



Energiespeichersysteme

1. Wasserstofftechnologie

- a) Gewinnung von Wasserstoff
- b) Sicherheitsproblematik
- c) Speicherung, Systemlösungen

2. Konventionelle Blockheizkraftwerke - Kraft-Wärme-(Kälte-)Kopplung

3. Grundbegriffe der Brennstoffzellen-Technologie

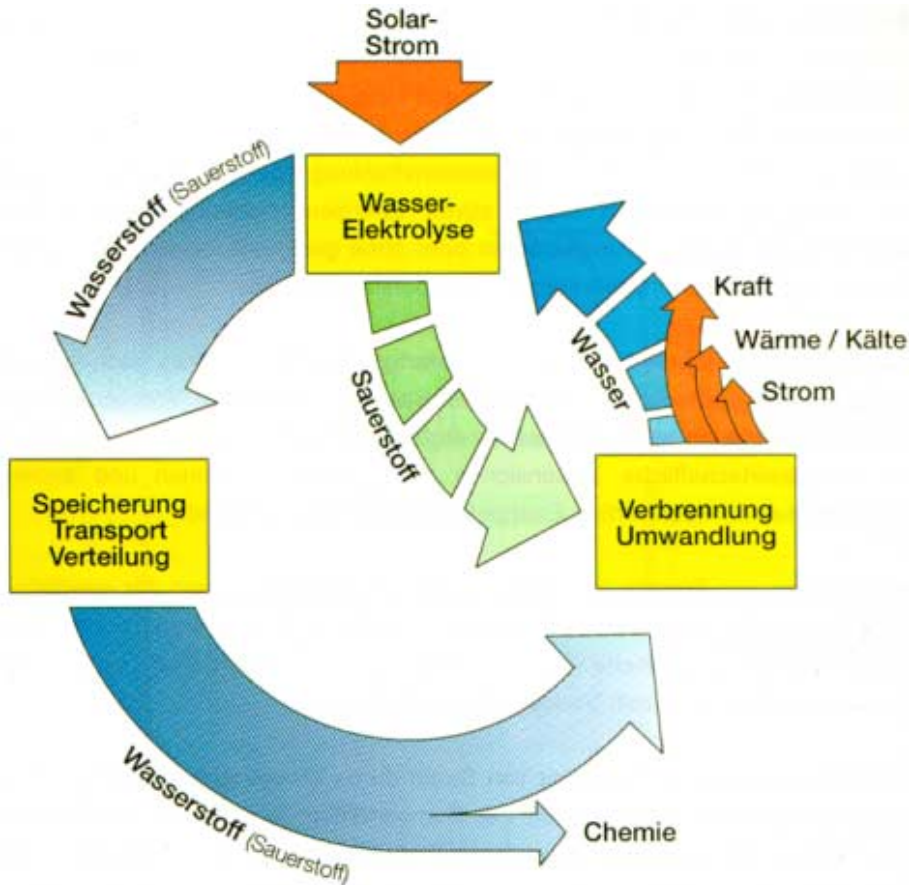
- a) Funktionsprinzip
- b) Brennstoffzellen-“Stacks”
- c) Verschiedene Brennstoffzellentypen
- d) Reformierung (Gasaufbereitung)
- e) Gesamtsysteme

