

# **WARUM GRÜNER WASSERSTOFF UND WIE GEFÄHRLICH IST ER WIRKLICH?**

Space Forum Lampoldshausen, 20. Oktober 2022

Dr.-Ing. Daniela Lindner, Angewandte Wasserstofftechnologien



- Wasserstoff-Grundlagen
  - Eigenschaften von Wasserstoff
  - Was ist grüner Wasserstoff
  - Warum grüner Wasserstoff?
  - Übersicht der Wasserstofftechnologien
  
- Wasserstoff-Sicherheit
  - Gefährlichkeit von Wasserstoff – Öffentliche Wahrnehmung
  - Sicherheitsrelevante Eigenschaften von Wasserstoff
  - Maßnahmen gegen Sicherheitsrisiken
  
- Zusammenfassung

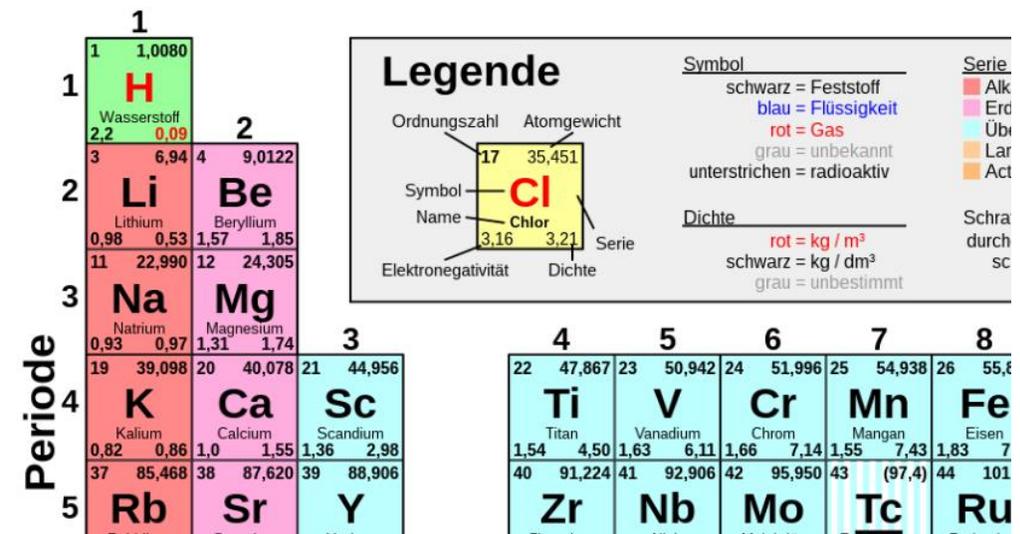
# WASSERSTOFF-GRUNDLAGEN

# Eigenschaften von Wasserstoff



## Was ist Wasserstoff?

- Erstes und damit **kleinstes und leichtestes Element** im Periodensystem bestehend aus einem Proton und einem Elektron (Isotope Deuterium und Tritium)
- Hauptbestandteil des Wassermoleküls H<sub>2</sub>O
- Atomarer Wasserstoff (H / H<sup>+</sup>-Ion / Proton) ist sehr reaktiv
- Natürliches Vorkommen meist als (Gas-)Molekül (H<sub>2</sub>)
- Farb- und geruchslos, nicht toxisch
- Unter Atmosphärenbedingungen gasförmig und flüchtig



$$T_{\text{SDP, 1bar}} = 20\text{K} = -253^\circ\text{C} \quad \rho_{\text{GH}_2, 1\text{bar}} = 0,0899 \text{ kg/m}^3$$

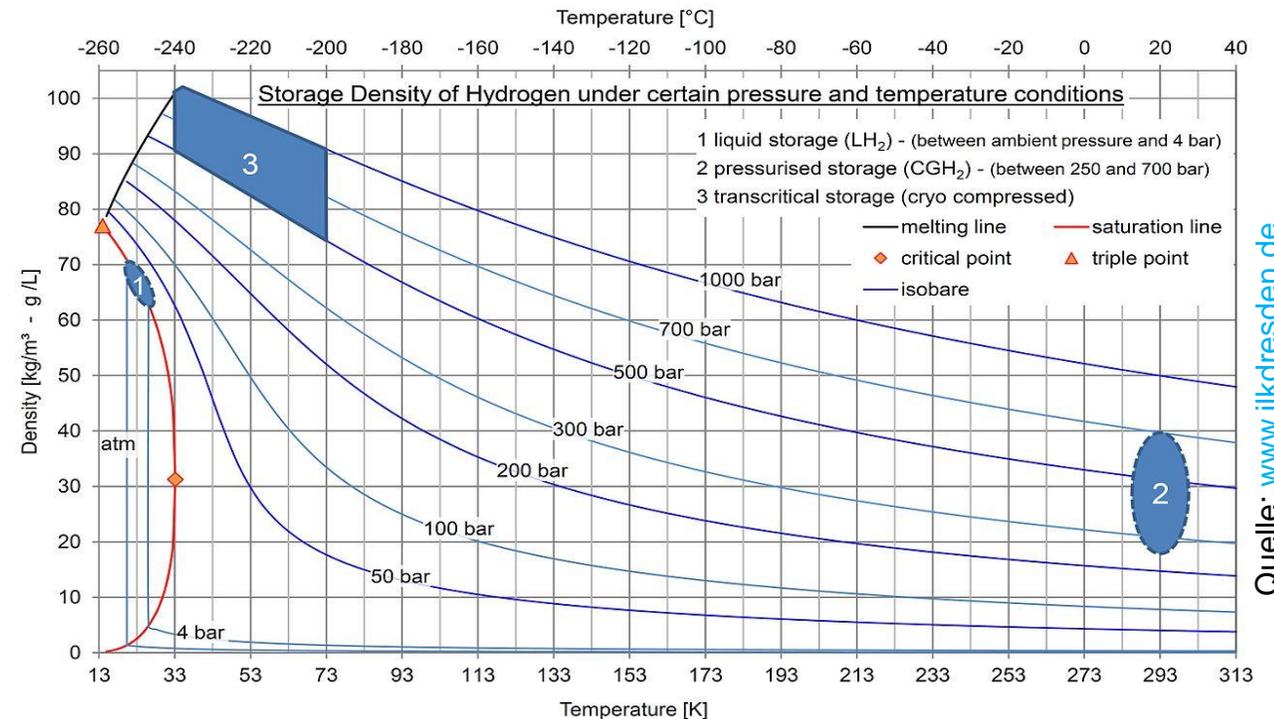
# Eigenschaften von Wasserstoff

## Energetische Eigenschaften

- Unter Energieträgern hat  $H_2$  die **höchste Gravimetrische Energiedichte  $\omega_{H_2}$**  aber eine **sehr schlechte volumetrische Energiedichte**

## Speicherproblematik

- Durch Realgasfaktor keine Verdoppelung der Dichte bei Verdoppelung des Drucks
- Bessere volumetrische Eigenschaften bei Flüssigwasserstoff  $LH_2$  und Cryo-Compressed Wasserstoff  $CCH_2$



$$\omega_{H_2} = 33,33 \text{ kWh/kg}$$

$$\rho_{GH_2, 1\text{bar}} = 0,09 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{GH_2, 350\text{bar}} = 24 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{GH_2, 700\text{bar}} = 40 \text{ kg/m}^3$$

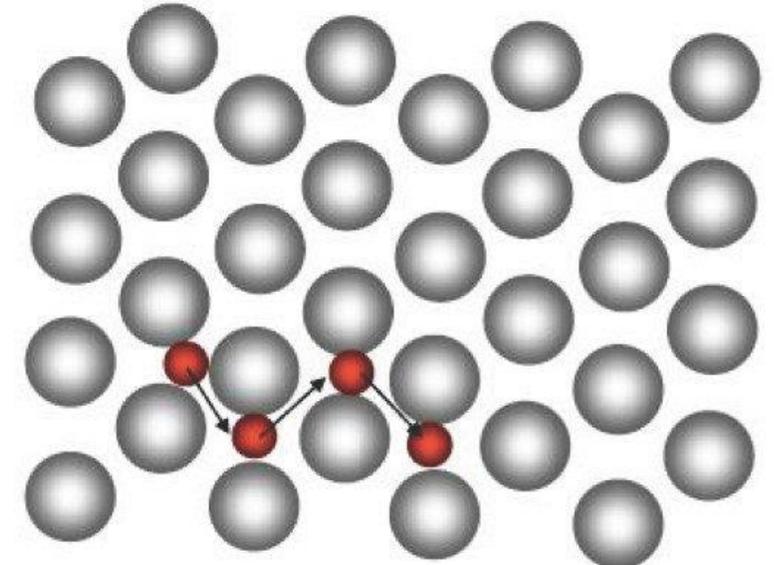
$$\rho_{LH_2, 1\text{bar}} = 70,8 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{CCH_2, 700\text{bar}} = 90 \text{ kg/m}^3$$

# Eigenschaften von Wasserstoff

## Diffusionseigenschaften

- Der Diffusionskoeffizient von Wasserstoff ( $D_{\text{H}_2, \text{x}}$ ) ist höher als der anderer Gase
  - Grund: H ist das kleinste existierende Atom;  $\text{H}_2$  das kleinste Molekül
- Das Gefüge von wasserstoffdichten Materialien muss sehr dicht sein
  - Hochlegierte und feinkörnige Metalle
  - Polymere mit einer hohen Dichte (bspw. PE, PTFE)



Quelle: Diffusion in Solids, IE-114 Materials Science and General Chemistry, Lecture 5, Çankaya University

