

Wasserstoff: Sicherheit

... in Luft	H ₂	CH ₄	Benzin
unterer Heizwert [kJ/g]	120	50	44,5
Selbstentzündungstemp. [°C]	585 ¹	540	228 ... 501
min. Zündenergie [mJ]	0,02	0,29	0,24
Flammentemperatur [°C]	2045	1875	2200
Zündgrenzen ² [vol-%]	4 ... 75	5,3 ... 15	1,0 ... 7,6
Detonationsgrenzen [vol-%]	18 ³ ... 59	6,3 ... 13,5	1,1 ... 3,3
theoret. Explosionsäquivalent [kg TNT pro m ³ gas]	2,02	7,03	44,22
Toxizität	-	-	gering

verwirrenderweise bekannt als:
„UEG“, untere Explosionsgrenze“

¹ nicht erreicht bei glimmender Zigarette

² ähnliche untere Grenzen

³ andere Quellen: 13 ... 65 vol-%; beides
in der Praxis selten erreicht

Wasserstoff: Sicherheit

ist Wasserstoff extrem gefährlich?

a) subjektiver Aspekt:

- **Assoziationen**
- Akzeptanz H₂-Busse, -Pkw, -Infrastruktur
- öffentliche Meinung

„grün, umweltfreundlich, natürlich“
„Chemieunterricht Schule“
„Gefahr / Hindenburg / Explosionen“
„Wasserstoffbombe / Bikini-Atoll“
„blond“ (\Leftrightarrow H₂O₂)

b) objektiver Aspekt:

- **Hindenburg, Zeppelin-Katastrophe 1937:** hartnäckig falsche Legenden
 - ⇒ keine Explosion, sondern langsames Abbrennen (ohne direkte Verletzung von Personen)
 - ⇒ statische Aufladung und Zündfunken aufgrund ungünstigem Außenanstrich und aufkommendem Gewitter
 - ⇒ Tote und Verletzte durch Absturz und brennende Treibstoffflache unterhalb des Luftschiffs
- **bei Leckagen entweichendes H₂ verflüchtigt sich rasch nach oben**
 - ⇒ hierin inhärent sicherer als Benzin, Propan, Erdgas ...
- H₂ brennend: „kalte“, weitgehend unsichtbare Flamme
(fast keine Emission von Wärmestrahlung)



Hindenburg-Katastrophe 1937 (Beispiel Wasserstoff-Deflagration)

BLEVE

Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
sequence

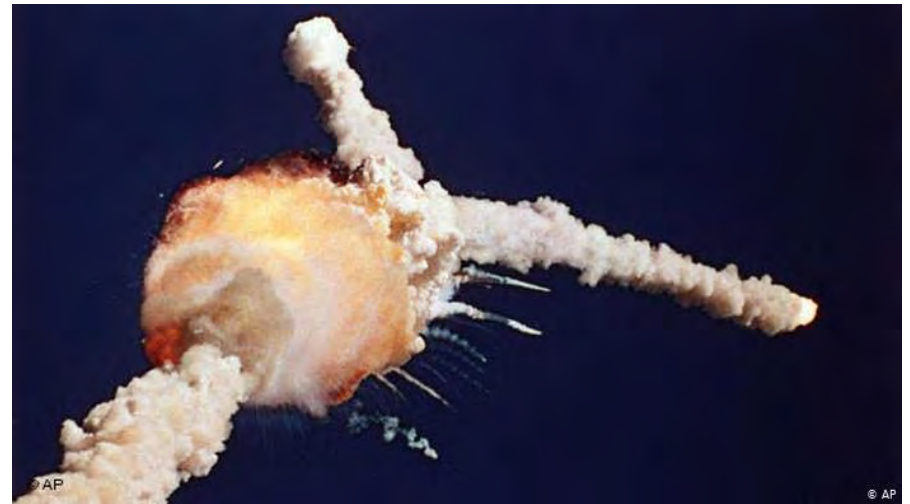
unter Druck stehender LH2-Tank

Aufreißen + Entzündung

Expansion

a) wg. schlagartiger Verdampfung (entlang der
Dampfdruckkurve)

b) Expansion wg. chem. Reaktion und Erhitzung
→ Ausbreitung „Feuerball“ mit
Schallgeschwindigkeit



Space Shuttle Challenger

Katastrophe 28. Januar 1986

15 km über Cape Canaveral

7 tote Crewmitglieder

(Kälteversprödung Dichtungsring
seitliche Boosterrakete, austretendes
Heißgas, LH2 und LOX-Tank
aufgerissen)



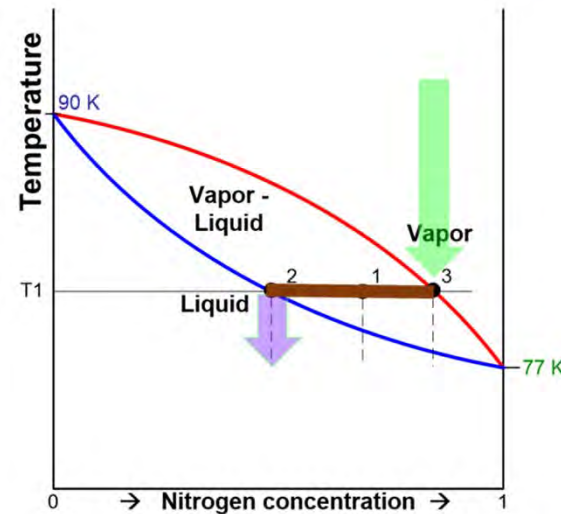
Wasserstoff: Sicherheit

Kondensation

Ursache: unzureichende therm. Isolation

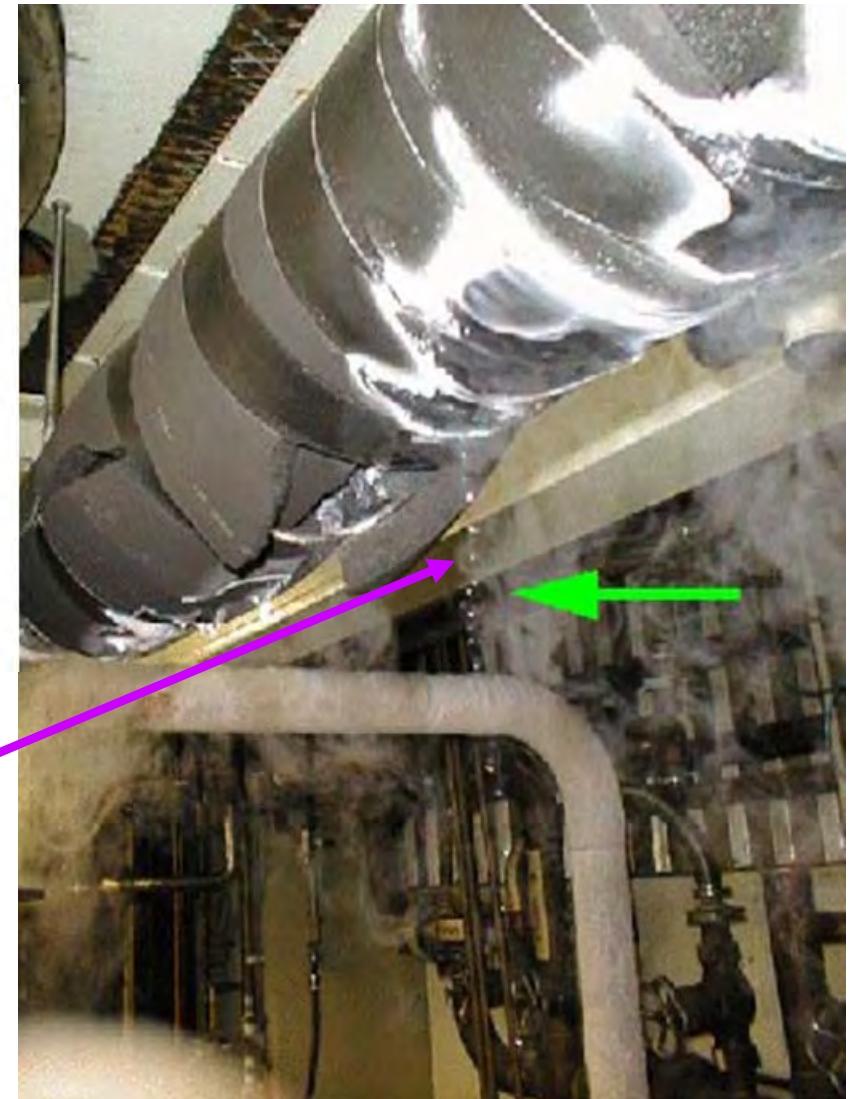
Folge: (je nach ΔT)

- Tauwasser
- Eisbildung
- **O₂-Auskondensation aus Umgebungsluft**



55 % LOX / 45 % LN2
= hochgradig brandfördernd!

Teilrektifikation Umgebungsluft an
tiefkalter Außenfläche Transferleitung



bei LH2 @ 20 K Schaumisolation
(bei Umgebungsdruck)
definitiv keine Option!