4. Technischer Einsatz von Brennstoffzellensystemen

- a) Mobile Anwendungen
- b) Stationäre Anwendungen



Solarer Wasserstoff

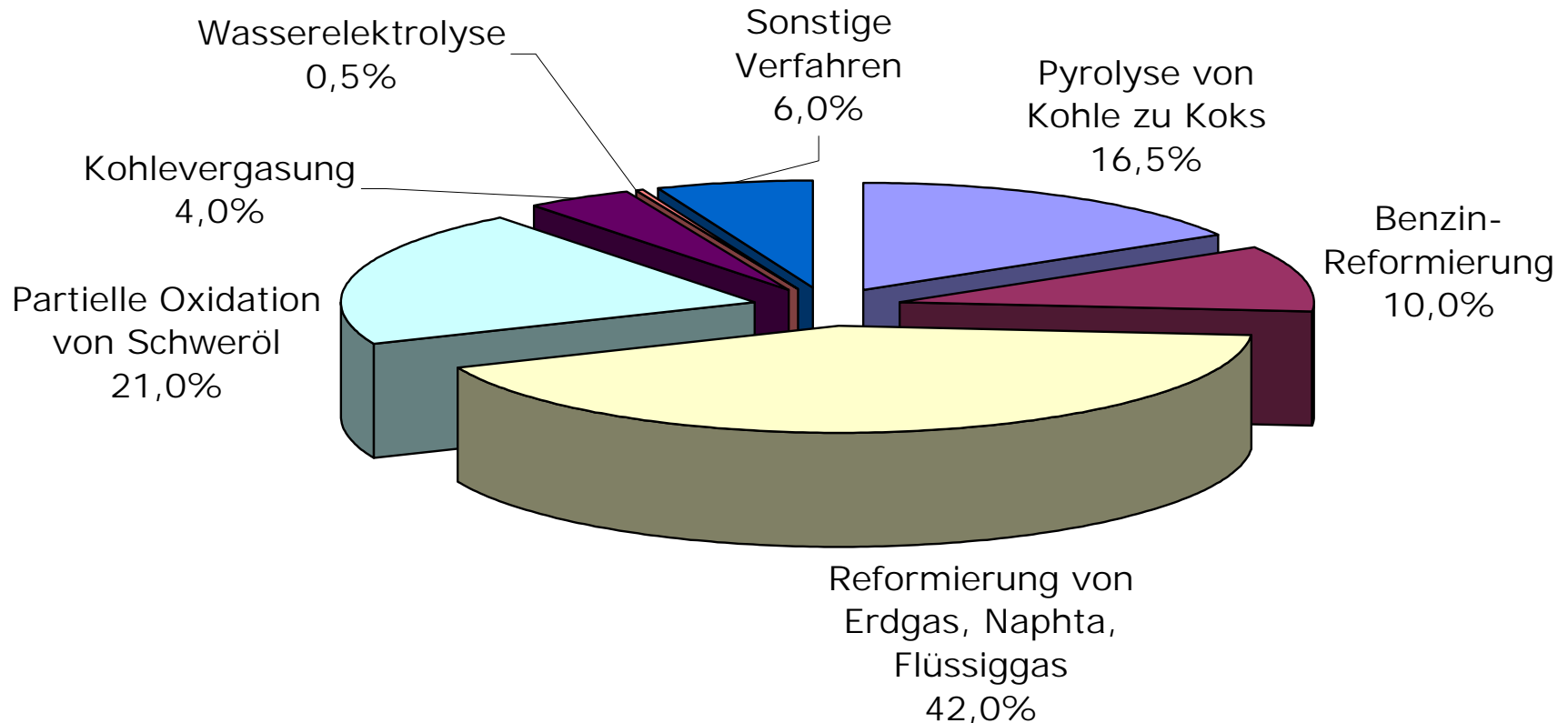


Solar-Wasserstoff-Kreislauf

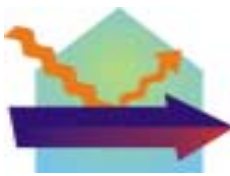
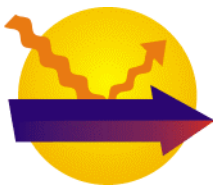
- Durch Elektrolyse kann Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten werden
- Wasserstoff kann gespeichert, transportiert und verteilt werden
- Bei der Verwertung von H_2 schließt sich der Kreis: es entsteht Wasser
- Bei Verbrennung mit Umgebungsluft entstehen NO_x
- Wirtschaftlich und ökologisch ist die Primärenergieerzeugung entscheidend
- Elektrolytisch hergestellter Wasserstoff ist pro Energieeinheit immer teurer als der verbrauchte Strom
- Strom besser direkt verbrauchen