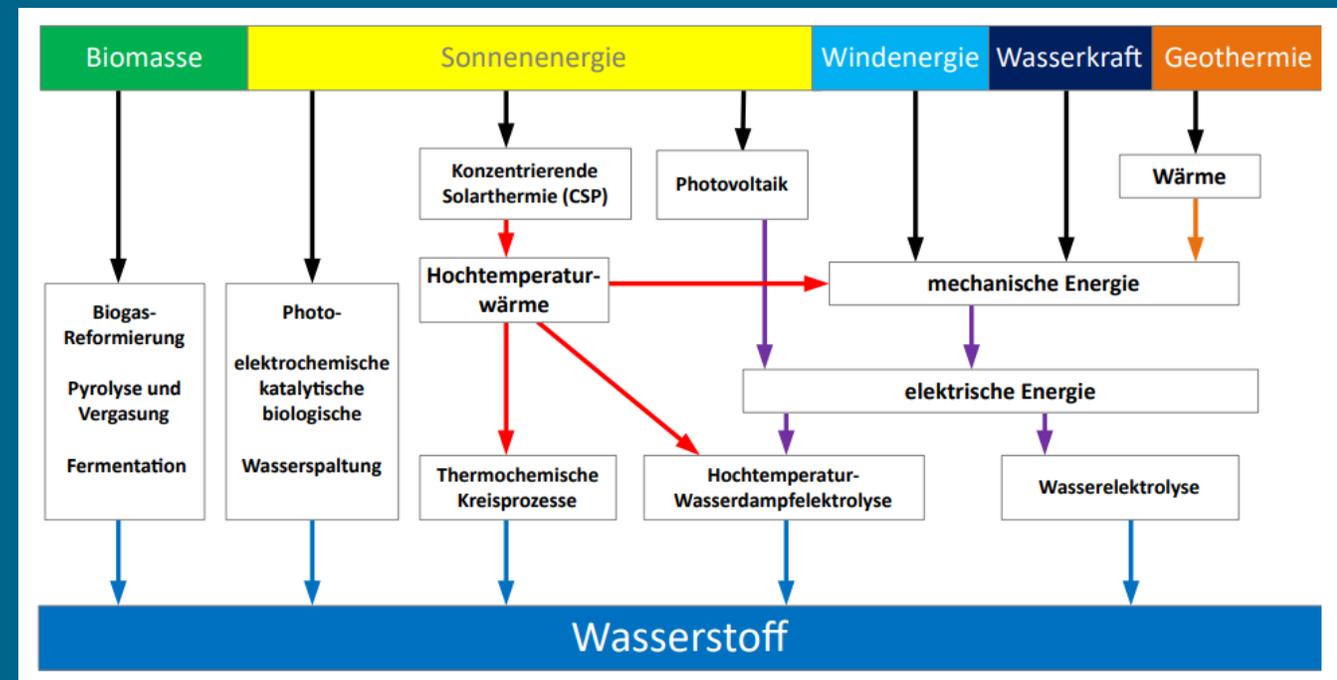
z. Vergl.:  $d_{\text{H}_2} = 0,276 \text{ nm}$      $D_{\text{H}_2, \text{air}} = 0,6 \text{ cm}^2/\text{s}$   
 $d_{\text{C}_2\text{H}_4} = 0,324 \text{ nm}$      $D_{\text{C}_2\text{H}_4, \text{air}} = 0,16 \text{ cm}^2/\text{s}$

# Was ist grüner Wasserstoff?

- Ausgangsstoff: Wasser oder Biomasse
- CO<sub>2</sub>-neutral
- Nachhaltig, wenn Energiequelle nachhaltig bzw. regenerativ ist

Ausgangsstoff und Energiequelle	Verfahren der Wasserstoffherstellung	Nebenprodukt des Verfahrens	Bezeichnung des Wasserstoffs	
Wasser	+ E	Elektrolyse mit Atomstrom	Sauerstoff	Pinker Wasserstoff
	+ E	Elektrolyse mit Strommix	Sauerstoff	Gelber Wasserstoff
	+ EE	Elektrolyse	Sauerstoff	Grüner Wasserstoff
		Thermolyse	Sauerstoff	Grüner Wasserstoff
		Photolyse	Sauerstoff	Grüner Wasserstoff
Biomasse	Fest	Gasifizierung	CO <sub>2</sub>	Grüner Wasserstoff**
	Gasf.	Reformierung*	CO <sub>2</sub>	Grüner Wasserstoff**
Erdgas / Methan	Pyrolyse	Fester Kohlenstoff	Türkiser Wasserstoff	
		CO <sub>2</sub> (mit CCS)	Blauer Wasserstoff	
Kohle	Reformierung*	CO <sub>2</sub>	Grauer Wasserstoff	
		CO <sub>2</sub>	Schwarzer Wasserstoff	

\* Dampfreformierung / autotherme Reformierung    \*\* Mit Einschränkungen, siehe Tz. 31    [gestrichelt] Noch nicht im industriellen Maßstab verfügbar  
E = Energie    EE = Erneuerbare Energie    CCS = Carbon Capture and Storage (Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub>)



Quelle: Stellungnahme SRU „Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse“, Juni 2021

Quelle: DLR-Bericht „Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende. Teil 1: Technologien und Perspektiven für eine nachhaltige und ökonomische Wasserstoffversorgung“, 2020, ROEB et. al

# Warum grüner Wasserstoff?

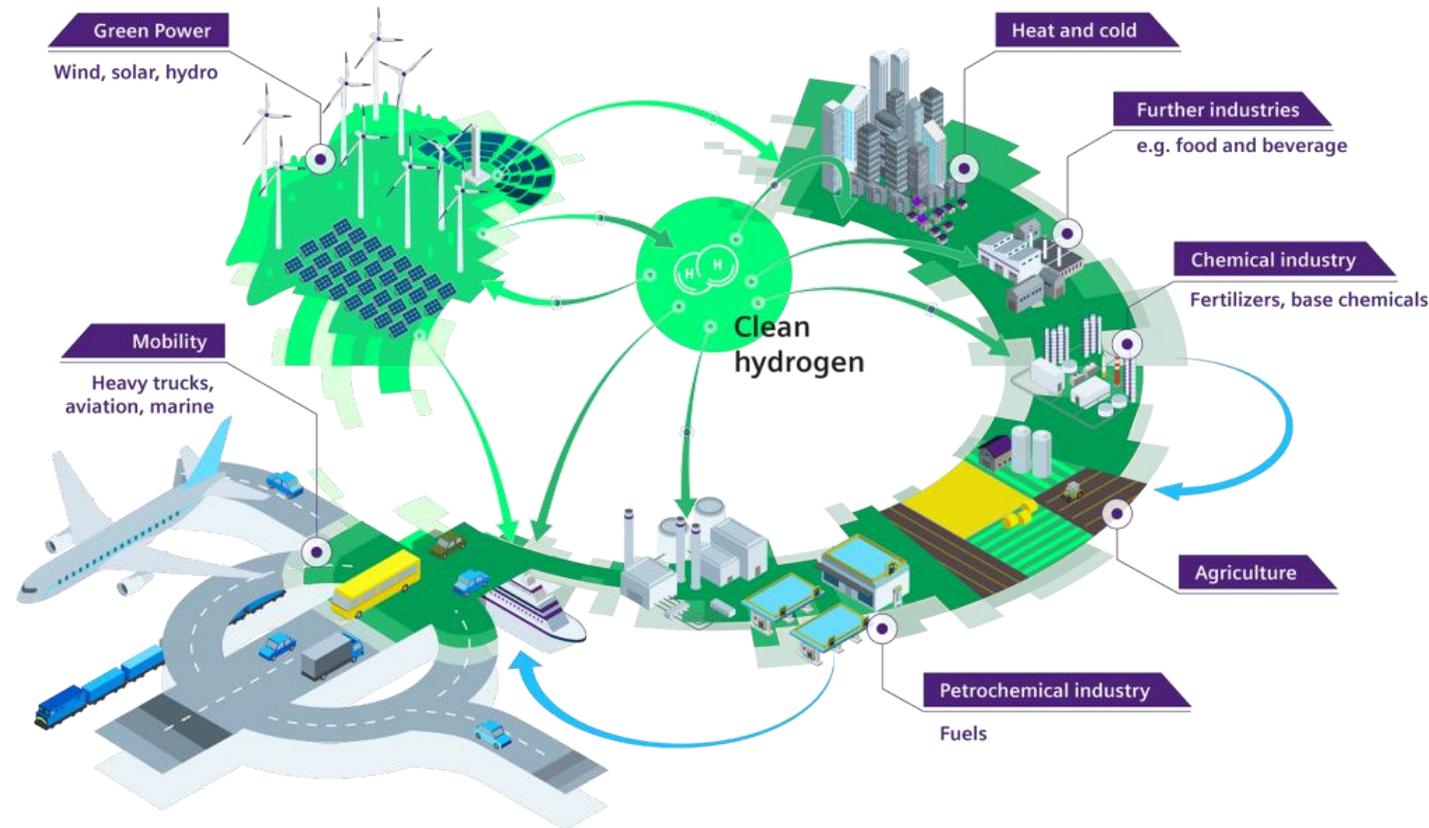


- H<sub>2</sub> spielt **als Energieträger physikalisch eine wichtige Rolle** auf der Erde und im Universum, er ist
  - ein wichtiger atomarer Baustein in traditionellen Energieträgern (Kohlenwasserstoffe)
  - ein wichtiges Medium in der chemischen Industrie
  - das Initialelement der Atomfusion (Reaktoren/Sterne)
- H<sub>2</sub> ist das **Schlüsselmedium für Sektorenkopplung und Kreislaufwirtschaft** durch vielfältige Einsatzmöglichkeiten, bspw.
  - als Energiespeicher (Power-to-X)
  - für CO<sub>2</sub>-freie Verbrennungsprozesse (Mobilität, Kraftwerke, Industrie und Gebäudesektor)
  - zur Stromerzeugung durch Brennstoffzellen (für Mobilität, Industrie und Gebäude)
  - in der Chemische Industrie (E-fuels, Chemikalien z.B. für Pharmazie und Landwirtschaft)