Wasserstoff: Sicherheit

Sonderfall: Wasserstoff-Versprödung

Mechanismus:

falls H_2 -Molekül an der Oberfläche aufgespalten / ionisiert wird (z.B. durch chem. Reaktion; Schweißen)

→ sehr viel kleineres H-Atom dringt in das Metallgitter ein und diffundiert rasch

insbesondere an „frischen“ Oberflächen, bei gleichzeitiger plastischer Verformung, abhängig von p, T

Akkumulation insbesondere

- an Orten erhöhter mechanischer Spannung
- an Fehlstellen, Korngrenzen, Schweißnähten, bereits vorhandenen Rissen
- an Fremdatomen

Folgen:

- Materialschwächung
- schnellere Rissbildung
- Versprödung / Sprödbbruch

betroffen:

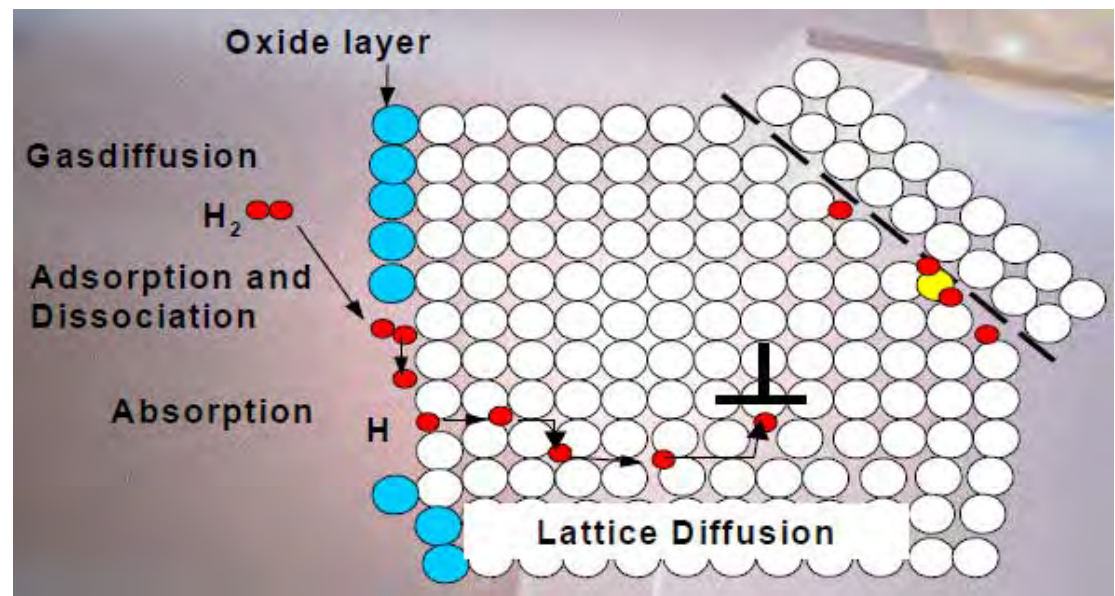
- martensitische Stähle
- Titan (hier Hydrid-Bildung)
- bestimmte Kupfersorten

Abhilfe:

geeignete Materialien und
Oberflächenbeschaffenheit
je nach H_2 -Exposition (p, T)

→ kein Problem bei üblichen / hier verwendeten austenitischen Stahlsorten

mechanische Eigenschaften



Quelle: J. Töpler, DWV
Graphik: Dynetec

Sonderfall: **Wasserstoff-Versprödung**

1. Extreme Versprödung

- starke Reduktion der Duktilität, der Kerbfestigkeit, der Einschnürung
- **hochfeste Stähle, hochfeste Nickel-Basis-Legierungen**

2. Schwere Versprödung

- merkliche Reduktion der Duktilität, der Kerbfestigkeit, der Einschnürung
- Tiefe Oberflächenrisse
- reines Nickel, Titan-Legierungen, viele Stähle

mechanische Eigenschaften

3. Leichte Versprödung

- geringe Reduktion der Duktilität
- unregelmäßige, flache Oberflächenrisse
- Kupfer, Kupfer-Beryllium, reines Titan (98%)

4. Vernachlässigbare Versprödung

- keine Oberflächenrisse mehr beobachtet
- Aluminiumlegierungen, die meisten aust. Edelstähle, OFHC-Kupfer, ETP-Kupfer

Explosionsschutz, Gefährdungsbeurteilung

Benennung explosionsgefährdeter Bereiche

laut EG-Richtlinie 1999/92/EG, Anhang I [\[12\]](#)

	... ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden. (> 50 % der Betriebsdauer)	... bei Normalbetrieb gelegentlich vorhanden. (ggf. täglich, < 50 %, > 30 min/Jahr)	... bei Normalbetrieb normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig vorhanden. (< 30 min/Jahr)
Explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln ...	Zone 0	Zone 1	Zone 2

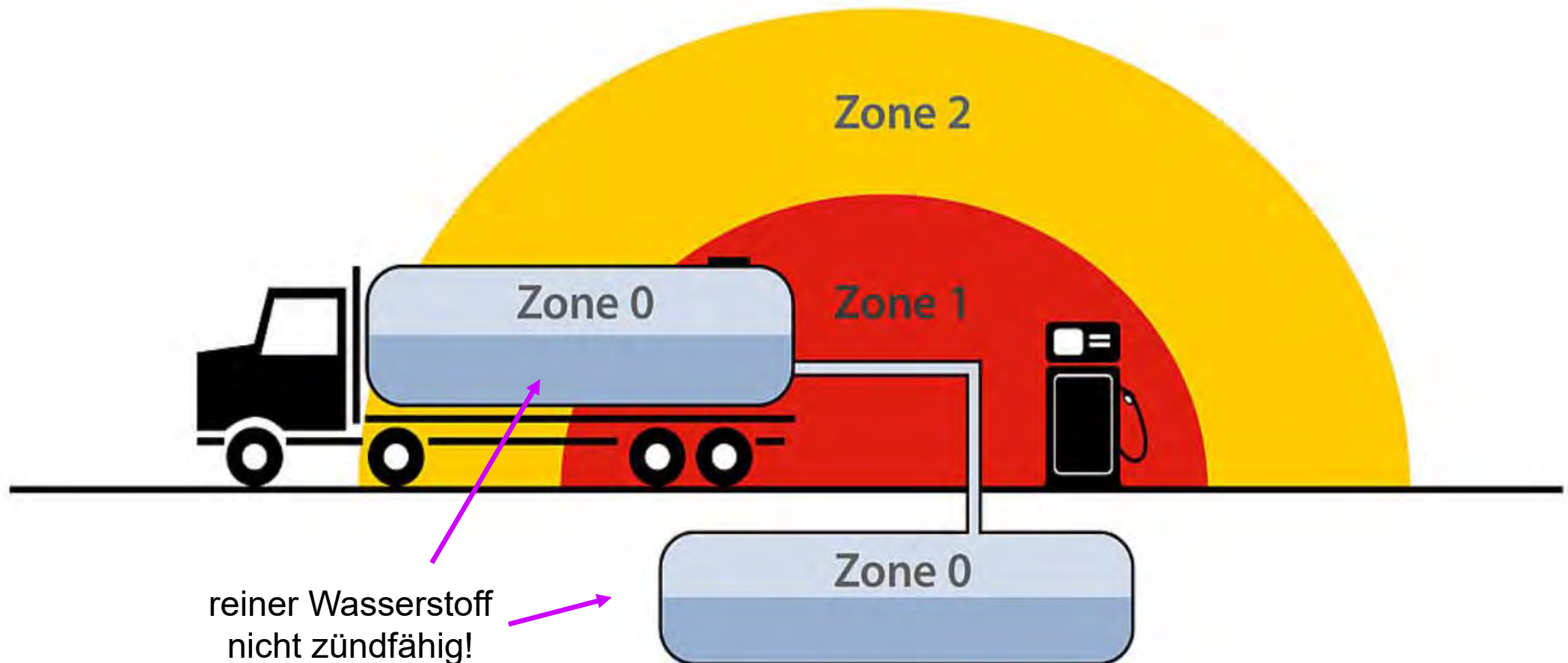
ATEX: von französ. *ATmosphères EXplosives*

- ATEX-Produktrichtlinie 2014/34/EU
- ATEX-Betriebsrichtlinie 1999/92/EG



Explosionsschutz, Gefährdungsbeurteilung

Bsp. Zoneneinteilung



LH₂ Sicherheits-Versuchsfeld TU Dresden MOL 110



experimental area 2.2 m x 1.4 m (accessible)
explosive-proof venting system (speed I, speed II)
separate off-gas line
inert gas for venting (helium)
separate electric power supply

LH₂ Safety Test Area TUD

(unique; in operation since 2004)

Ort	Zone
innerhalb Lamellenvorhang + Haube, inkl. Abgasrohr	Zone 2
außerhalb Lamellenvorhang + Haube	- nichts -
Austrittsbereich Abluft, Austrittsbereich H ₂ - Abgasleitung	Zone 1

Richtlinie 1999/92/EG (ATEX-Betriebsrichtlinie) – anzuwenden seit 2003

•ABSCHNITT I ALLGEMEINE BESTIMMUNGEN

- Artikel 1 Zweck und Anwendungsbereich der Richtlinie
- Artikel 2 Definition

•ABSCHNITT II PFLICHTEN DES ARBEITGEBERS

- Artikel 3 Verhinderung von und Schutz gegen Explosionen
- Artikel 4 Beurteilung der Explosionsrisiken
- Artikel 5 Allgemeine Verpflichtungen
- Artikel 6 Koordinierungspflicht
- Artikel 7 Bereiche mit explosionsfähigen Atmosphären
- Artikel 8 Explosionsschutzdokument
- Artikel 9 Besondere Vorschriften für Arbeitsmittel und Arbeitsstätten

•ABSCHNITT III SONSTIGE BESTIMMUNGEN

- Artikel 10 Anpassung der Anhänge
- Artikel 11 Leitfaden für bewährte Verfahren
- Artikel 12 Unterrichtung der Unternehmen
- Artikel 13 Schlußbestimmungen
- Artikel 14 (Inkrafttreten)
- Artikel 15

•ANHANG I EINTEILUNG VON BEREICHEN, IN DENEN EXPLOSIONSFÄHIGE ATMOSPHÄREN VORHANDEN SEIN KÖNNEN

•ANHANG II A. MINDESTVORSCHRIFTEN ZUR VERBESSERUNG DER SICHERHEIT UND DES GESUNDHEITSSCHUTZES DER ARBEITNEHMER, DIE DURCH EXPLOSIONSFÄHIGE ATMOSPHÄREN GEFÄHRDET WERDEN KÖNNEN

•ANHANG III Warnzeichen zur Kennzeichnung von Bereichen, in denen explosionsfähige Atmosphären auftreten können, gemäß Artikel 7 Absatz 3



gemäß Anhang III

Wasserstoff: Sicherheit

Primärer Explosionsschutz

Maßnahmen, welche eine Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre verhindern oder einschränken (Vermeiden explosionsfähiger Atmosphäre).