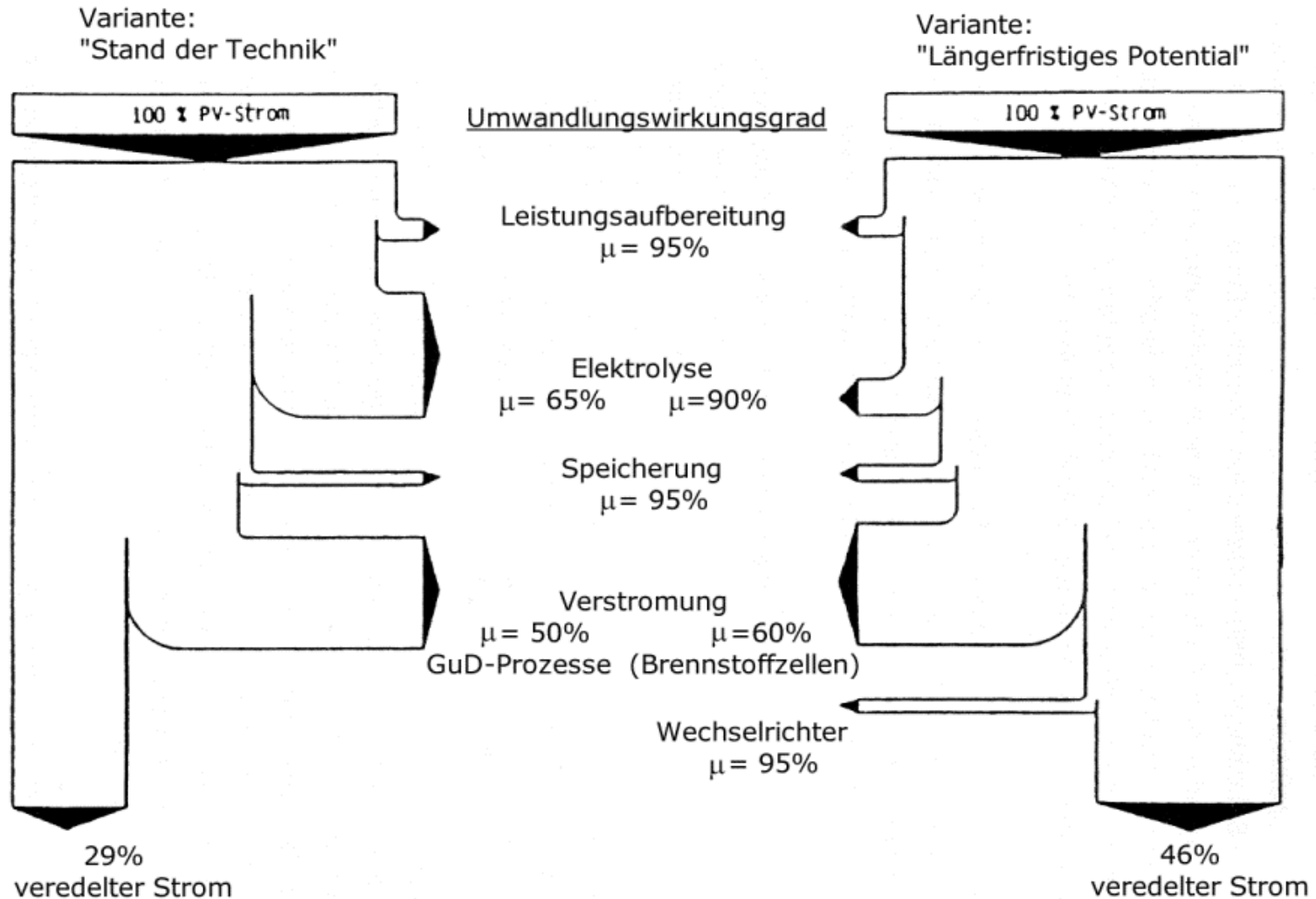
Weltweite Wasserstoff-Erzeugung



- ➔ Weltweiter Bedarf an H_2 : 500 Mrd. m^3/a
- ➔ Hauptsächlicher Verbrauch von H_2 in der chemischen Industrie, 50% für die Ammoniaksynthese, davon 80% für Kunstdünger
- ➔ H_2 als Energieträger ist heute noch nicht üblich



Solarer Wasserstoff



Energetische Bewertung der Umwandlungskette
vom PV-Strom bis zur Stromerzeugung aus H_2