# Warum grüner Wasserstoff?

## Wasserstoff-Kreislaufwirtschaft

- Eine Kreislaufwirtschaft ist ein (größtenteils) **geschlossenes System** mit einem maximalen Anteil an **Wiederverwendung von Energieträgern** und einem minimalen Anteil an Abfallprodukten
- Als Hauptenergieträger bietet sich besonders **grüner Wasserstoff** an, da er vielfältig genutzt werden kann



Quelle: Siemens Energy <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:6c260c70-7531-4750-a0f7-a335154be981/width:1125/quality:high/sector-coupling.png>

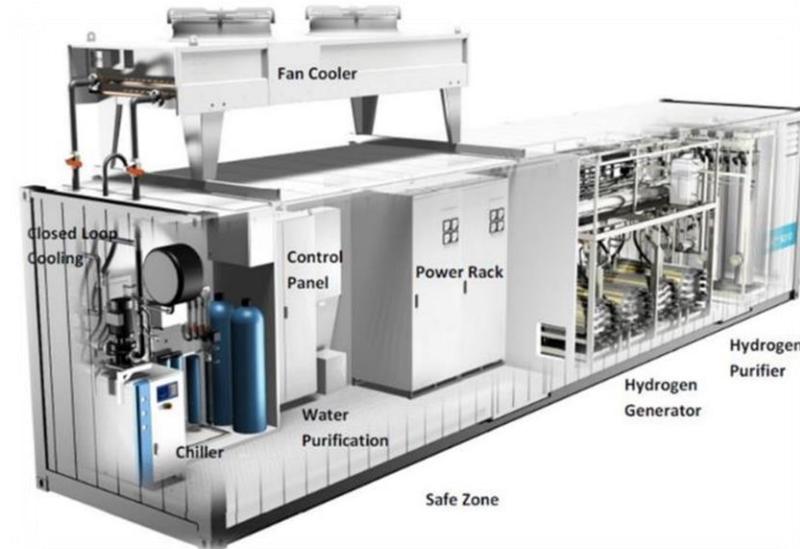
# Warum grüner Wasserstoff?

## Power-to-X

- Ziel: Speicherung von überschüssiger Energie und Nutzung nach Bedarf
- Grund: Nachhaltigkeit & Sektorkopplung → **Schlüsseltechnologien für Kreislaufwirtschaft**
- Wie: Wandlung von bspw. elektrischer Energie zu anderen Energieformen wie thermischer, chemischer, kinetischer oder potentieller Energie
- Wichtigster Vorteil ggü. Batterien: Langfristige Speicherung (saisonal) möglich

## Power-to-Gas

- Notwendige Technologie: Elektrolyse
- Quellen erneuerbarer Energien: Wind, Wasser, Solar
- **Hauptprodukt: grüner Wasserstoff**
- Nutzung in den Sektoren Strom, Mobilität & chemische Industrie
- Weitere mögliche Produktgase: Methan

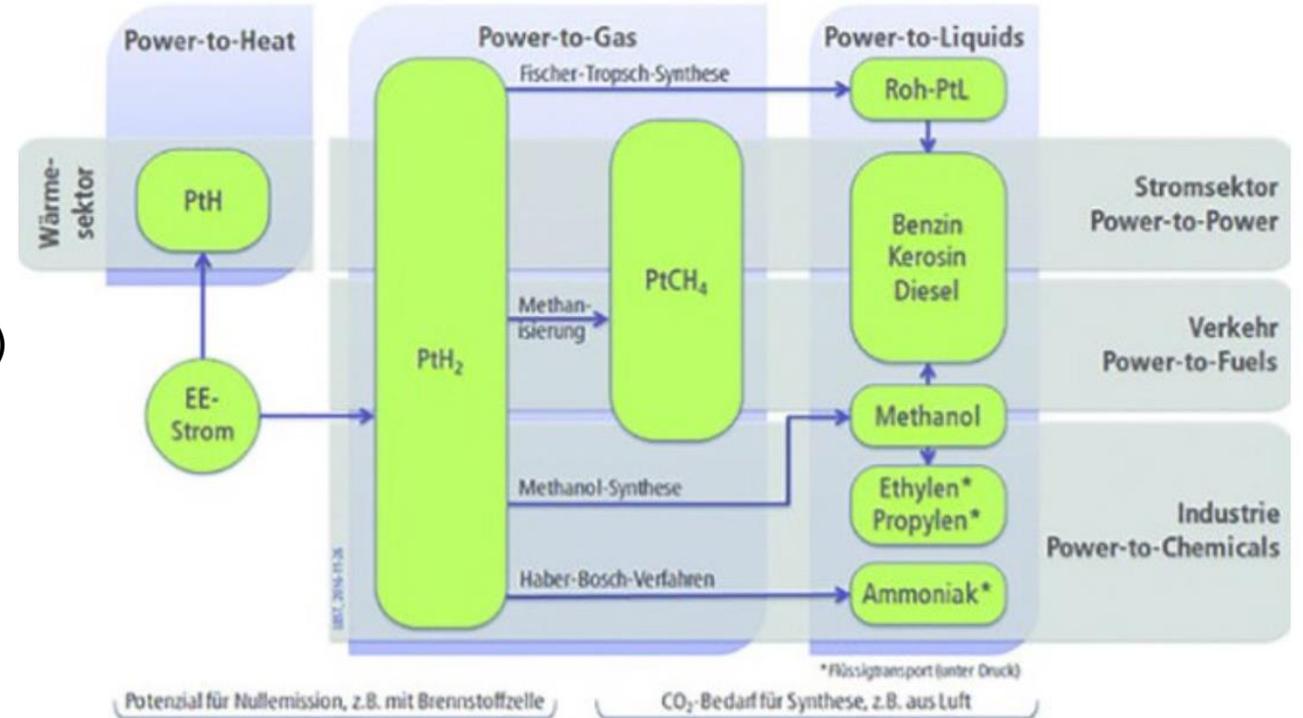


Elektrolyseanlage, Quelle: Hydrogenics

# Warum grüner Wasserstoff?

## Power-to-Liquid

- Notwendige Technologie: Elektrolyse + nachgeschalteter Prozess wie:
  - Fischer-Tropsch (z.B. klassische E-fuels)
  - Haber-Bosch (Ammoniak)
  - Methanol-synthese
- Produkte: **grüne Kohlenwasserstoffe** (wenn Verfahren mit Erneuerbaren)
- Nutzung in den Sektoren Mobilität und chemische Industrie