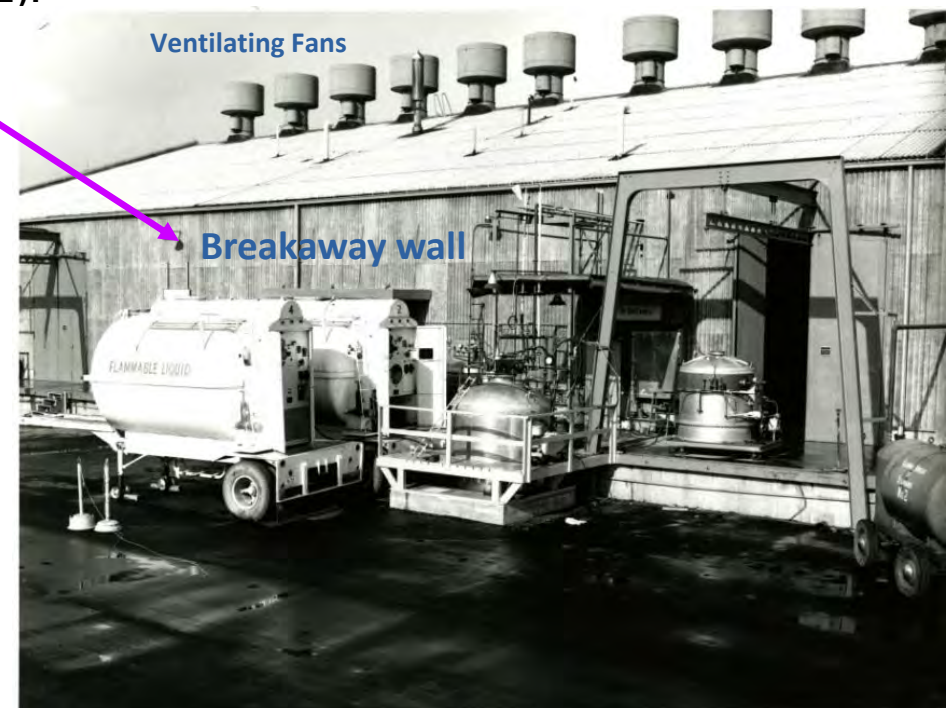
Sekundärer Explosionsschutz

Maßnahmen, welche die Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre verhindern (Vermeiden wirksamer Zündquellen).

Tertiärer Explosionsschutz

Maßnahmen, welche die Auswirkungen einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken (Konstruktiver Explosionsschutz).

Bsp. Gebäude für Wasserstoff-
Verflüssigung und –Abfüllung
Boulder / Colorado
(NIST Archives)



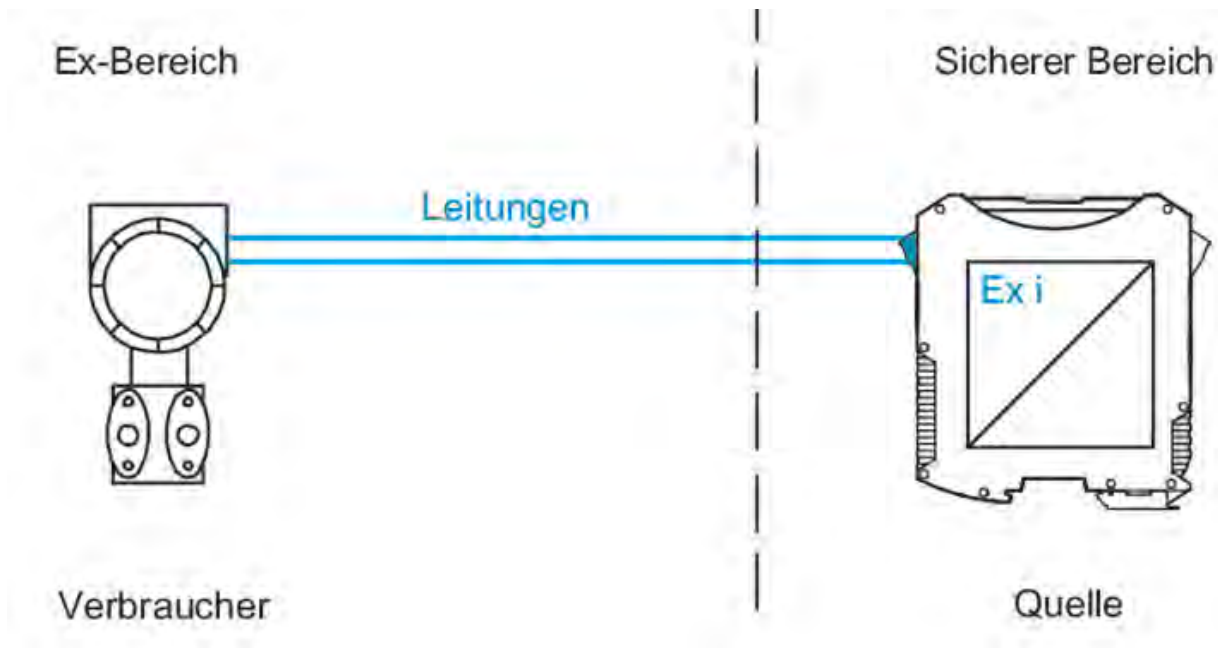
Wasserstoff: Sicherheit

Schutzprinzip **Eigensicherheit:**

Energiemenge in einem Stromkreis auf nicht-zündfähiges Maß begrenzt;

⇒ Funken / thermische Effekte keine potentielle Zündquellen mehr

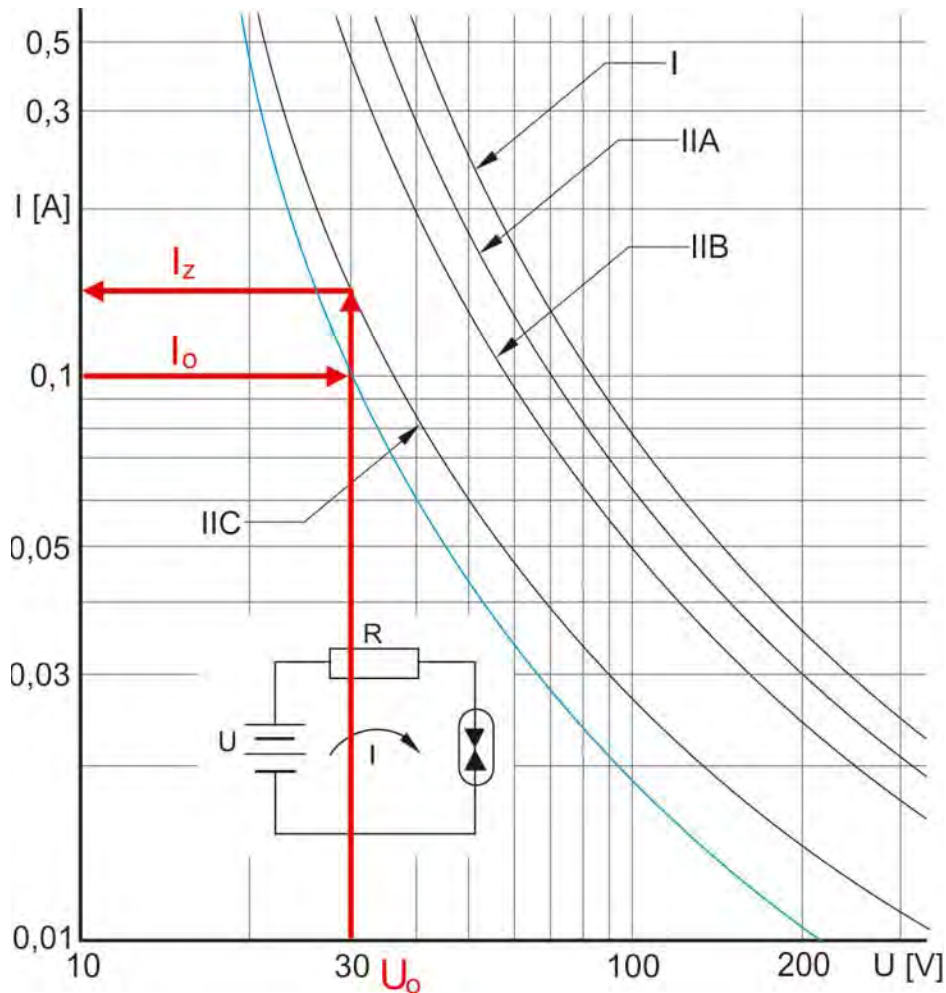
- sehr hohes Sicherheitsniveau, erlaubt sogar Einsatz in hochgradig explosionsgefährdeten Bereich Zone 0.
- „normale“ Kabel, Steckverbindungen, Durchführungen können verwendet werden



www.r-stahl.com

Wasserstoff: Sicherheit

Schutzprinzip **Eigensicherheit**: **Energiemenge** in einem Stromkreis auf **nicht-zündfähiges Maß** begrenzt
(Funken / thermische Effekte keine potentielle Zündquellen) mehr)



Wasserstoff:
Explosionsgruppe
IIC

www.r-stahl.com

Einsatzbereich	EPL	Sicherheitsniveau	Keine Zündung	Eigensicherheit
Zone 2	Gc	normal	im ungestörten Betrieb	ic
Zone 1	Gb	hoch	im ungestörten Betrieb und mit einem Fehlern	ib
Zone 0	Ga	sehr hoch	im ungestörten Betrieb und mit zwei Fehlern	ia

wenn **Eigensicherheit** nicht möglich:

z.B. ⇒ Gehäusekapselung (Schutzart Ex d, Ex p, Ex e)

= **sekundärer Explosionsschutz**, Vermeidung wirksamer Zündquellen

- hermetisch dichte Kapselung
- Vergusskapselung, Inertgas-Überdruckkapselung; druckfeste Kapselung
- unlösbare elektr. Verbindungen (keine Steckverbindungen)

überdies:

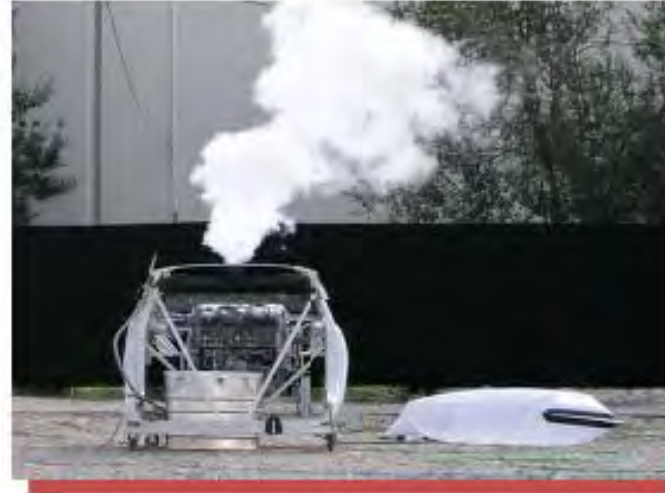
- funkenfreies Werkzeug (Berylliumbronze), Vermeidung Schlag-, Reibfunken
- Erdung, Blitzschutz
- keine heißen Oberflächen
- keine Stoßwellen, extreme Gasgeschwindigkeiten, Vermeidung Ladungstrennung, statische Aufladung im (extrem trockenen) Gas