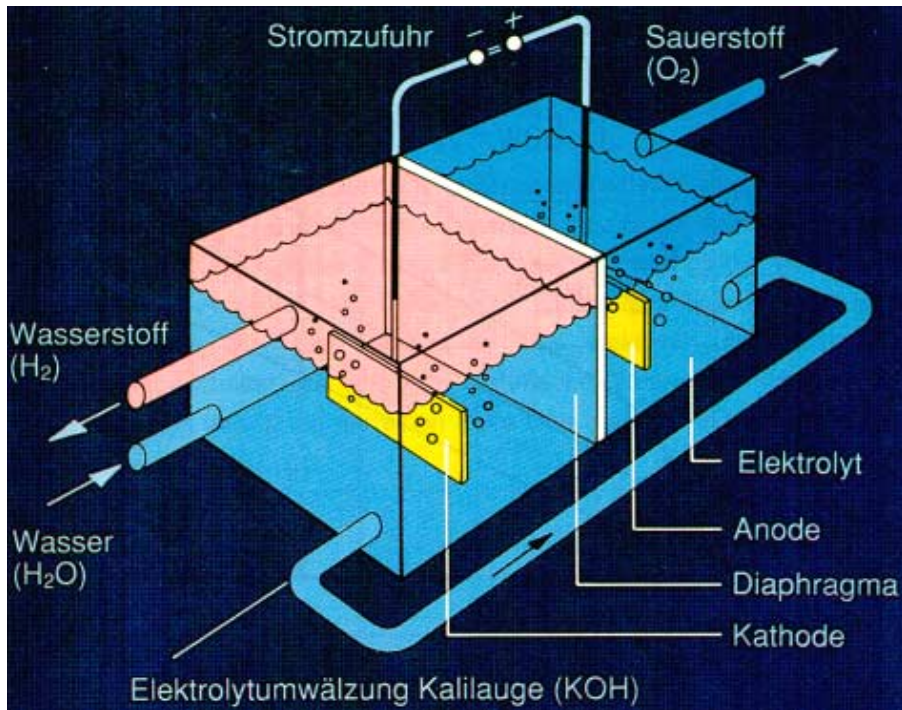
Gewinnung von Wasserstoff

Verfahren	μ (H_2)	T_{Betrieb}
Konventionelle alkalische Wasserelektrolyse	65 %	80°C
Verbesserte alkalische Wasserelektrolyse	90 %	150°C
Membranelektrolyse (SPE)	90 %	120°C
Hochtemperatur-Dampfelektrolyse („Hot Elly“)	> 90 %	850°C
Photoelektrolyse	10 %	20°C
Photochemische Wasserstofferzeugung	< 1 %	20°C
Photobiologische Wasserstofferzeugung	?	20°C

- ➔ Verb. alkalische / Membran-Elektrolyse: Stand d. Technik, effizienteste Methoden
- ➔ „Hot Elly“ Elektrolyse optimal für Einsatz an konzentrierenden Solarsystemen jedoch Werkstoffprobleme aufgrund der hohen Temperaturen (siehe SOFC-BZ)
- ➔ Photoelektrolyseverfahren kommt zwar ohne Elektrizität aus, jedoch für großtechnischen Maßstab derzeit noch nicht geeignet



Alkalische Wasserelektrolyse



Schematische Darstellung des alkalischen Wasserelektrolyseurs

Elektrolysereaktion:

Kathode (-):



Anode (+):



Bruttoreaktion:



Betriebstemperatur: 80°C

spez. Energie: 4,5 - 5 kWh/m_n³

Wirkungsgrad: 65% (H₀)

Zellspannungen: 1,75 - 2 V

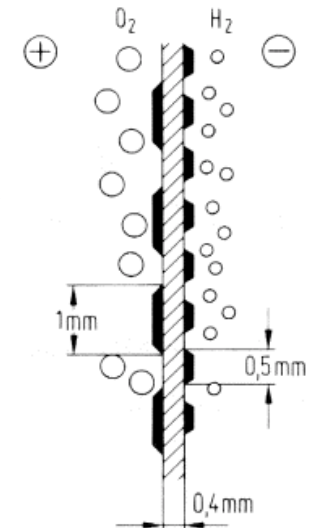


Fortgeschrittene Wasserelektrolyseure

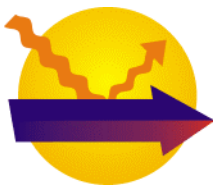
Maßnahmen zur Erhöhung des Wirkungsgrades bei alkalischen Elektrolyseuren:

- ➔ dünne Diaphragmen, d.h. Verringerung des elektrischen Widerstandes
- ➔ Einsatz von Katalysatoren an den Elektroden, d.h. Beschleunigung der elektrochemischen Reaktionen
- ➔ Erhöhung der Prozeßtemperatur, d.h. thermische Aktivierung der Reaktion