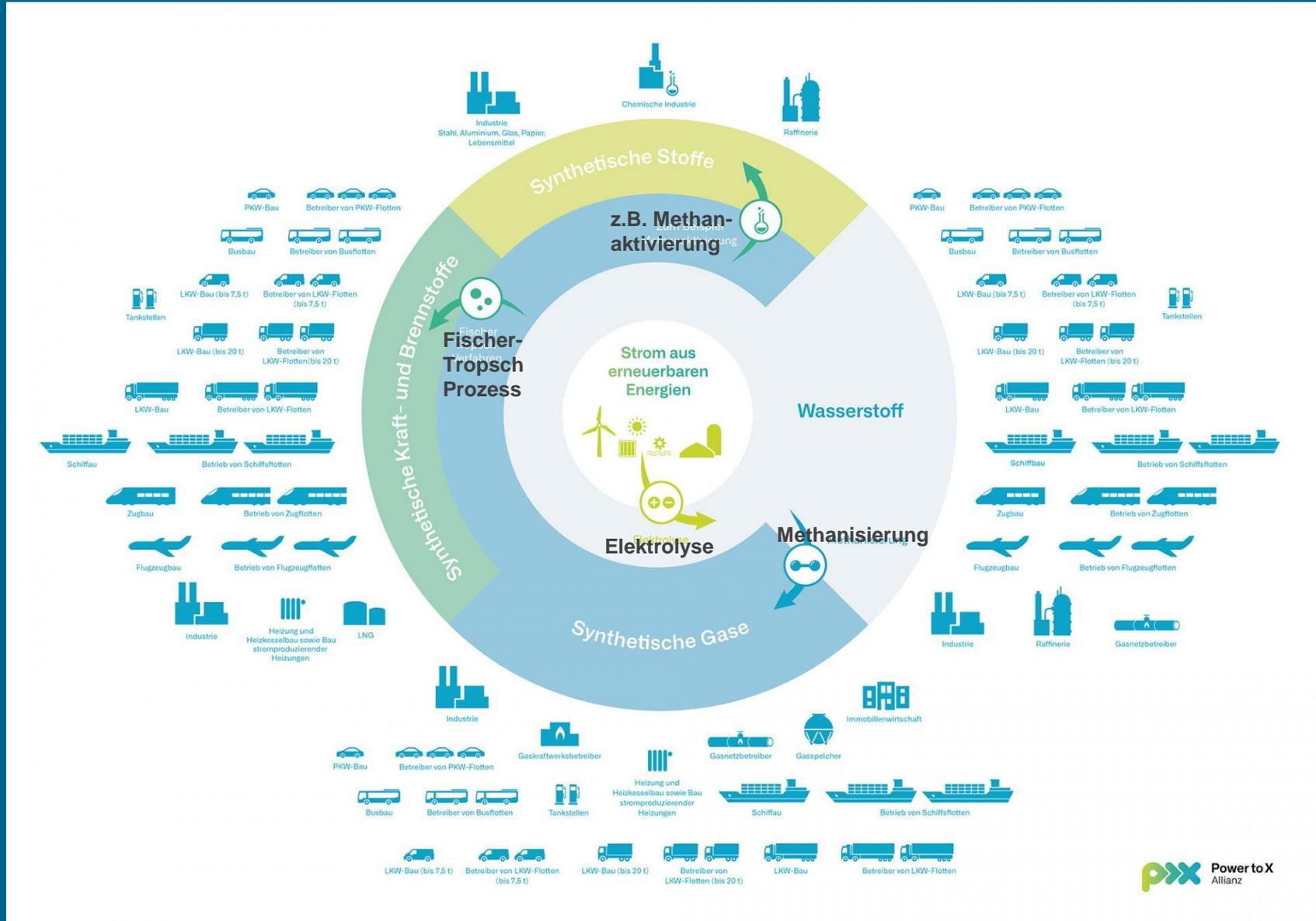


Quelle: „Power-to-X (PtX) Begriffstaxonomie und Schlüsselverfahren“. Abb. 16.1 aus: [Wasserstoff – Schlüsselement von Power-to-X](#), Springer 2017

## Power-to-Heat

- Nutzung elektrischer Energie oder Solarenergie für Wärmeerzeugung

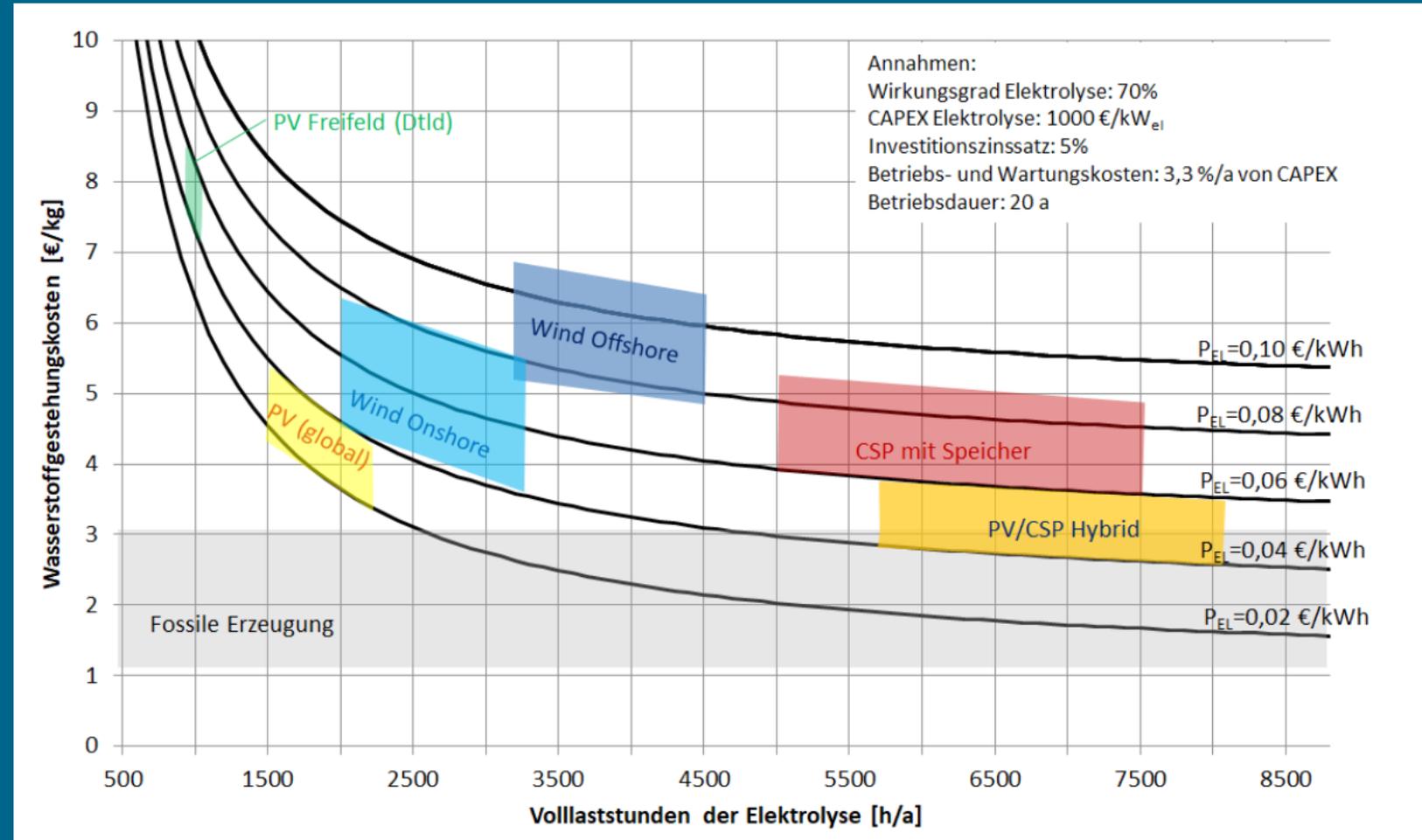
# PtX Anwendungen



# Kostenprognose

## Was kostet grüner Wasserstoff?

- Best case: <math><3\text{€}/\text{kg}</math>
- Tendenz der Kosten von grauem Wasserstoff: steigend
- Konkurrenzfähigkeit als Frage der Zeit



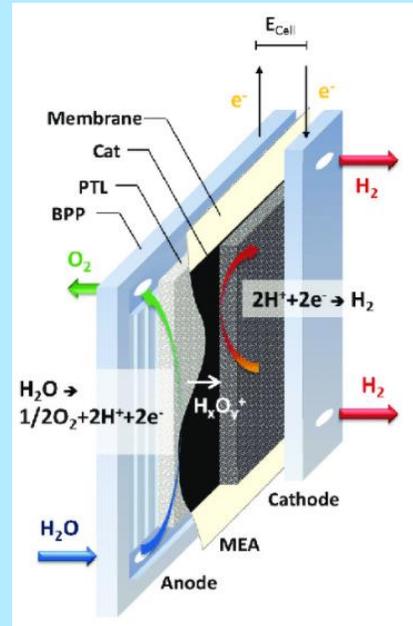
Quelle: DLR-Bericht „Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende. Teil 1: Technologien und Perspektiven für eine nachhaltige und ökonomische Wasserstoffversorgung“, 2020, ROEB et. al

# Übersicht der Wasserstofftechnologien

## Produktion von H<sub>2</sub>

Schema eines PEMEL stacks, Quelle DLR

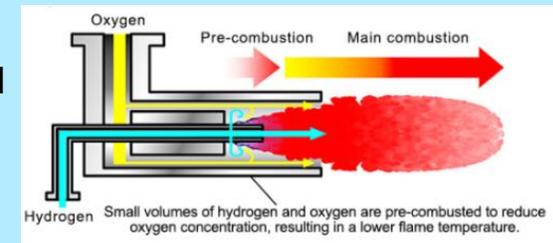
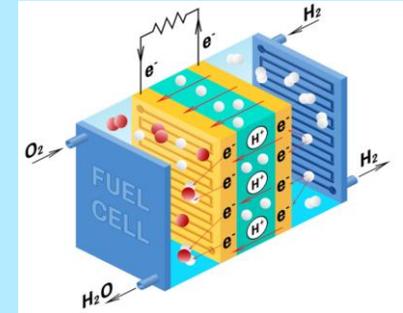
- Alkalische Elektrolyse (AEL)
  - Älteste und günstigste EL-Technologie,  $\eta_{\text{system}}$  bis zu 80%
- Polymer Electrolyt Membran Elektrolyse (PEMEL)
  - Dynamischer Betrieb möglich,  $\eta_{\text{system}}$  bis zu 80%
- Feststoffoxid Elektrolyse (SOEL) / Hochtemperaturelektrolyse (HTEL)
  - Potentiell hohes  $\eta_{\text{system}}$  in Kombination mit Prozesswärme, sehr neue Technologie,  $T_{\text{oper}} > 700^\circ\text{C}$
- Verflüssiger
  - $\eta_{\text{carnot}}$  21-27%, teure und komplexe Technologie, klassischerweise wird der sogenannte Claude-Cycle verwendet, verschiedene Prozessarten möglich, wenig kommerzielle Hersteller



## Nutzung von H<sub>2</sub>

Schema eines PEMFC stacks, Quelle Airbus/ElringKlinger

- Brennstoffzelle - Fuel cell (FC)
  - Polymer Elektrolyt Membran (PEM),  $\eta_{\text{system}}$  bis zu 60%, Mobilitätsanwendungen
  - Solid Oxid FC Technologie mit  $T_{\text{oper}} > 700^\circ\text{C}$  und  $\eta_{\text{el}} > 60\%$ , niedrige TR Level
- H<sub>2</sub> Brenner für Gasturbinen
  - Mittlere bis hohe TRL,  $\eta_{\text{el}}$  bis zu 50%
  - Kleine Lösungen: Mikrogasturbinen für Strom- und Wärmeerzeugung von Gebäudekomplexen
  - Große Lösungen: Für zentrale Anlagen, Pilotprojekte laufen
  - Hybride Lösung SOFC-GT bringt  $\eta_{\text{el}}$  auf bis zu 80%
- H<sub>2</sub> für E-fuel Produktion
  - PtL-Anlagen z.B. für Methanol
- Weitere mit mittlerem TRL
  - H<sub>2</sub> Flugturbinen
  - H<sub>2</sub> Motoren