Wasserstoff: Sicherheit



Shaker test



Vacuum loss test



Component crash test



Fire test

Quelle: BMW

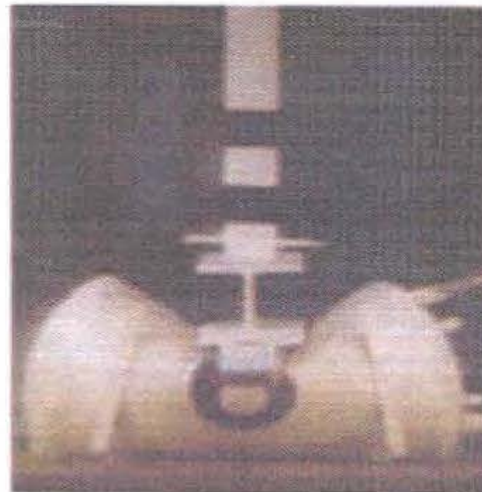
Crash Test of Liquid Hydrogen Tank

Simulation of Road Accident:

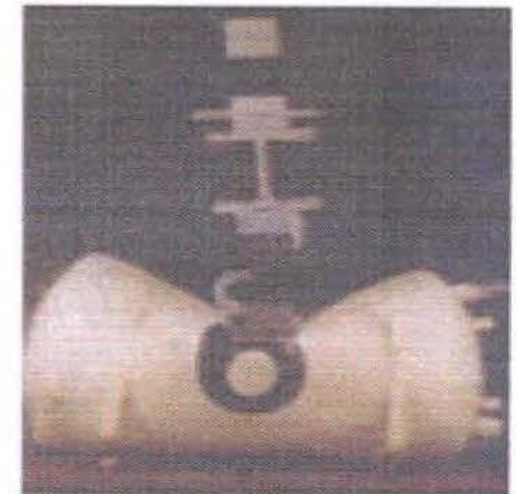
Crash of a HD-vehicle into a passenger car at 60 km/h



LH₂ tank and drop weight
5 ms pre-impact



Maximum deformation of the
LH₂ tank 30 ms post-impact



Lasting deformation of the
LH₂ tank

Source: Messer GmbH

ADVANCED LIGHTWEIGHT FUEL STORAGE SYSTEMS™



Crash-Test LH₂-Fahrzeug

Wasserstoff: Sicherheit

fast keine
IR-Emission



Wasserstoff (LH₂)

sehr starke
IR-Emission



Benzin

Quelle: Linde AG

Wasserstoff: Sicherheit



Photo 1 - Time: 0 min, 0 sec - Hydrogen powered vehicle on the left. Gasoline powered vehicle on the right.



Photo 2 - Time 0 min, 3 seconds - Ignition of both fuels occur. Hydrogen flow rate 2100 SCFM. Gasoline flow rate 680 cc/min.

Vergleich
Brandfall
LH₂ – Benzin



Photo 3 - Time: 1 min, 0 sec - Hydrogen flow is subsiding, view of gasoline vehicle begins to enlarge



Photo 4 - Time: 1 min, 30 sec - Hydrogen flow almost finished. View of gasoline powered vehicle has been expanded to nearly full screen

Quelle:
J. Töpler,
DWV



Unfall LH₂-Trailer mit Abblasen des Wasserstoffs (s. Pfeil; ohne Entzündung)

Accident with H₂ Truck



June 2006, H₂ Tube Trailer Accident, Germany

Wasserstoff: Zwischenfall Linde Leuna 26.8.2024: abgestellter H2-Druckgastrailer ausgebrannt

Undichtheit – „Verpuffung“ – Brand (Werksfeuerwehr schnell; kein Personenschaden)

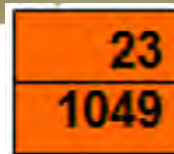
bis zur endgültigen Ursachenermittlung alle Trailer dieser Bauart (500 bar) vorsorglich außer Betrieb genommen

→ Okt./Nov 2024 noch dt.-weit H2-Knappheit („force majeure“ - H2-Tankstellen Berlin; Linit B – Zug Bremervörde)

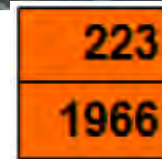


Leuna-Exkursion ECC:
Do, 22.8.2024

Kennzeichnung Wasserstoff-Fahrzeuge



H₂ gasf.



H₂ tiefkalt-fl.



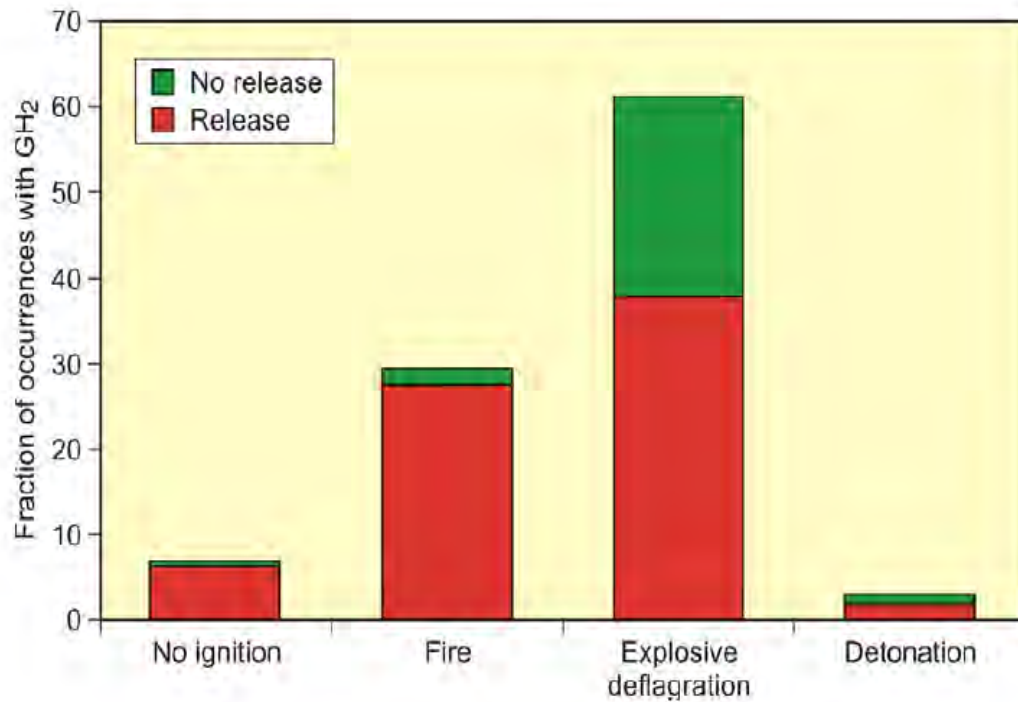
Kennzeichnung
Gefahrguttransport



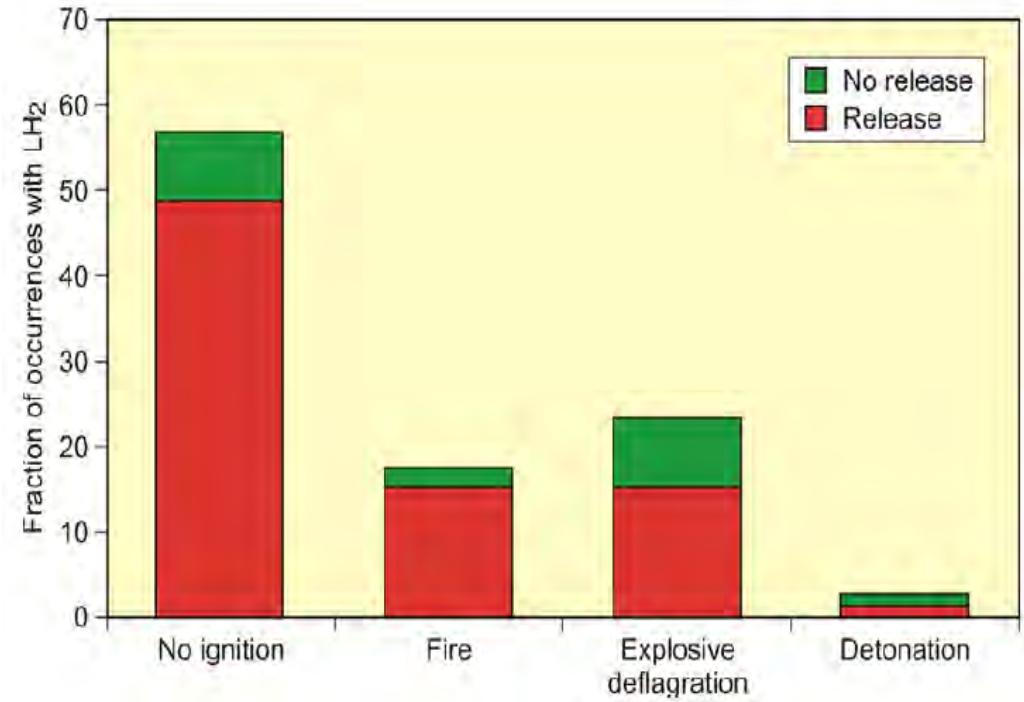
H₂-Kennzeichnung PKW:

- Im Ausland z.T. bereits Pflicht
- In Deutschland erst in Vorbereitung. Bis dahin hilfsweise Aufkleber beachten „CleanEnergy“, „Powered by Hydrogen“ und Benennung an Tankanschlusstutzen

Wasserstoff: Sicherheit



H₂-Druckgastanks warm
Ø 1 verletzte Person pro Vorfall



tiefkalt-flüssig (LH₂)
Ø 0,1 verletzte Person pro Vorfall

Statistik H₂-Unfälle (Kreiser, 1994)

Basis: 287 ausgewertete Vorfälle

Explosion an Tankstelle

Eine Explosion erschütterte am Nachmittag des 10. Juni eine Wasserstoff-Tankstelle in Sandvika, westlich von Oslo. Auf dem Gelände der Tankstelle selbst gab es keinen Personenschaden. Die Druckwelle allerdings löste bei zwei PKW, die den Ort gerade auf der Straße passierten, die Airbags aus. Das führte dazu, dass zwei Personen leicht verletzt wurden. Die Explosion löste außerdem ein Feuer aus,



Gaslager nach dem Unglück
(Foto: Ole Berg-Rusten / NTB Scanpix)

Alle von Nel gelieferten Tankstellen in Norwegen und Dänemark und auch in Deutschland sind geschlossen worden, bis Ursache und Hergang des Unfalls genau bekannt sind. Damit kann man besonders in Norwegen im Moment

das von der Feuerwehr nach zwei Stunden unter Kontrolle gebracht werden konnte.

