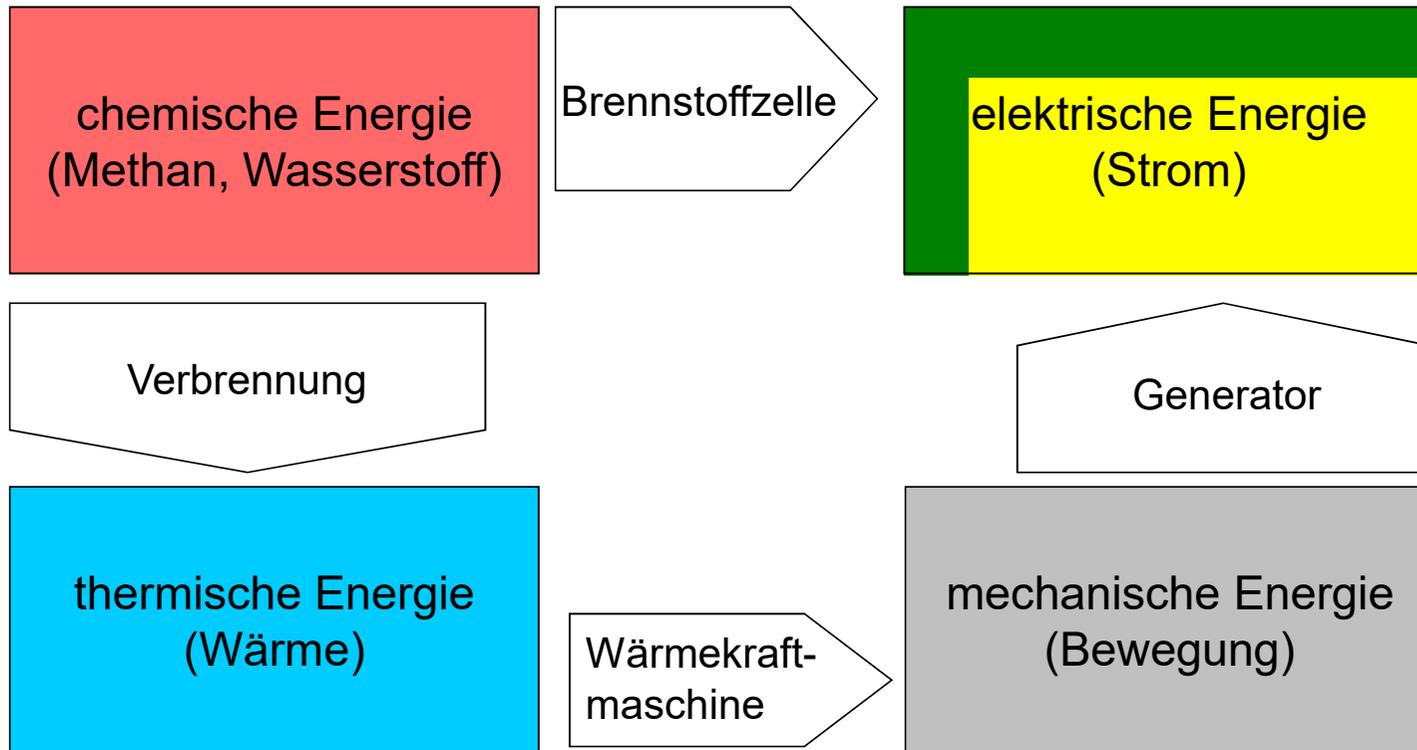
Reinhardtstr. 32
10117 Berlin

DLR-Forschung für Nutzer

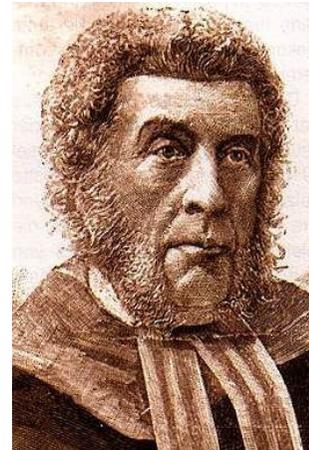
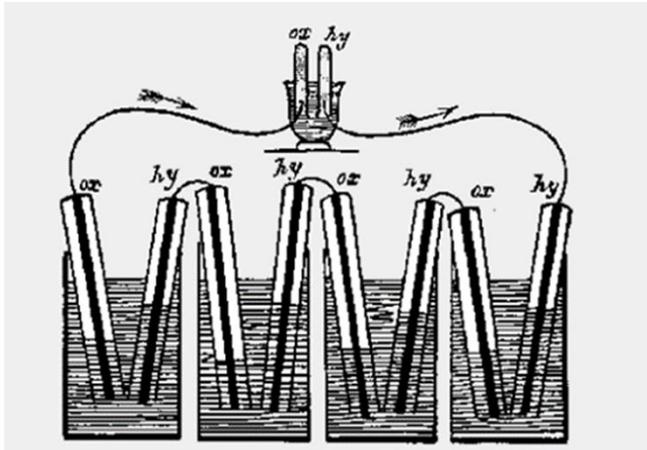
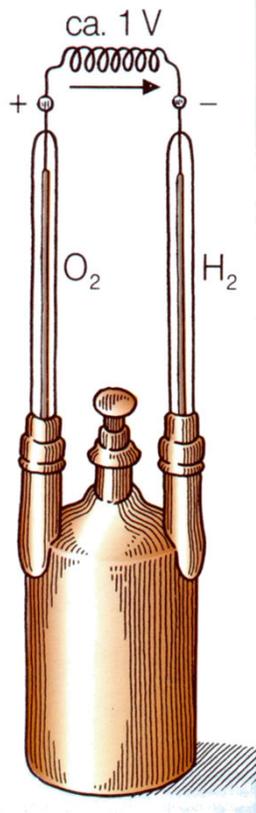