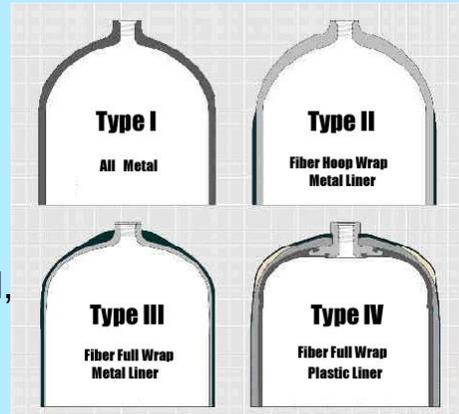


Schema eines H<sub>2</sub> Brenners, Quelle Toyota

# Übersicht der Wasserstofftechnologien

## Lagerung von H<sub>2</sub>

- Behälter für Hochdruck-H<sub>2</sub>
  - **Typ 1:** Vollmetall, bis zu 800bar, hohes Gewicht, Standard für Industrieanwendungen
  - **Typ 2:** Metall mit Glasfasermantel, bis zu 1000bar, Standard für H<sub>2</sub>-Tankstellen
  - **Typ 3:** Komplett GFK/CFK mit Metall-Liner, bis zu 700bar, Gewichtsoptimiert, Standard für mobile Anwendungen (KFZ)
  - **Typ 4:** Komplett GFK/CFK mit Polymer Liner, bis zu 700bar, niedrigstes Gewicht, neuer Standard für mobile Anwendungen
  - **Typ 5 Neuentwicklung:** Komplette GFK/CFK Lösung ohne Liner
- Tanks für Flüssigwasserstoff vakuumisoliert
  - Multi-layer Isolierung oder Glas-bubble Füllung des Vakuumsraums
  - Verdampfungsrate < 1 %/Tag



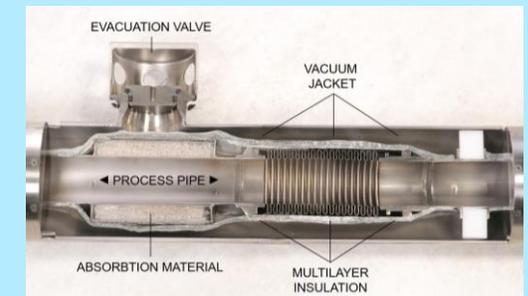
## Transport von H<sub>2</sub>

- Trailer
  - Hochdruck H<sub>2</sub> Logistik via "Tube trailer" bis zu 500bar und 1,1t Kapazität
  - Flüssig H<sub>2</sub> Logistik via Vakuumisoliertem Tanktrailer, bis zu 5t Kapazität
- Wasserstoff Pipelines
  - Nutzung von alten Gaspipelines teils möglich
  - Long-distance Transport mit großen Nennweiten (DN1000) und bei 85bar
  - Örtliche Verteilung (Städte) bei 20-30bar
- LH<sub>2</sub>-Leitungen, Multi-layer Vakuumisoliert
  - Starre Leitungen
  - Flexible Leitungen

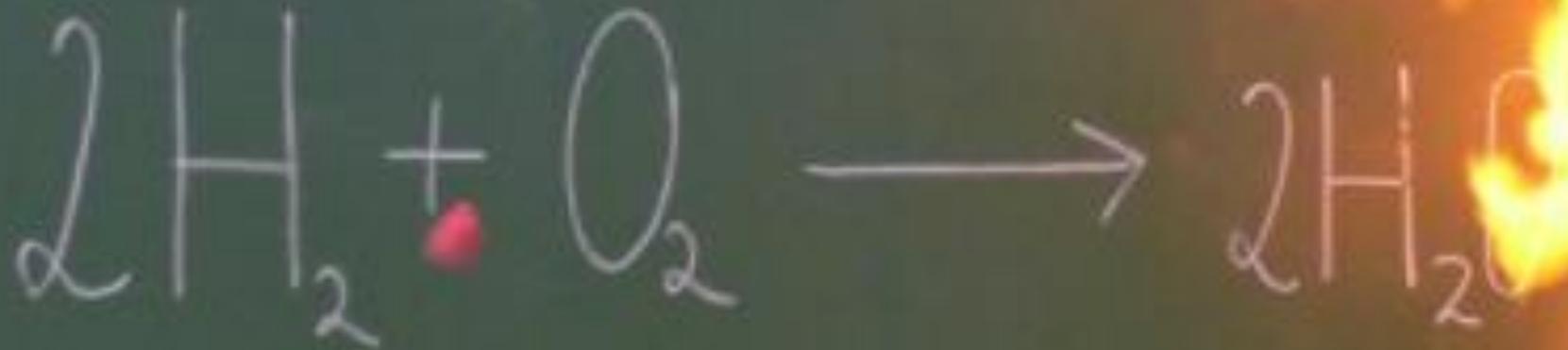
500bar H<sub>2</sub> Trailer von Linde



Quelle: [www.tuev-nord.de](http://www.tuev-nord.de)



Schema eines Vakuumrohres, Quelle: [www.schwanner.com](http://www.schwanner.com)



# WASSERSTOFF-SICHERHEIT

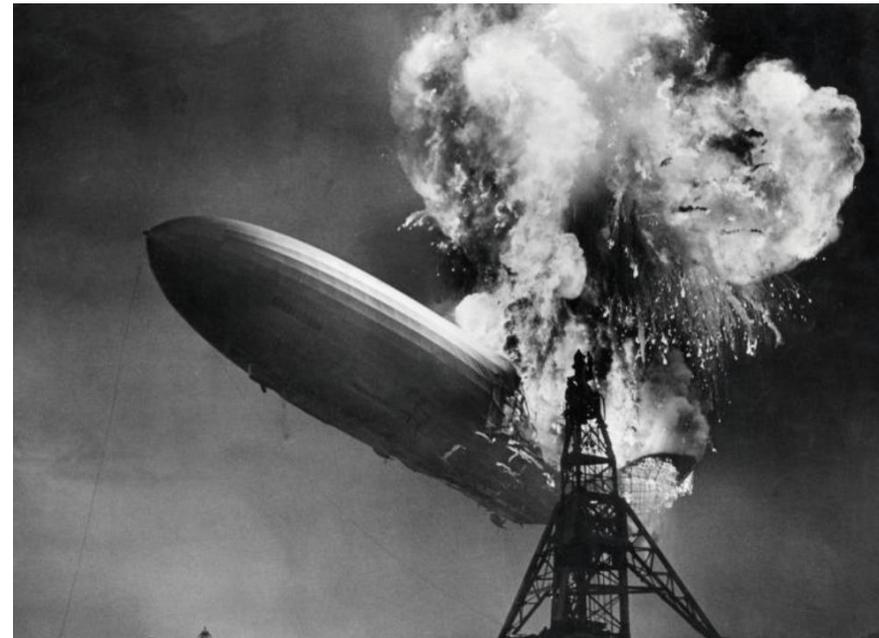
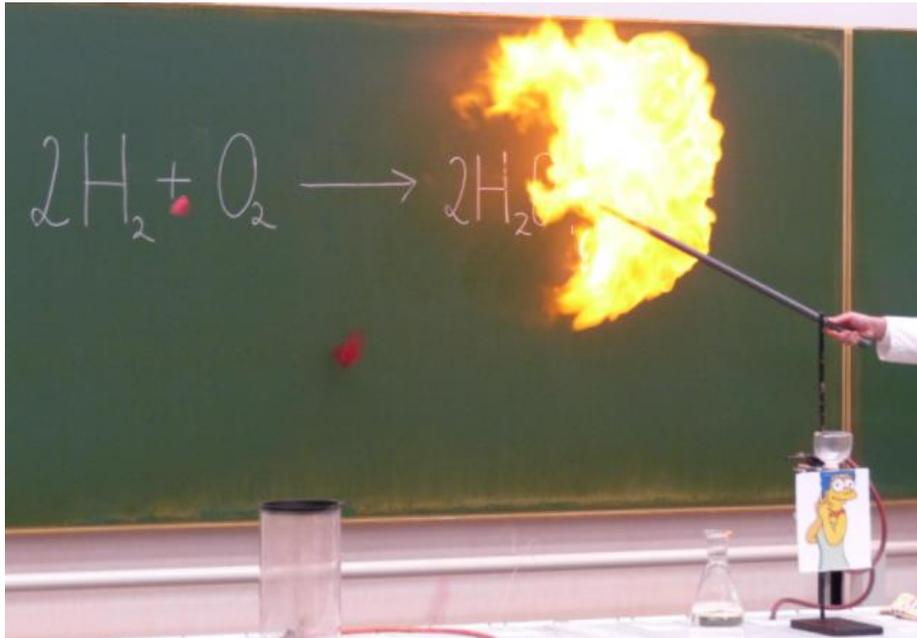
# Gefährlichkeit von Wasserstoff

## Öffentliche Wahrnehmung

Wenn man Menschen nach Sicherheit von Wasserstoff fragt, erwähnen diese

1. **Knallgasexperimente in der Schule**
2. **Die Hindenburg Katastrophe**

→ Bedenken gegen den Einsatz von Wasserstoff im Alltag der Menschen



Knallgasexperiment in der Schule (links) und Hindenburg Katastrophe (rechts)