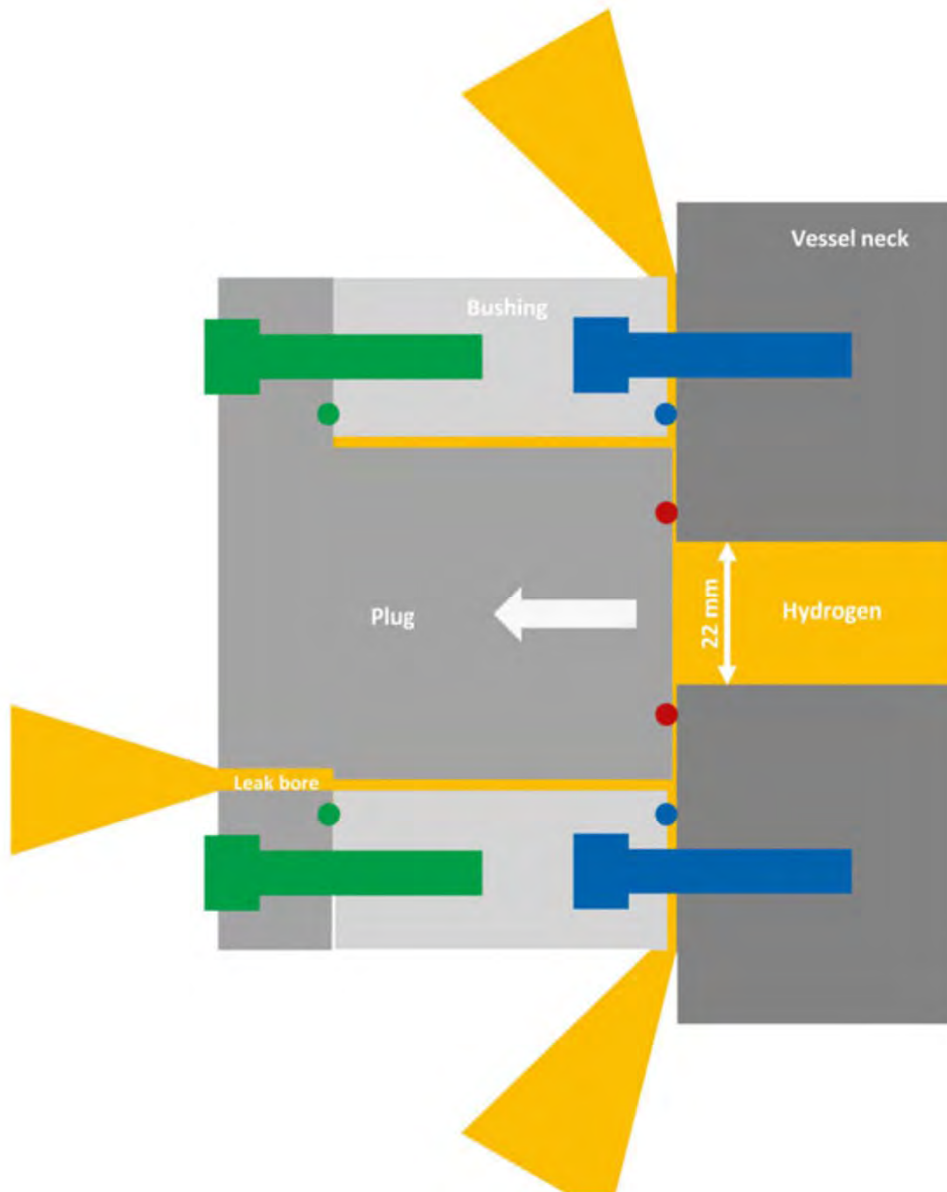
Nach bisherigen Erkenntnissen haben weder die eigentliche Tankstelle noch der Elektrolyseur, der an Ort und Stelle Wasserstoff herstellt, mit dem Unglück zu tun. Vielmehr hat einer der Druckbehälter des Hochdruck-Vorratslagers Schaden genommen; Wasserstoff trat aus einem Leck aus und bildete mit Luft eine brennbare Wolke, die sich dann auch entzündete. Das Niederdruck-Vorratslager war nicht Ausgangspunkt des Unfalls, und dort wurden auch keine



Luftbild des brennendes Gaslagers
(Foto: NRK)

Behälter beschädigt.

kaum Wasserstoff tanken, weil die meisten Tankstellen in diesem Land von Nel kommen. Toyota hat deswegen nicht den Verkauf, aber die Auslieferung von Mirais bis auf Weiteres ausgesetzt.



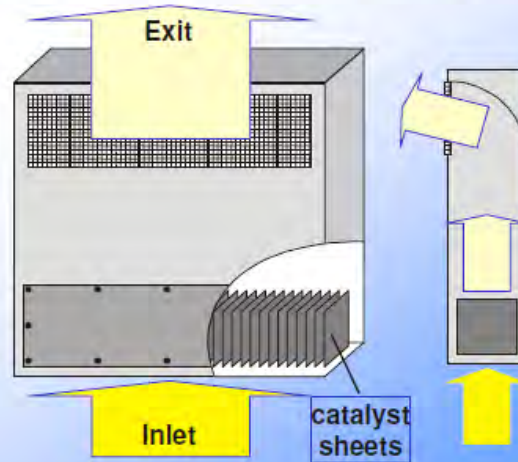
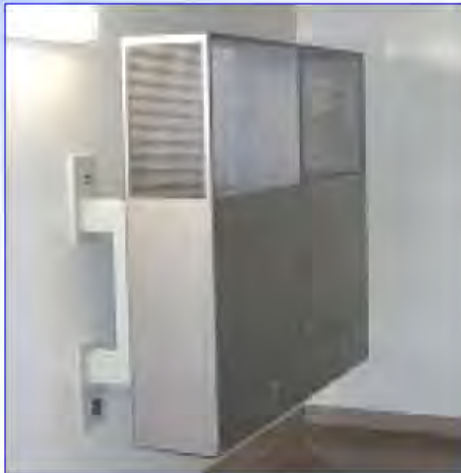
Schema: rechts der Tank.

Die grünen Bolzen waren fest angezogen, die blauen nicht.

Nach einer Weile versagte die rote Dichtung, dann auch die blaue.

Passive Auto-Catalytic Recombiner (PAR)

- PAR: flameless conversion of H_2 even at concentrations as low as 1-2 vol.% at ambient temperatures
- Installation in numerous European LWR since the 1990s

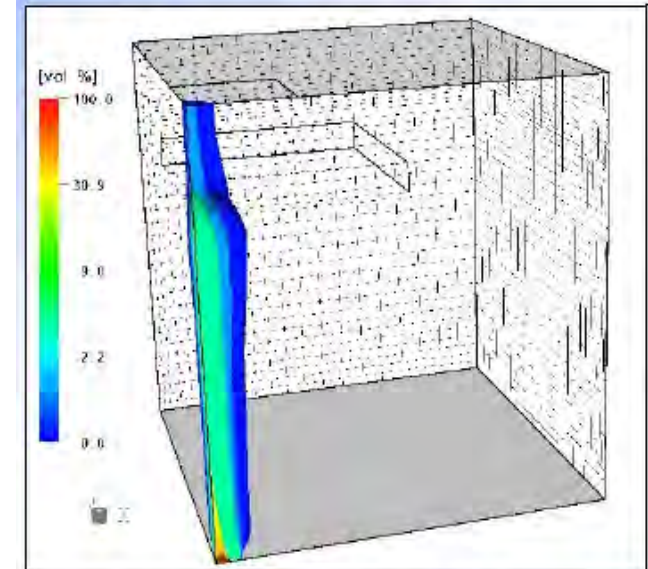


Katalytische H_2 -Rekombinatoren

Standard in westlichen Kernreaktorblöcken

(fehlend in Fukushima)

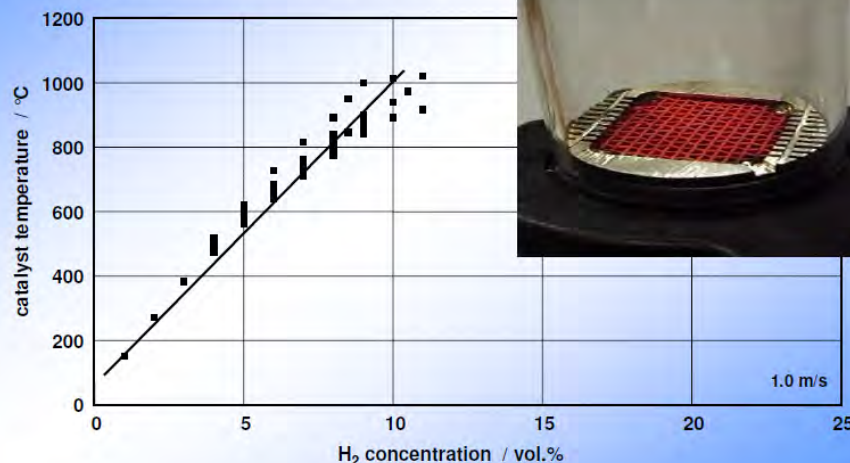
H_2 concentration



Source: H_2 gas @ 20 K

Recombiner in Garage

Catalyst Temperature on Washcoat Meshes

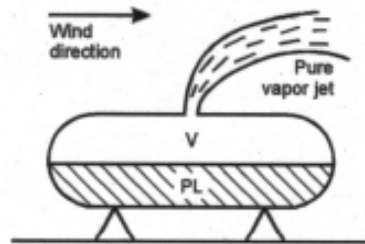


Pt –
Oberflächenbeschichtung

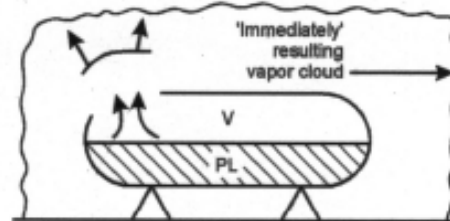
Wärmedissipation gemäß
Heizwert $H_u = 119,95$ MJ/kg