- **Mobilität**
 - Straßenfahrzeuge
 - Schienenfahrzeuge
 - Flugzeuge
 - Raumfahrt
 - Schiffe
- Gebäude
- Industrie, Gewerbe und Handel

Schlüsselbaustein: Brennstoffzelle



Brennstoffzellen – Historische Entwicklung

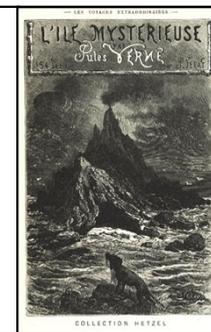


Das Jahr **1839** gilt als Geburtsjahr der Brennstoffzelle. In diesem Jahr stellte Sir William Robert Grove (1811 bis 1896) die Umkehrung der Elektrolyse mit der Gasbatterie der Öffentlichkeit vor.

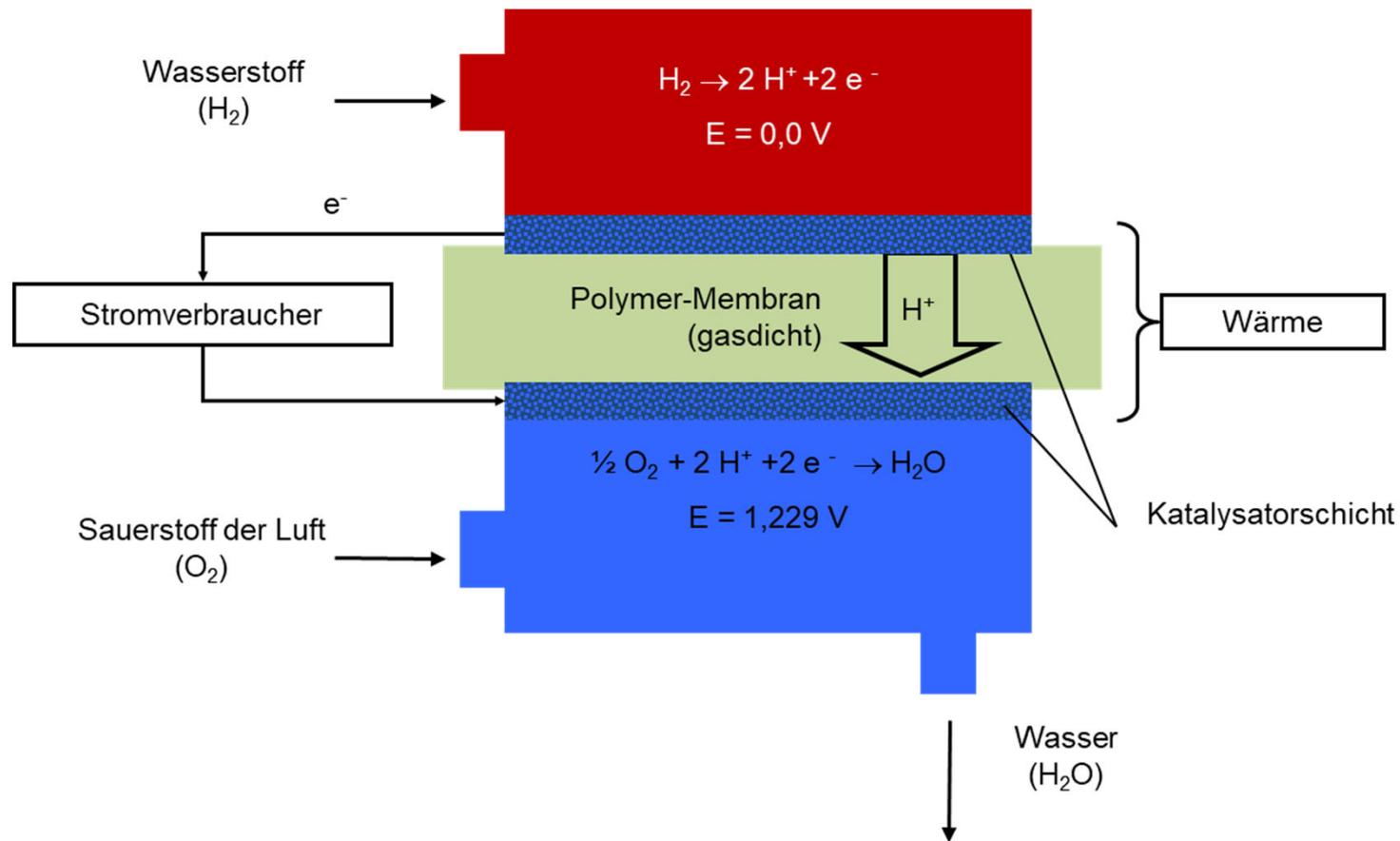
Bildquellen: IZE, Frankfurt;
Stromthemen extra- Brennstoffzellen;
aus: W. Oswald, Elektrochemie, Leipzig 1896