# Gefährlichkeit von Wasserstoff

## Öffentliche Wahrnehmung

Beispielhafte, teils bekannt gewordene Unfälle mit Wasserstoff (ein Auszug):

- 1984 Explosion eines Industriegebäudes mit 2 Toten wegen 5kg Wasserstoff
- 2001 Unfall eines GH2 Trailers bei Köln, die Ventile von 3 von 9 Flaschen waren undicht und gerieten in Brand, Feuerwehrgroßeinsatz
- 2009 Unfall eines GH2 Trailers bei Olpe, leicht verletzter Fahrer, Feuerwehrgroßeinsatz
- 2010 Unfall eines Brennstoffzellenfahrzeuges von GM in Washington, Totalschaden aber kein Austritt von Wasserstoff
- 2019 Explosion/Verpuffung an einer H2 Tankstelle von NEL ASA in Norwegen aufgrund eines Montagefehlers, Sachschaden, 2 Personen leicht verletzt → Fazit der Verantwortlichen war das Einführen von Sicherheitsstandards in Abläufen wie in der Luftfahrt (Dokumentationen und Mehrfachkontrollen)



1984 Explosion eines Industriegebäudes



Umgekippter GH2 Trailer



2009 Brennender GH2 Trailer bei Olpe A4

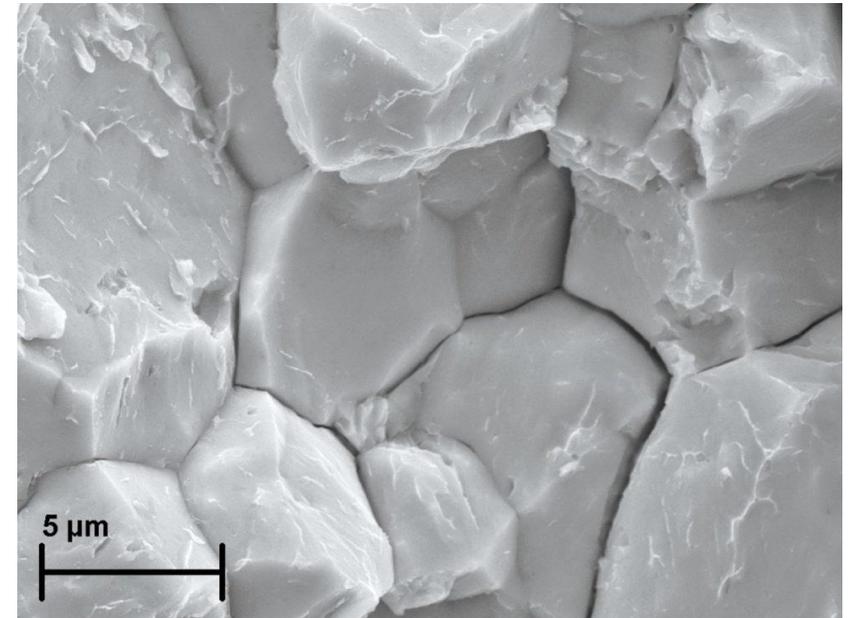
ABER: Wie viele Unfälle gibt es mit bspw. Benzin und wie sind im Vergleich die Auswirkungen?

## Diffusion

- $H_2$  ist das kleinste existierende Molekül, bzw. H das kleinste Atom  
→ **Probleme mit Leckagen aber auch Materialien ( $H_2$ -Versprödung)**

## Wasserstoffversprödung

- Änderung der Sprödigkeit, die durch das **Eindringen und die Einlagerung von Wasserstoff** in das Material (bspw. Stahl) verursacht wird.
- Es existieren verschiedene **Schädigungsmechanismen** (bspw. *Drucktheorie, Wasserstoffinduzierte Dekohäsion*), die meist in Kombination auftreten
  - Besonders kritisch: schnelle und häufige Lastwechsel → Wasserstoff wird aus Gefüge herausgerissen und nimmt Material mit



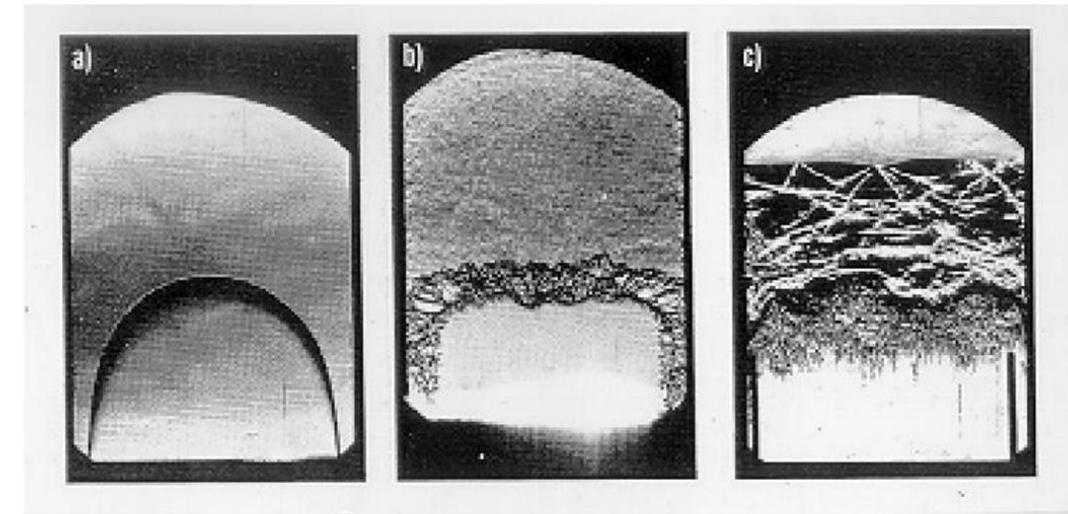
REM Aufnahme einer Bruchfläche nach durch Wasserstoffversprödung verursachten Versagens  
Quelle: Fraunhofer IWM

# Sicherheitsrelevante Eigenschaften von Wasserstoff

## Definition Flamme und Explosion

1. Wenn Wasserstoff aus einer Düse oder einer anderen Öffnung **austritt und sofort verbrennt, liegt keine Explosion vor sondern eine Flamme**, weil es keine vorherige Durchmischung gegeben hat.
2. Eine **Explosion** ist als eine nach der Zündung sich von selbst ausbreitende Verbrennung, **begleitet von einer Druckwelle** definiert. Insbesondere vorgemischte H<sub>2</sub> /Luft-Systeme können nach der Zündung schnelle Flammen mit entsprechend hohen Druckwirkungen erzeugen.
  - „Langsame“ Explosionen nennt man turbulente Deflagration oder „Verpuffung“
  - „Schnelle“ Explosionen sind Detonationen

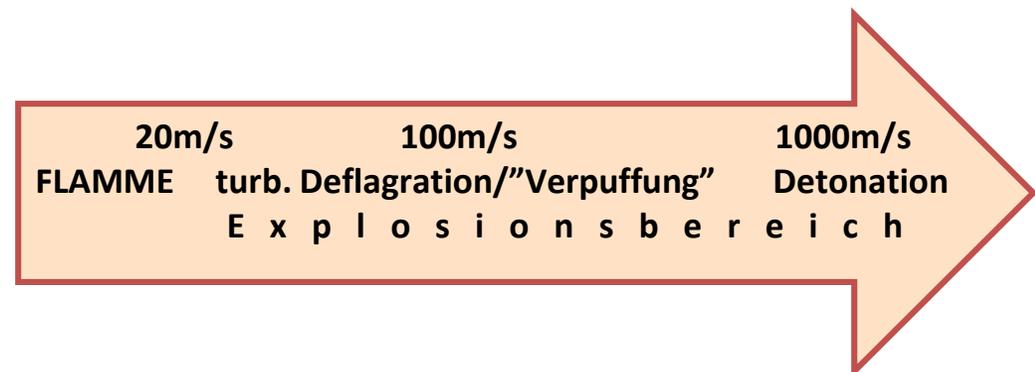
Quelle: Dr.-Ing. Thomas Jordan, Verbrennungsregimes von H<sub>2</sub> an Luft, Fachmeeting Wasserstoffsicherheit 10/2009



Laminare Flamme  
 $v \approx 1\text{m/s}$ ,  $Ma \ll 1$

Turbulente Flamme  
 $v \approx 300\text{ m/s}$ ,  $Ma \approx 1$

(Quasi-) Detonation  
 $v > 1000\text{ m/s}$ ,  $Ma > 1$



# Sicherheitsrelevante Eigenschaften von Wasserstoff

## Verbrennungseigenschaften von Wasserstoff

- Fahle Flamme, im hellen Tageslicht **kaum sichtbar**
- Verbrennungstemperatur ( $T_{\text{Flamme}}$ ):
  - in Relation zu Flammen flüssiger Kohlenwasserstoffe wie Benzin gering, denn die **Flamme emittiert mehr UV-Licht als Wärmestrahlung** (Infrarot)
- Selbstzündtemperatur ( $T_{\text{Zündung}}$ )
  - In Relation zu anderen brennbaren Flüssigkeiten wie Benzin **höher**
- Flammgeschwindigkeit ( $v_{\text{Flamme}}$ )
  - In Relation zu Flammen anderer Kohlwasserstoffe (z.B. Benzin Methan) um **ein vielfaches höher**
- Flammrichtung: oben

Nachteil/Gefahr  
Einsatz von IR Kamera notwendig

Vorteil  
Weniger Sekundärbrände

Vorteil  
Weniger Selbstzündung

Vorteil oder Gefahr  
schnelles Abbrennen kann positiv sein, in geschlossenen Räumen kann es nachteilig sein