K. Verfondern, FZ Jülich
(2008)

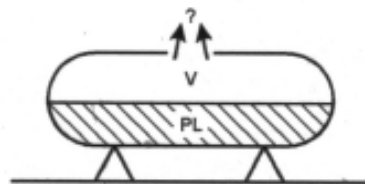
Wasserstoff: Sicherheit



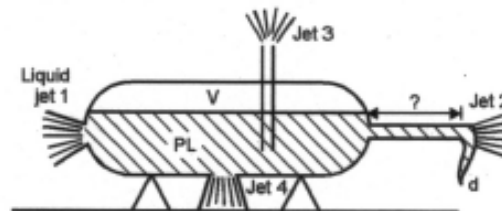
Small hole in vapor space-pressurized tank



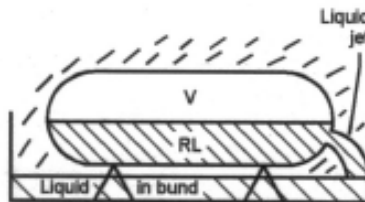
Catastrophic failure of pressurized tank



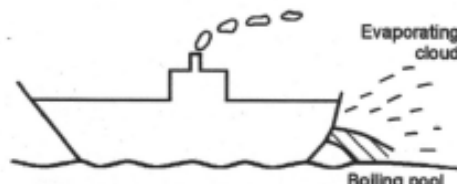
Intermediate hole in vapor space-pressurized tank



Escape of liquefied gas from a pressurized tank



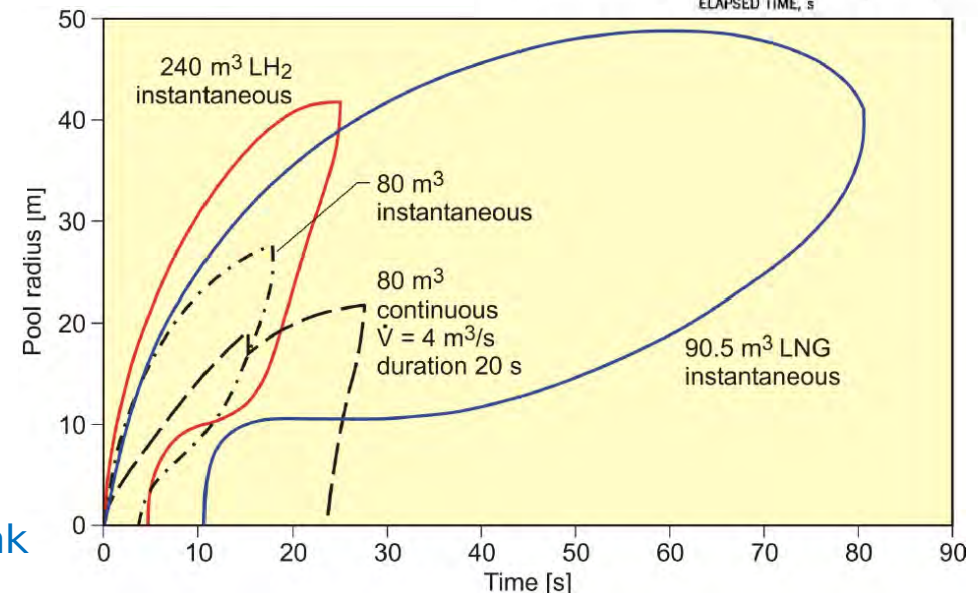
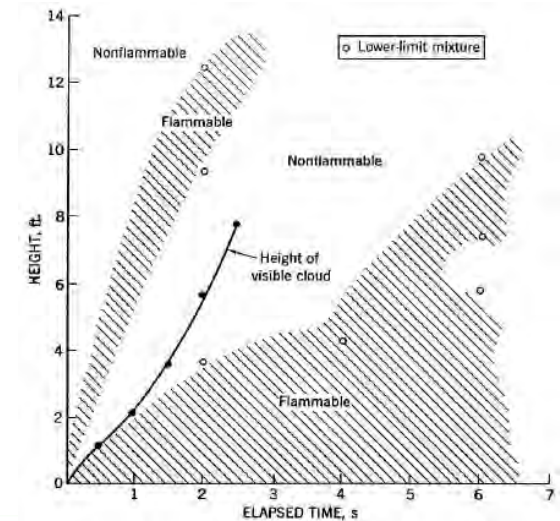
Spillage of refrigerated liquid into bund

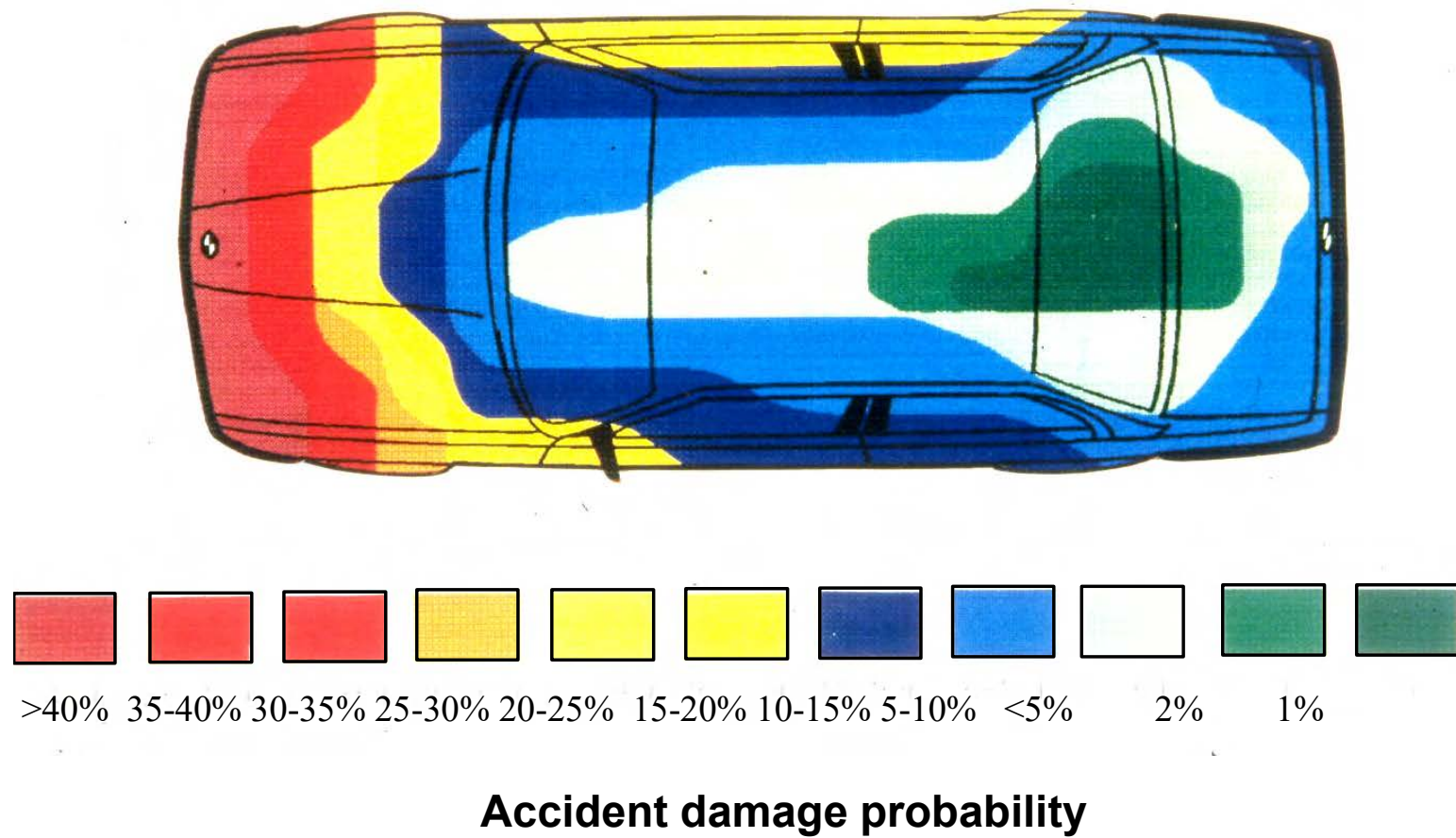


Spillage of refrigerated liquid onto water

Types of cryogen release

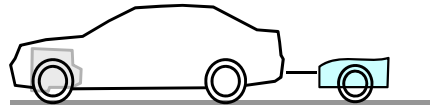
Prediction LH2 Release from CRYOPLANE Tank



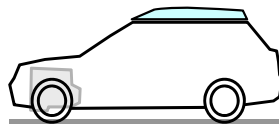


Quelle: BMW

Level of Vehicle Integration



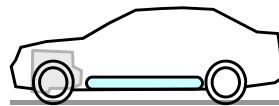
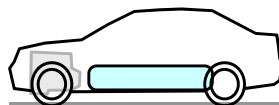
Trailer