Jules Verne schreibt 1874 in seinem Abenteuerroman: "Die geheimnisvolle Insel" mit prophetischer Weitsicht: "Ich glaube, dass eines Tages Wasserstoff und Sauerstoff, aus denen sich Wasser zusammensetzt, allein oder zusammen verwendet, eine **unerschöpfliche Quelle von Wärme und Licht bilden werden.**"



Brennstoffzellen - Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC)



Vor- und Nachteile der Brennstoffzellen

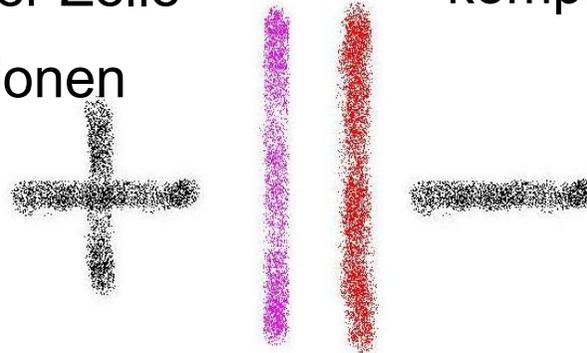


Vorteile

- + hoher Wirkungsgrad
- + im Teillastbetrieb besonders effizient
- + geräuscharmer Betrieb der Zelle
- + geringe Schadstoffemissionen

Nachteile

- noch hohe Materialkosten
- hohes Leistungsgewicht
- komplexe Brennstoffversorgung



Grundidee: Kompetenz-Netzwerk Brennstoffzelle Düsseldorf

DLR Brennstoffzellenforschung



- Hochtemperatur-Brennstoffzellen (Betriebstemperatur $>400^{\circ}\text{C}$)
- Niedertemperatur-Brennstoffzellen (Betriebstemperatur $<200^{\circ}\text{C}$)
 - Verständnis der Leistungslimitierungen
 - Komponentenentwicklung
 - Betriebsstrategien
 - Entwicklung von Diagnosetools
- Ziele
 - Lebensdauer erhöhen
 - Leistungsklasse erhöhen
 - günstiger



Schwerlastverkehr, Mobile Arbeitsmaschinen und ÖPNV mit Wasserstoff und Brennstoffzellen



- Für Nutzlasttransporte ist ebenfalls eine Dekarbonisierung nötig
→ 80% weniger CO₂ bedeutet, dass europaweit 2045 kein „Diesel“ mehr fährt!
- Ob Schiff- oder Schwerlastverkehr, die Treibstoffe müssen zugelassen und über eine internationale Infrastruktur verfügen (Standardisierung)
- LKW mit alternativen Antrieb befinden sich in der Erprobung – Kostenneutral durch Maut
- Sonderfahrzeuge wie Müllsammelfahrzeuge (Markteinführung)
- Wasserstoff-Brennstoffzellen-Züge sind inzwischen ein Produkt!
- Busse der dritten Generation in Etablierung (Kostenreduktion)

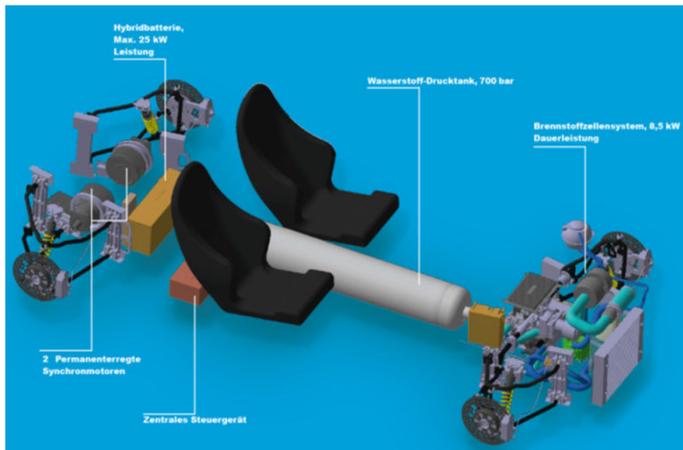


Beispielfahrzeug: Safe Light Regional Vehicle (SLRV)



- sehr leichtes (450 kg) und gleichzeitig besonders sicheres, elektrisches Kleinfahrzeug
- Innovativer **Leichtbau**: 90 kg schwere Karosserie in Sandwichbauweise mit sehr hoher passiver Sicherheit
- hocheffiziente Brennstoffzellen
- **Zweisitzer** eignet sich als Pendlerauto mit bis zu 400 km Reichweite .