Vorteil  
Weniger Sekundär- und Flächenbrände



Wasserstoffflamme

z. Vergl.:	$T_{\text{Flamme(H2-Luft)}} = 2045 \text{ }^\circ\text{C}$	$v_{\text{Flamme,max,H2}} = 3,46 \text{ m/s}$	$T_{\text{Zündung,H2}} = 585 \text{ }^\circ\text{C}$
	$T_{\text{Flamme(Benzin-Luft)}} = 2197 \text{ }^\circ\text{C}$	$v_{\text{Flamme,max,Benzin}} = 0,5 \text{ m/s}$	$T_{\text{Zündung,Benzin}} = 220-460 \text{ }^\circ\text{C}$

## Zünd- bzw. Explosionsgrenzen von Wasserstoff

- **Bereich der Konzentration** (Stoffmengenanteil) eines brennbaren Stoffes in einem Gemisch von Gasen und Dämpfen, in dem sich nach dem Zünden eine von der Zündquelle unabhängige **Flamme selbstständig fortpflanzen/erhalten** kann.
- Die untere Explosionsgrenze (UEG) markiert den „zu mageren“ Bereich (zu wenig Brennstoff), die obere Explosionsgrenze (OEG) markiert den „zu fetten“ Bereich (zu wenig Oxidator)
  - Der **zündbare Bereich** von Wasserstoff ist mit **4-77 Mol%** außergewöhnlich weit
    - Dadurch **unterscheidet sich der Flamm- vom Explosionsbereich (18% - 59%) ungewöhnlich stark**
    - Bezeichnung untere/obere Explosionsgrenze UEG/OEG daher irreführend, BESSER: „Zündgrenze“
  - Die **untere Zündgrenze** mit 4 Mol% ist
    - vergleichbar zu denen von Kohlenwasserstoffgasen (z.B.  $UEG_{\text{Methan}} = 4,6 \text{ Mol}\%$ )
    - **höher als Dämpfe von flüssigen Kohlenwasserstoffen** (z.B.  $UEG_{\text{Benzin}} = 1,4 \text{ Mol}\%$ )
  - Die reale untere **Explosionsgrenze ist mit 18Mol% ein vielfaches höher als bei  $C_xH_y$**
  - Die OEG mit 77 Mol% ist extrem hoch (z. Vgl.  $UEG_{\text{methan}} = 15 \text{ Mol}\%$ ,  $OEG_{\text{Benzin}} = 7 \text{ Mol}\%$ )

$$UEG_{\text{ISA,H}_2,\text{Flamme}} = 4 \text{ Mol}\% \quad UEG_{\text{ISA,H}_2,\text{Expl.}} = 18 \text{ Mol}\% \quad OEG_{\text{ISA,H}_2,\text{Expl.}} = 59 \text{ Mol}\% \quad OEG_{\text{ISA,H}_2,\text{Flamme}} = 77 \text{ Mol}\%$$

# Experimente



Wasserstoffflamme nach Leckage (links) und Benzinflamme nach Leckage (rechts); Quelle: VDI Nachrichten 24.10.2003



Wasserstoffflamme (links) und Benzinflammen (rechts) je durch angebohrten Tank

# Sicherheitsrelevante Eigenschaften von Wasserstoff



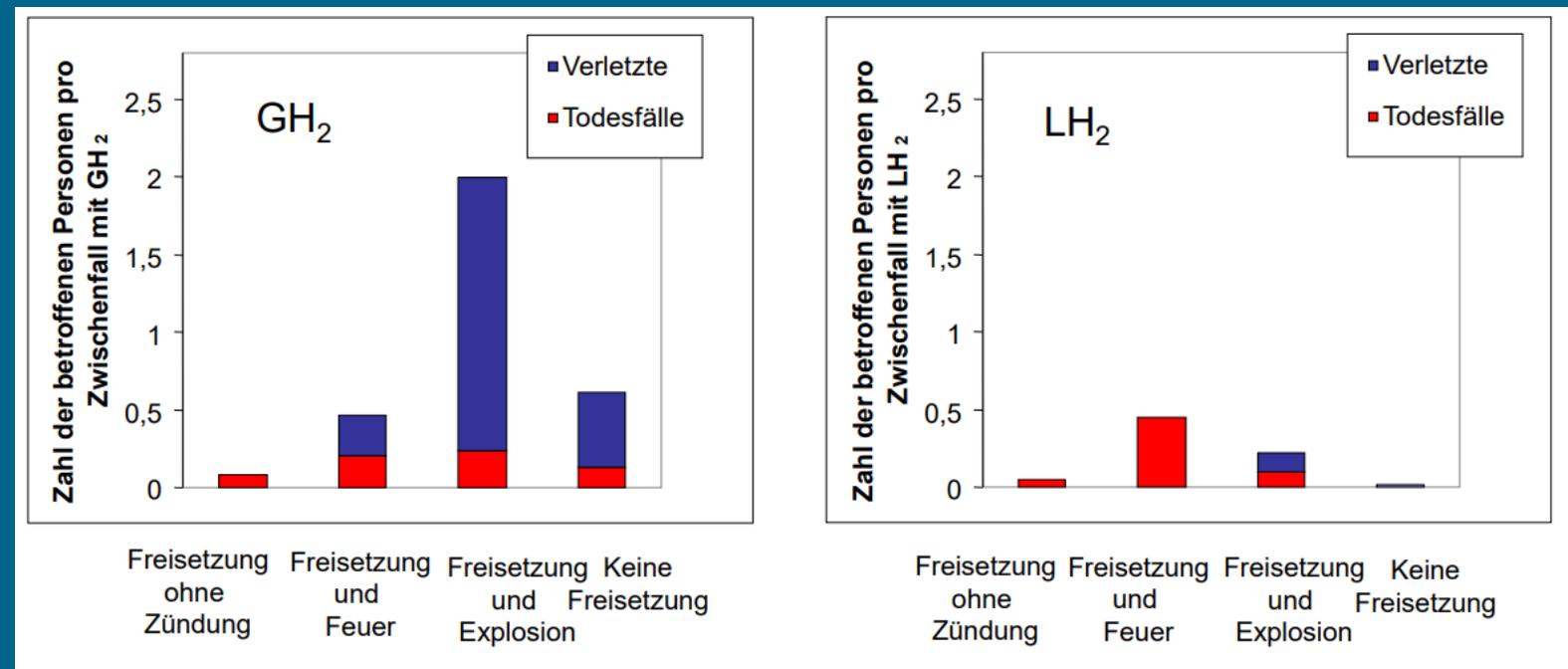
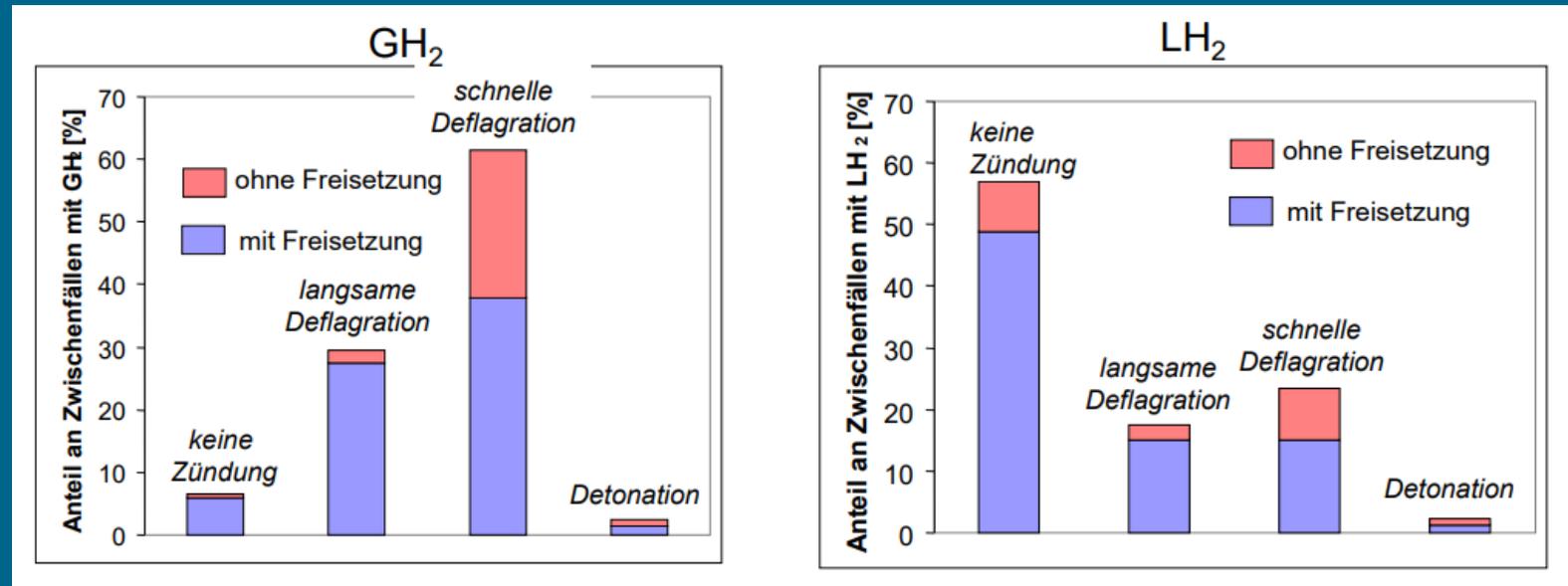
## Gefahren von Wasserstoff flüssig und gasförmig