Roof



Trunk



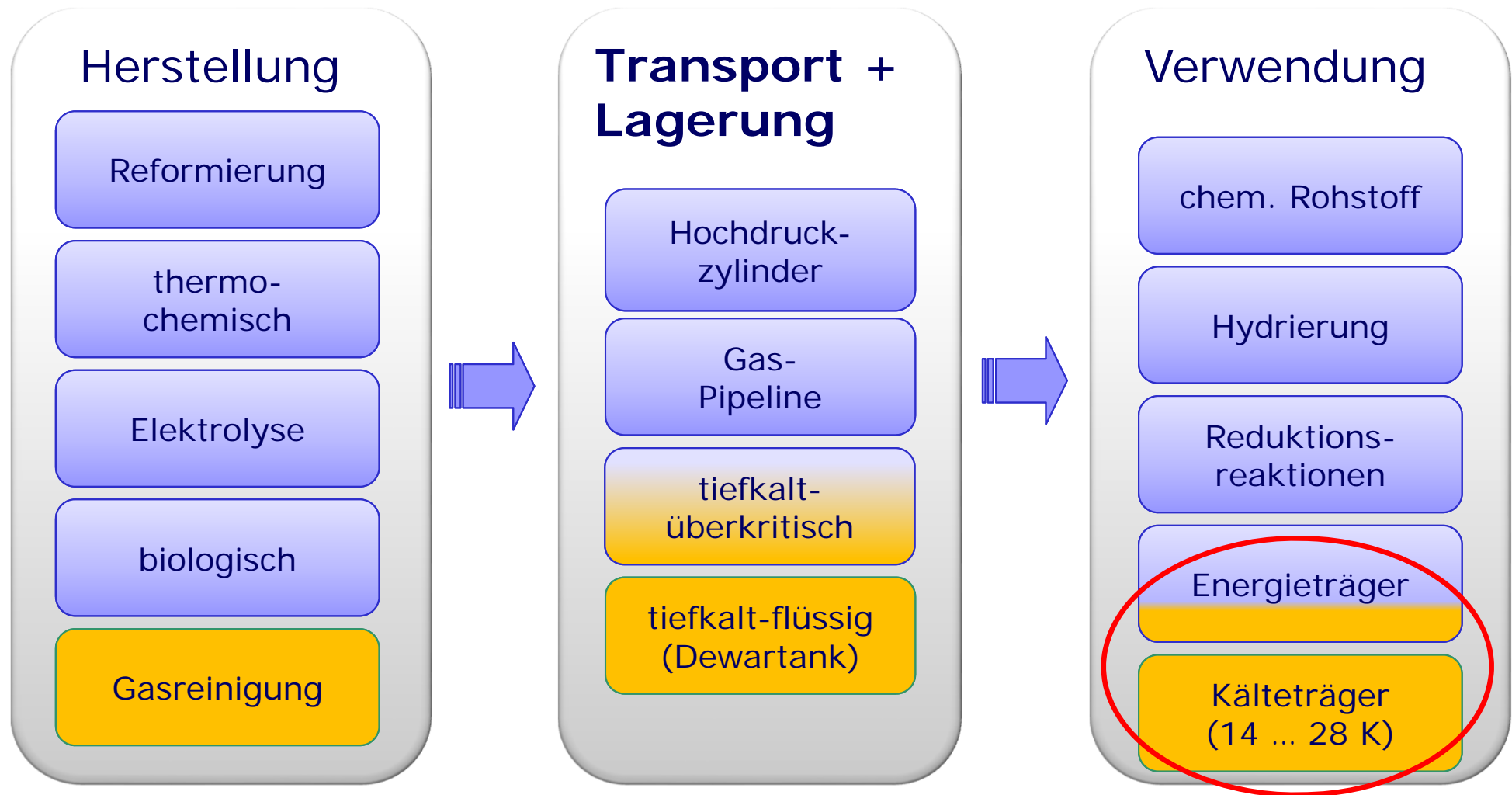
Center Tunnel
Below Passenger
Compartment



Quelle: BMW

zunehmende Integration und sicher Platzierung Wasserstofftank im Pkw

Wasserstoff: Herkunft und Verwendung



gelb markiert: Kryotechnik von Bedeutung

Wasserstoff: Erzeugung

- aus fossilen Energieträgern (insbesondere Erdgas)

Dampfreformierung



Partielle Oxidation



Shift-Reaktion (Synthesegas)



Autotherme Reaktion

Kombination von 1, 2 & 3

- mit elektrischer Energie (Herkunft?)

Wasser-Elektrolyse

Chlor-Alkali-Elektrolyse (H_2 als Nebenprodukt)

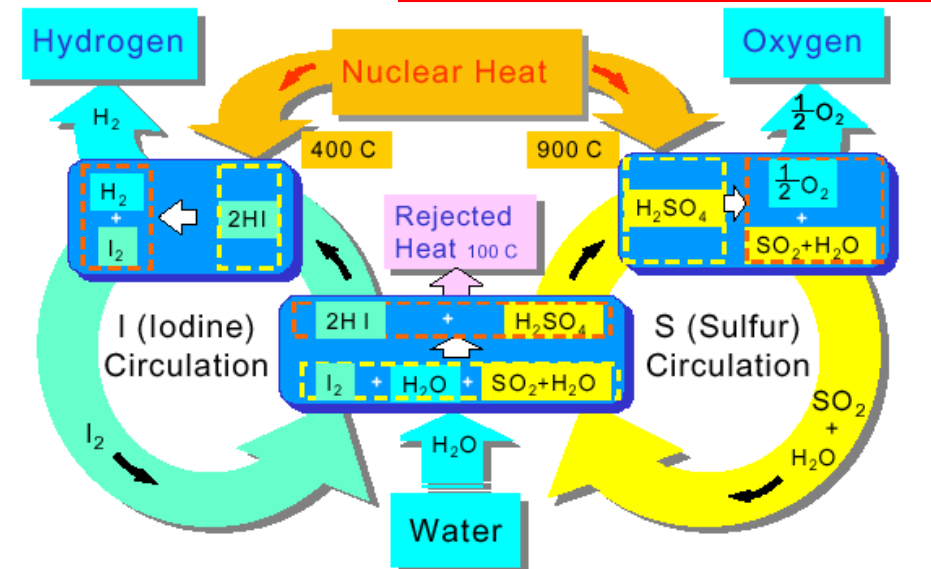
- Biomasse

Reformierung von Biogas

Photobiologische Reaktion

- Thermochemische Spaltung

Jod-Schwefel-Prozess



weitere Details: ⇒ W. Lippmann, "Wasserstoff-Wirtschaft und Wasserstoff-Energietechnik"

Wasserstoff: Erzeugung

derzeit noch 80...90 %
"grauer Wasserstoff !

Die „Farbenlehre“ beim Wasserstoff:

Grauer Wasserstoff: aus fossilen Energieträgern (Erdgas); **Kohle [brauner Wass.]**



Blauer Wasserstoff: aus fossilen Energieträgern (Erdgas; Kohle), inkl. CCS

CO₂ unterirdisch verpresst

Türkiser Wasserstoff: aus Erdgas, mittels Methanpyrolyse ($\text{CH}_4 \rightarrow 2 \text{ H}_2 + \text{C}$)

Nebenprodukt Graphit

Grüner Wasserstoff: Elektrolyse mit grünem Strom ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$)

rein regenerativ

← Ziel

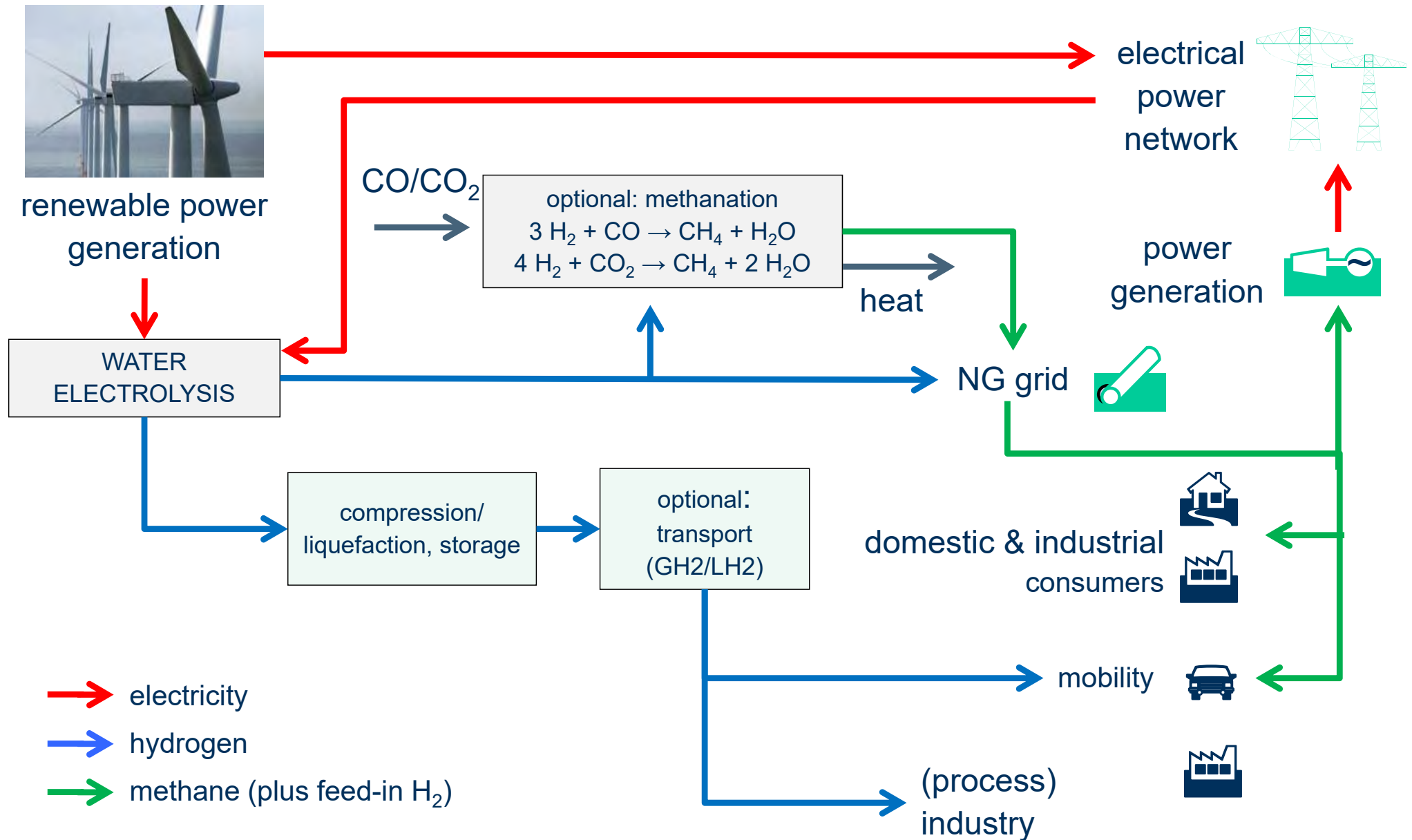
Gelber Wasserstoff: Elektrolyse mit derzeitigem Strommix ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$)

764 g CO₂/kWh (Dt., 1990) → **380 g CO₂/kWh** (Dt., 2023/24)

Weißer Wasserstoff: Abfall-H₂ Chemieindustrie

Roter/rosa/violetter Wasserstoff: Elektrolyse mittels Kernenergie-Strom (CO₂-frei)

Wasserstoff: Szenarien mit H₂ als Energieträger



Quelle: Prof. Belloni, Linde / TUD

Wasserstoff: Wirkungsgradketten

H₂ grün, nötiger Elektrolyseur:
 $\eta \approx 60 \%$

Bsp.: vom Erdgas zur Straße ...

Erdgas: 100 %

H₂-Reformer: $\eta \approx 75 \%$ (60...70 % !?)