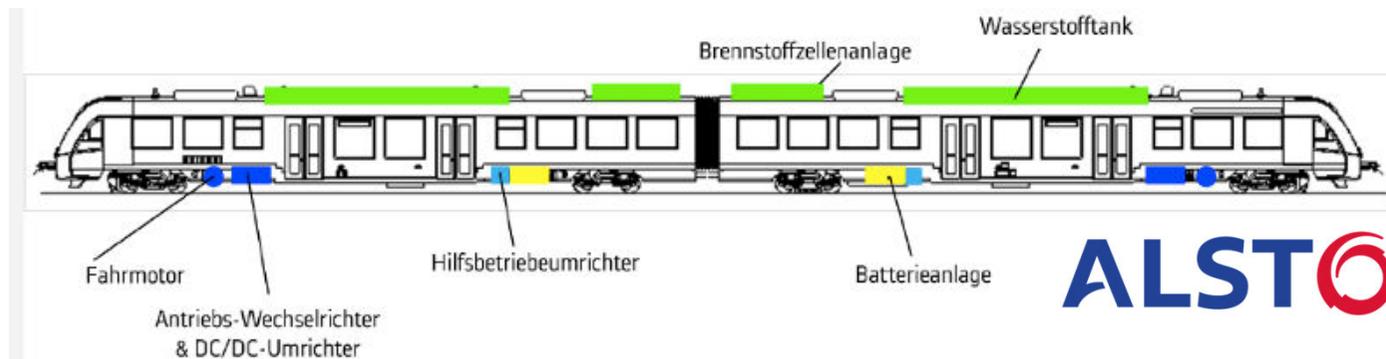
<https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/ngc-slrv>



Schienenverkehr



Strecke Cuxhaven –
Bremerhaven –
Bremervörde –
Buxtehude



Quelle:
<https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/342698/>

Wasserstoffzug



©Alstom/Michael Wittwer

Fluggeräte

- Drohnen und andere UAV
 - Beobachtung und Analyse
 - Lieferung von Waren
 - Militärische Anwendung



<https://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2017/06/14/ballard-s-protonex-subsiary-receives-first-order-for-fuel-cell-system-to-power-commercial-uavs>



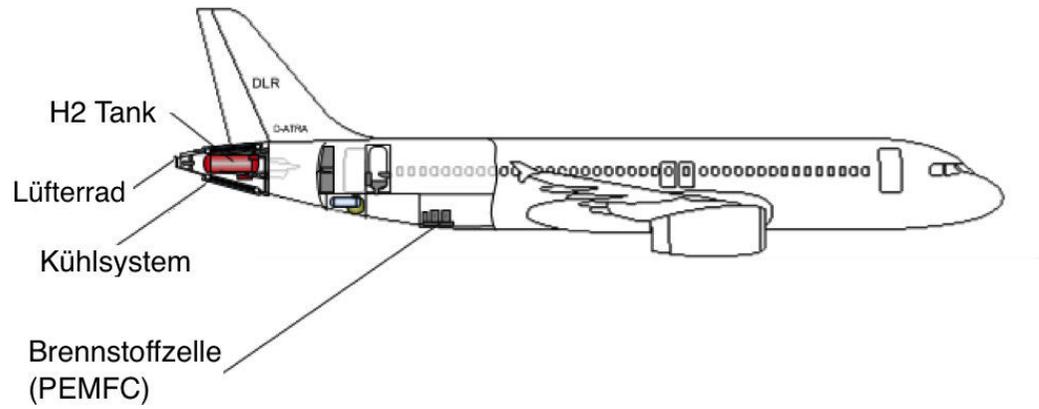
Flexibility of cylinder mounting
allows for multiple payload positions

<https://www.intelligent-energy.com/our-products/uavs/>



<https://dronelife.com/wp-content/uploads/2017/03/Screen-Shot-2017-03-28-at-7.15.14-AM.png>

Luftfahrt



Quelle: www.sonnenseite.com/de/wissenschaft/brennstoffzellen-fuer-e-flugzeuge-sind-moeglich/



Quelle: en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen-powered_aircraft

Quelle: www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151_read-19469/#/gallery/24504