- Sachschaden durch Brand und Explosion
- Personenschäden
  - Verbrennungen durch Feuer/Explosion
  - Erstickung durch Einatmen hoher Konzentration von  $\text{GH}_2$  oder verdampften  $\text{LH}_2$ s
  - Vereisungen nach Direktkontakt mit  $\text{LH}_2$  ( $-253^\circ\text{C}$ )

## Statistik

- **Zwischenfälle mit  $\text{GH}_2$  führen überwiegend zur Zündung und schnellen Deflagrationen (Verpuffungen)**
- Zwischenfälle mit  **$\text{LH}_2$  zünden wesentlich seltener** als solche mit  $\text{GH}_2$
- wesentlich **weniger Verletzte durch Unfälle mit  $\text{LH}_2$**  als mit  $\text{GH}_2$  **aber vergleichbare Anzahl an Todesopfern**
- Es treten alle Verbrennungsregimes auf, **Konsequenzen hängen von vielen verschiedenen Einflussparametern ab**

# Unfallstatistik



Quelle: Dr.-Ing. Thomas Jordan, Zwischenfälle mit Wasserstoff, Fachmeeting Wasserstoffsicherheit 10/2008

## Wasserstoffsicherheit ist...

### eine Herausforderung aufgrund

1. Leckagen aufgrund der hohen Diffusivität
2. Schäden durch Materialversagen (Wasserstoffversprödung)
3. Entflammbarkeit über einen weiten Konzentrationsbereich
4. Schlechter Sichtbarkeit von  $H_2$ -Flammen bei Tageslicht

### begünstigt durch

1. Weniger Ansammlung explosiver  $H_2$ -Luft Gemische aufgrund der hohen Flüchtigkeit von  $H_2$
2. Geringe Explosivität nach Leckagen, denn die Konzentration von  $H_2$  muss um ein vielfaches höher sein, als bspw. von Benzindampf oder Methan
3. Die Flammcharakteristik des sehr schnellen und nach oben gerichteten Abbrandes

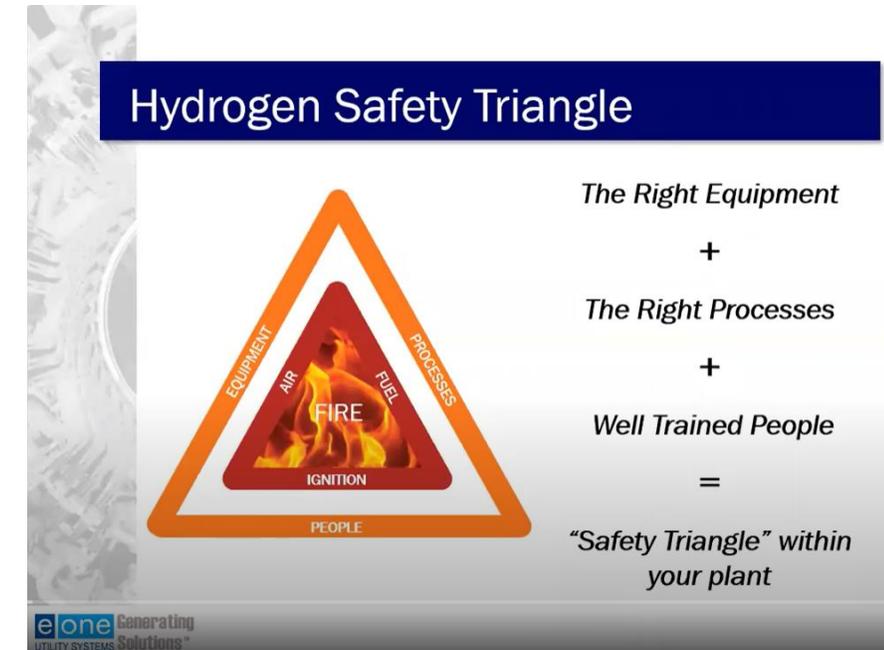
# Maßnahmen gegen Sicherheitsrisiken

## Vorbeugende Maßnahmen

- Geeignete **Materialauswahl** (Vermeidung von Leckagen und Korrosion)
- Striktes Einhalten von **Normen und Regeln** für die Konstruktion (PED-Konformität, AD-2000/ DIN EN 13445 , TRG etc.)
- **Korrekte Konstruktions**prozesse
- **Risikoanalysen** (z.B. HAZOP, FMECA)
- **Überwachung** von Fertigungs- und Abnahmeprozessen
- Korrekte Planung von **Ex-Schutz**-Zonen und -Hardware
- **Sicherheitssysteme** (MSR-System mit auto-Abschaltung, Not-Aus)
- **Sicherheitseinrichtungen** (z.B. Sicherheitsventile)

## Betriebliche Maßnahmen

- Striktes Einhalten von **Normen und Regeln** für den Betrieb (z.B. TRG, StöV)
  - U.a. ordentliche und regelmäßige **Wartungen mit Dokumentation**
  - Einstellen speziell geschulten Personals und reguläre Sicherheitsschulungen
- **Überwachung** (z.B. Gasdetektoren, Video)



Quelle: webinar „Hydrogen Auxiliaries Best Practices for Hydrogen Safety: Generator Gas Dryer (GGD),“

# ZUSAMMENFASSUNG

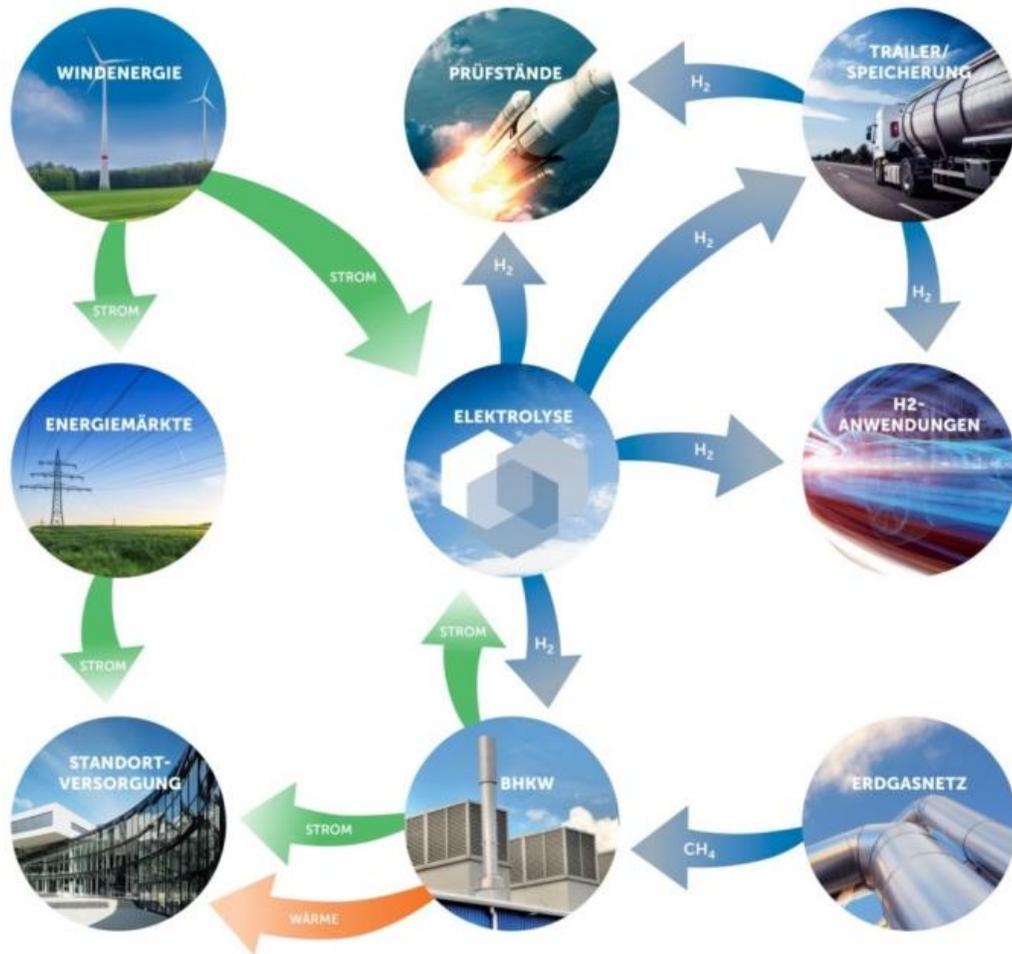
## Grüner Wasserstoff ...

- ... ist ein CO<sub>2</sub>- freier Energieträger
- ... ist Grundstoff für weitere CO<sub>2</sub>-freie Stoffe (E-fuels, Düngemittel,...)
- ... kann in allen Sektoren eingesetzt werden
- ... ist das Schlüsselmedium für eine vollumfängliche Kreislaufwirtschaft

## Wasserstoff-Sicherheit ...

- ... unterscheidet sich wenig von der Sicherheit anderer entzündlicher und explosiver Stoffe
- ... ist gegeben, wenn sicherheitsrelevante Nachteile berücksichtigt werden
  - Bspw. Diffusivität → Materialauswahl
- ... begünstigende Eigenschaften existieren zudem
  - Bspw. Abbrand nach oben und hohe Konzentration für Explosive Mischungen nötig

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



## Kontakt

**Dr.-Ing. Daniela Lindner**

Abteilungsleiterin Angewandte Wasserstofftechnologien

Telefon: 06298 / 28 - 758

E-Mail: [daniela.lindner@dlr.de](mailto:daniela.lindner@dlr.de)