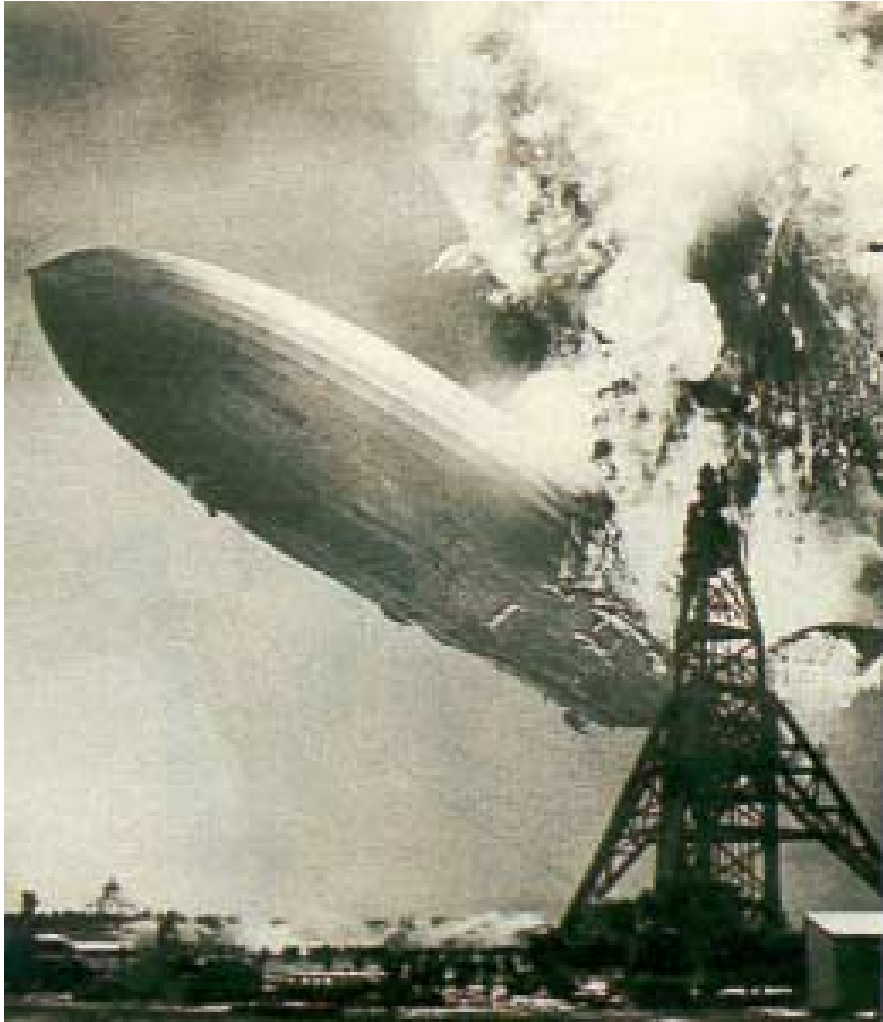
Abstandsfreie Zellgeometrie mit porösen Ni-Elektroden



Alkalische Elektrolyse am
Assuan-Staudamm



Hindenburg-Katastrophe



Am 6. Mai 1937 fängt die „Hindenburg“ beim Landeanflug auf Lakehurst (USA) Feuer und brennt in Sekundenschnelle vollkommen aus.

Bisher bekanntester Unfall mit Wasserstoff

➡ „Hindenburg-Syndrom“



Energietechnische Kenngrößen von Wasserstoff

Unterer Heizwert H_u	33,33 kWh/kg bzw. 3 kWh/ m_n^3
Dichte unter Normalbedingungen	0,08989 kg/ m_n^3
Selbstendzündungstemperatur	585°C
Flammentemperatur	2045°C
Zündgrenze in Luft	4 - 75 Vol. %

- ➔ geringe Zündenergie
- ➔ weiter Bereich von Zünd- und Detonationsgrenzen
- ➔ hoher Diffusionskoeffizient