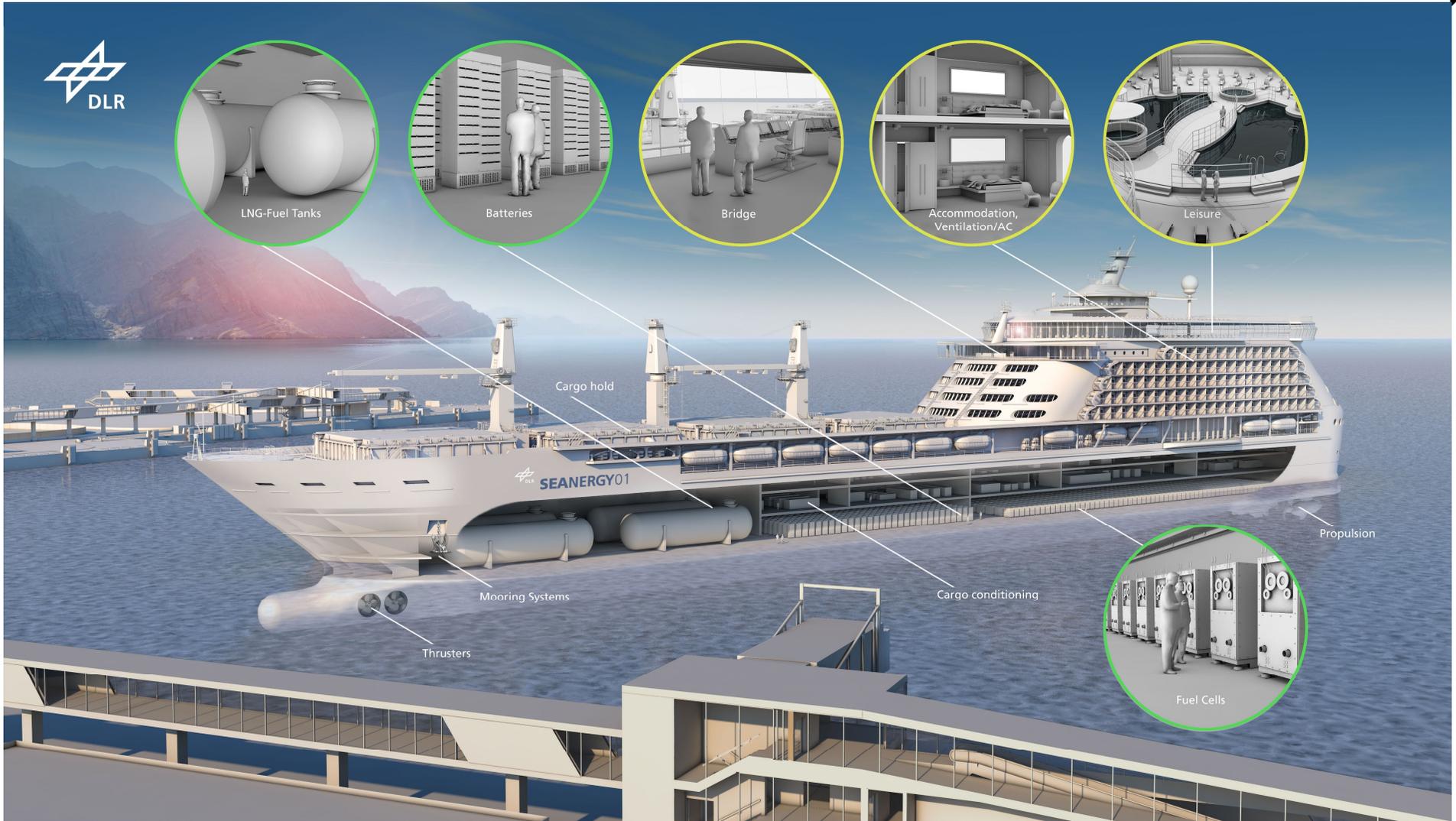
Triebwerk für elektrisches Fliegen



Raumfahrt Triebwerke für Raketen



Schiffe

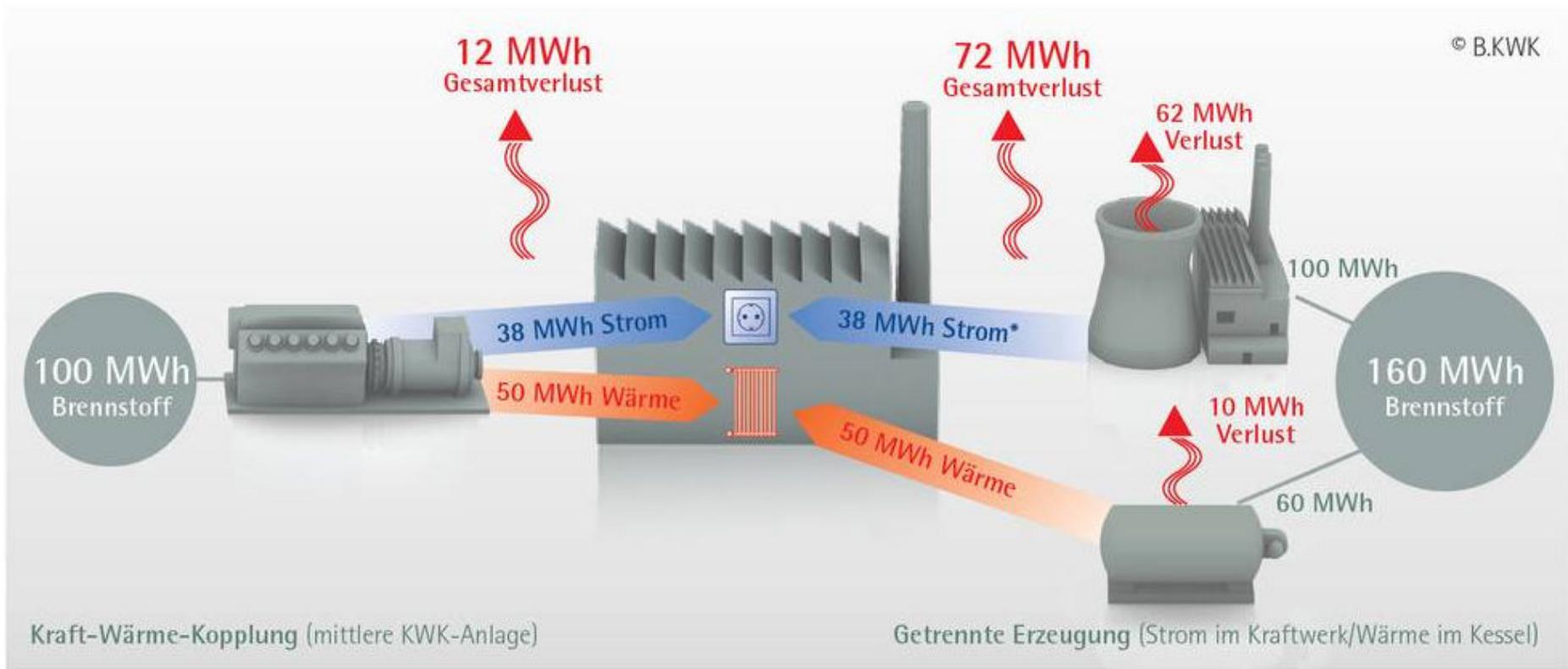