H₂-Reinigung: $\eta \approx 95 \%$

H₂-Verflüssigung/-Verluste: $\eta \approx 66 \%$

H₂-Verbrennungsmotor: $\eta \approx 35 \%$

⇒ übrig: 16,5 %
energetisch

Erdgas: 100 %

H₂-Reformer: $\eta \approx 75 \%$

H₂-Reinigung: $\eta \approx 95 \%$

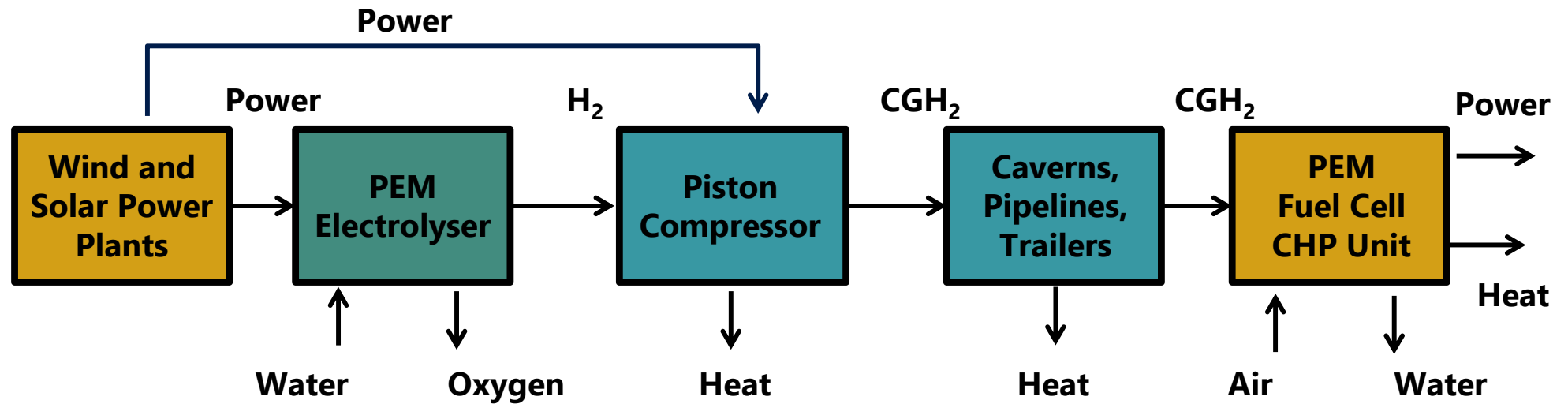
HD-Kompressor: $\eta \approx 80 \%$

Brennstoffzelle: $\eta \approx 50 \%$

Elektromotor: $\eta \approx 90 \%$

⇒ übrig: 23 %

Wasserstoff: Wirkungsgradketten



Example Process Chain

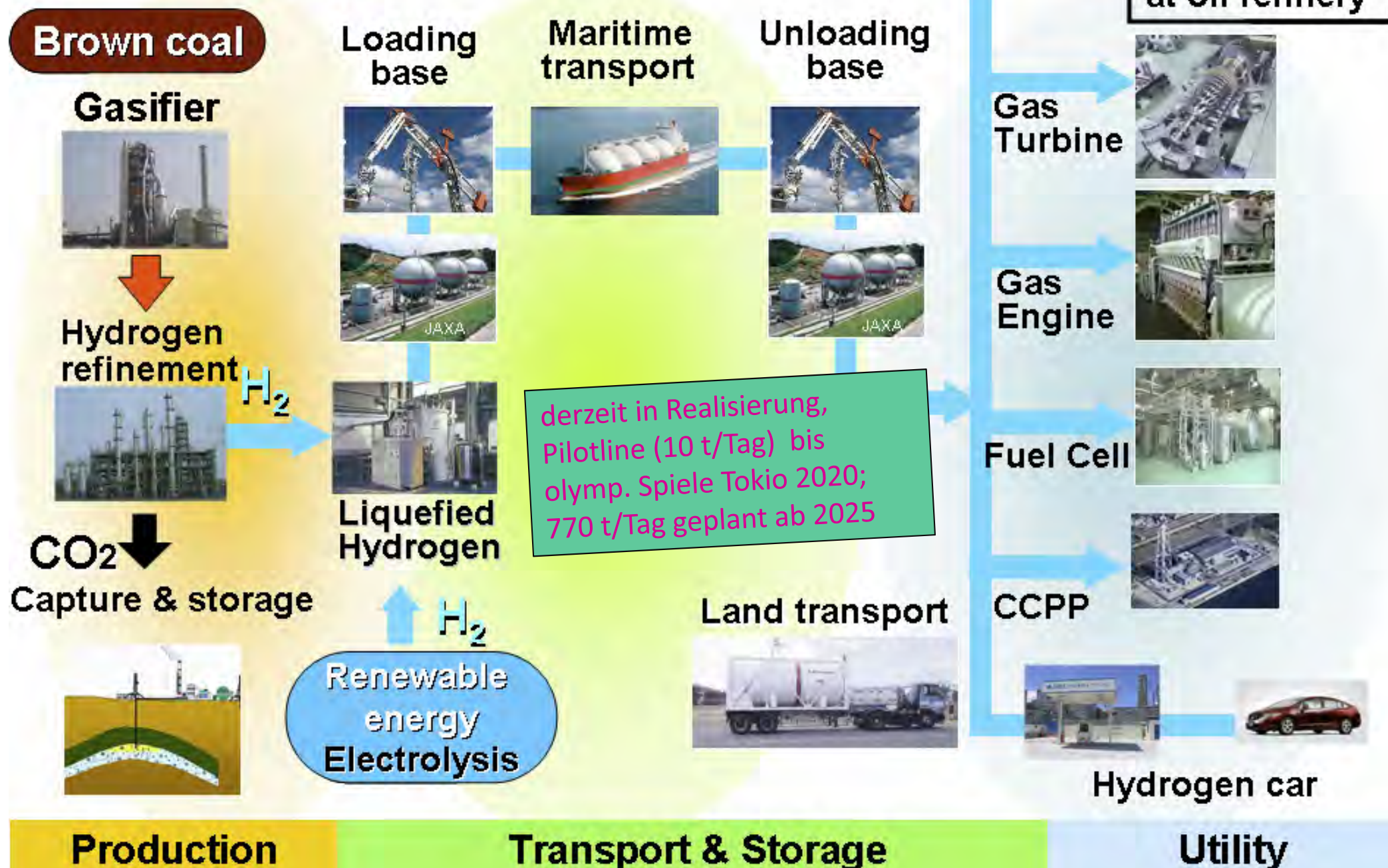


Grassmann diagram

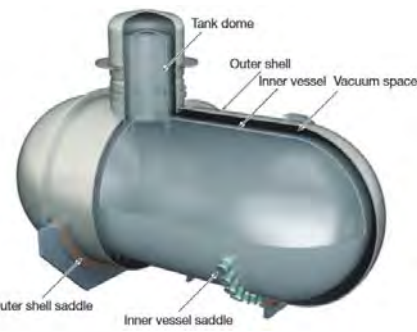
CO2 free hydrogen chain

【Japan】

【Australia】



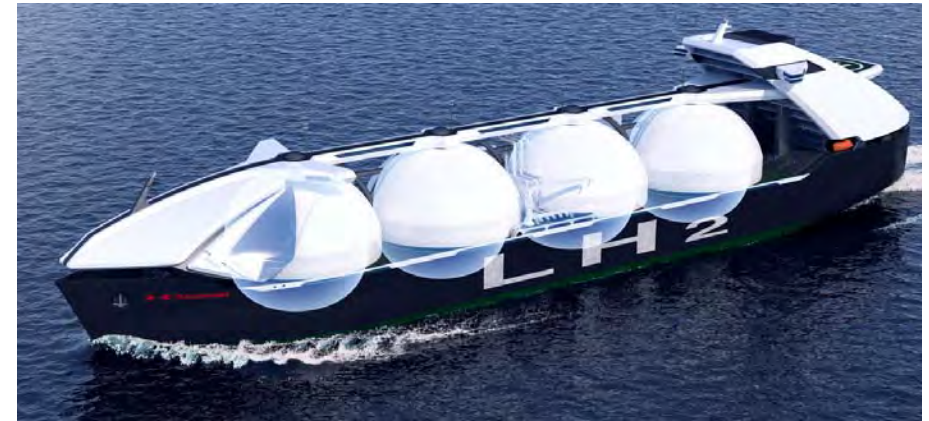
Wasserstoff: Perspektiven



vakuumisolierter
LH2-Tank 1250 m³



SUISO Frontier - Stapellauf



in Vorbereitung: Kapazität 4 x 40 000 m³ = 160 000 m³

existierend

Ladearm

LH₂-Tank

BOG compressor

Vent stack



Braunkohle



⇒ Japan: Einführung H₂-Versorgungskette (als Alternative zu LNG) voll im Gange

Wasserstoff: Perspektiven

pro

- + einziger (lokal) emissionsfreier chemischer Energieträger
- + bereits enorme Investitionen durch Fahrzeugindustrie
- + zahlreiche existierende H₂-Tankstellen
- + Mangel an Alternativen (adäquate Akkumulatoren)
- + dezidierte Entscheidungen in Japan zugunsten H₂-Einführung

contra

- Bereitstellung „grüner“ Wasserstoff noch ungelöst
- kürzlich erfolgte Neueinschätzung weltweiter Öl- und Gasvorräte
- synthetischer Kraftstoff als bequemere Option
- enorme Investkosten
- Wirkungsgradketten-Dilemma
- derzeit unbefriedigende Kosten, Systemmassen, Lebensdauer

⇒ überdies: es setzt sich nicht zwingend die technisch beste Option durch!

Wasserstoff: Literatur

- www.hyweb.de
- Peschka, W.: Flüssiger Wasserstoff als Energieträger, Springer – Verlag, Wien New York, 1984
- Eichlseder, H., Klell, M.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden; 2008
- Klell, Manfred, Eichlseder, Helmut, Trattner, Alexander: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik - Erzeugung, Speicherung, Anwendung (2018)
- Flynn, T. M.: Cryogenic engineering. New York [u.a.] : Dekker, 1997
- Timmerhaus, K. D. ; Flynn, T. M.: Cryogenic process engineering. New York [u.a.] : Plenum Press, 1989
- Deutscher Wasserstoff und Brennstoffzellenverband - www.dwv-info.de
- Ludwig-Bölkow-Systemtechnik - www.lbst.de
- öffentlich geförderte Projekte:
 - www.cleanenergypartnership.de
 - www.hyways.de
 - www.storhy.net
- Töpler, J., Lehmann J. (Hrsg.), Wasserstoff und Brennstoffzelle – Technologie und Marktperspektiven, Springer-Verlag 2014, ISBN 978-3-642-37414-2