Forschungsschiff



Gebäude Kraft-Wärme-Kopplung

Vorteil der gekoppelten Erzeugung

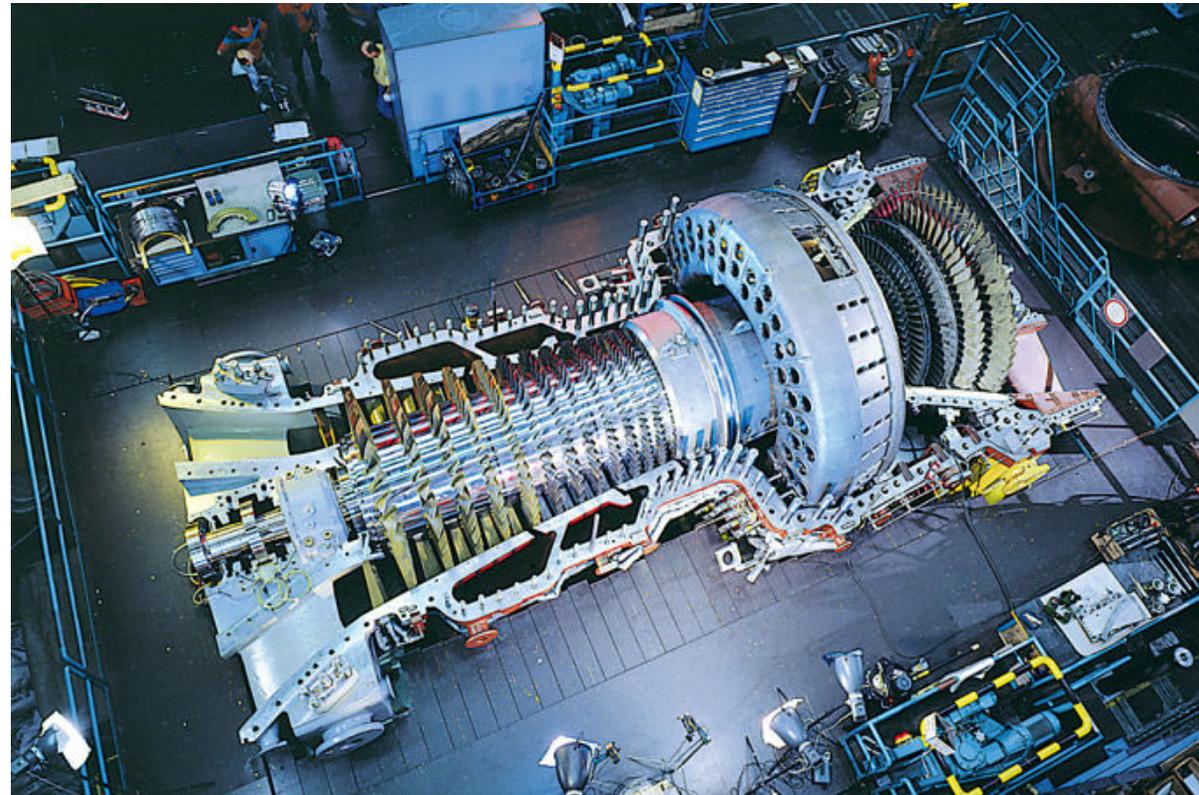


Forschungsanlage KWK im Gebäude



Industrie Kraftwerke für Stromgewinnung

Umstellung der Gasturbinen auf
Wasserstoff als Ausgangsbrennstoff

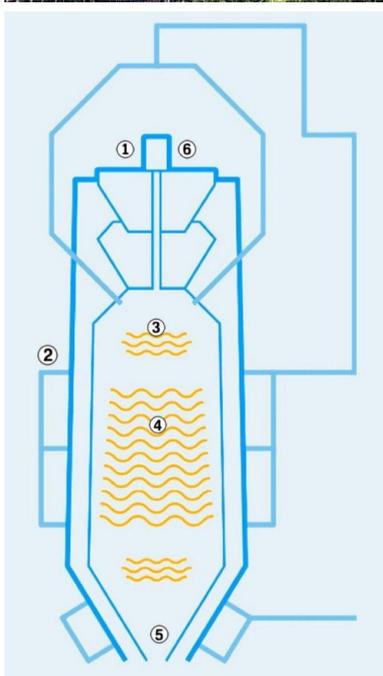
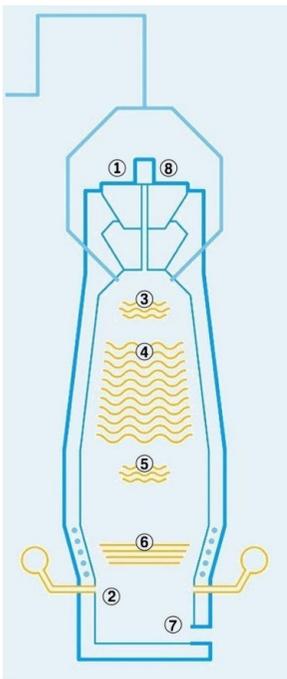


Industrie

Stahlerzeugung mit Wasserstoff



Klassische Hochofenroute zur Primärstahlherstellung mit Kohle und Koks

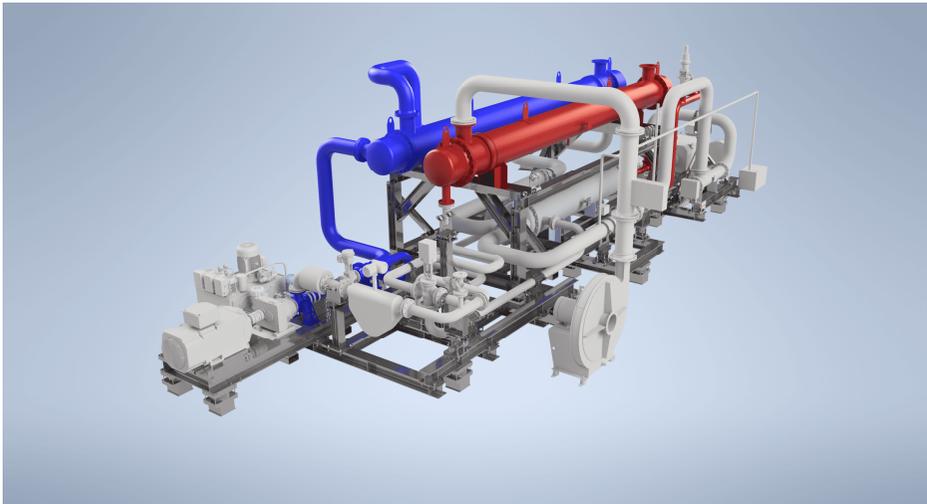


Die Direktreduktion zur Primärstahlherstellung mit H₂

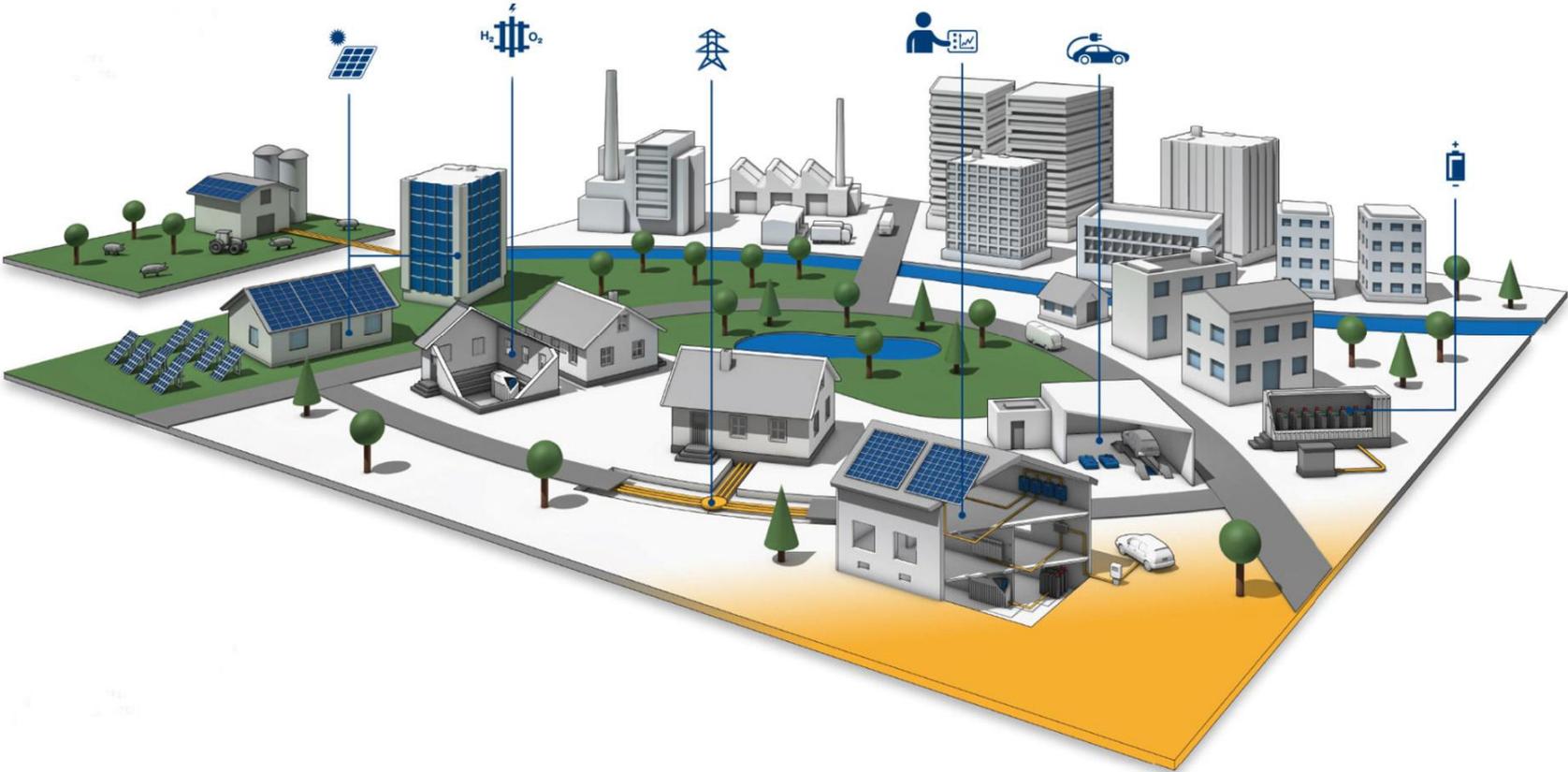
1. **Beschickung:** Eisenerze (Pellets, Stückerz) werden in die Direktreduktionsanlage gegeben.
2. **Gaseintritt:** In diesem Bereich wird das Reduktionsgas mit einer Temperatur über 1.050 Grad Celsius in den Reaktor geleitet. Aufgrund des katalytischen Effekts des metallischen Eisens kommt es zur in-situ-Bildung von Kohlenmonoxid und Wasserstoff.
3. **Vorwärmzone:** Das Eisenerz wird durch das aufsteigende heiße Reduktionsgas getrocknet und vorgewärmt.
4. **Reduktionszone:** Das im aufströmenden Reduktionsgas enthaltene Kohlenmonoxid und der Wasserstoff reduzieren das Eisenerz. Es entsteht Eisenschwamm.
5. **Produktaustrag:** Das reduzierte Eisen wird am Austrag mit einem Metallisierungsgrad von bis zu 94 Prozent ausgetragen und kann weiteren Prozessen zur Verfügung gestellt werden.
6. **Gasaustritt:** Das Prozessgas verlässt die Direktreduktionsanlage am oberen Ende.

<https://www.energiesystem-forschung.de/forschen/projekte/reallabor-der-energiewende-h2-stahl>

Industrie Prozesswärme und -kälte



Sektorkopplung



Wasserstoff treibt uns an!

H₂ als Schlüssel zur Flexibilisierung