- ➔ Sicherheitstechnik auf hohem Niveau



Sicherheit von Wasserstoff

Kenngrößen		Wasserstoff	Methan (Erdgas)	Benzin
Unterer Heizwert	(kWs/g)	120	50	44,5
Selbstentzündungstemperatur	(°C)	585	540	228–501
Flammentemperatur	(°C)	2045	1875	2200
Zündgrenzen in Luft	(Vol. %)	4–75	5,3–15	1,0–7,6
Minimale Zündenergie	(mWs)	0,02	0,29	0,24
Verbrennungsgeschwindigkeit in Luft (stöchiometrisches Gemisch)	(cm/s)	265	40	40
Detonationsgrenzen	(Vol. %)	13–65	6,3–13,5	1,1–3,3
Detonationsgeschwindigkeit	(km/s)	1,48–2,15	1,39–1,64	1,4–1,7
Theoretische Explosionsenergie	(kg TNT/m ³ Gas)	2,02	7,03	44,22
Diffusionskoeffizient in Luft	(cm ² /s)	0,61	0,16	0,05

Sicherheitsspezifische Eigenschaften von H₂, CH₄, und Benzin



Speichermöglichkeiten von Wasserstoff

➔ Druckgasspeicher für Wasserstoff

ähnliche Speichersysteme wie bei Erdgas, jedoch ist der spez. Energieinhalt 1/3 des Erdgases. Energetisch gleichwertige Speicher werden also dreimal so groß und entsprechend dreimal so teuer.

- Druckgasspeicher bei 200 bar von etwa 50 l bis 100.000 m³;
- Gas- und Behältergewicht verhalten sich ungünstig.

➔ Kryogene Speicher

Mit der Speicherung von H₂ in flüssigem Zustand (LH₂) sind sehr viel kleinere Speicher realisierbar, da LH₂ den 800-fachen spez. E-Inhalt wie GH₂ aufweist.

- Muß jedoch mit hohem Aufwand auf -253°C gekühlt werden, dazu sind 10 kWh/kg, also ca. 1/3 des E-Inhaltes erforderlich;
- Zur Verfl. H₂ mit hoher Reinheit benötigt (<0,0001% Fremdanteile);
- Tanks müssen sehr gut thermisch isoliert werden;
- Abdampfverluste, ca. 1% am Tag, je nach Formfaktor und Größe



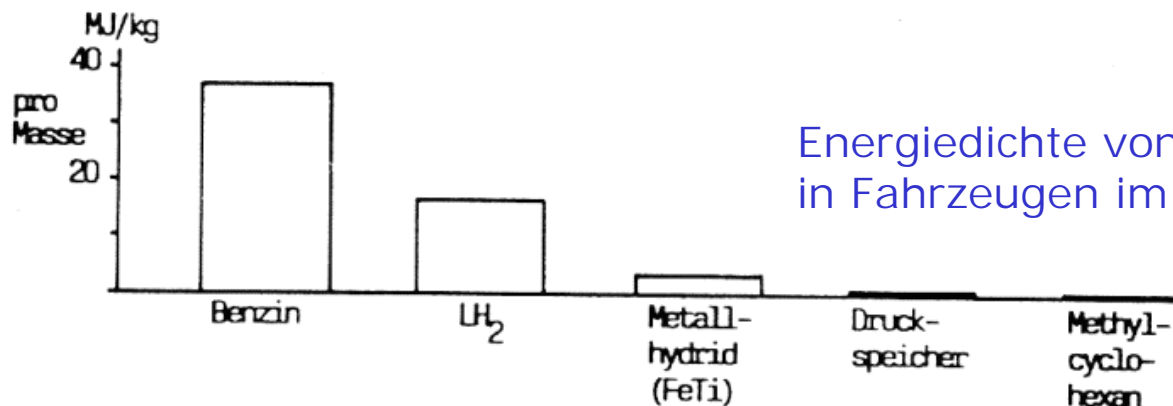
Speichermöglichkeiten von Wasserstoff

➔ Metallhydridspeicher

Effekt, daß bestimmte Metallegierungen bei Kontakt mit komprimiertem Wasserstoff ein Hydrid bilden. Umgekehrt wird H_2 durch Ausheizen frei.

- Wasserstoff wird chemisch gebunden;
- Als Metallegierung wird meist TiFe eingesetzt, Fülldruck ca. 50 bar;
- Leistungsgewicht liegt zwischen Druck- und Flüssigwasserstoffspeichern;
- hoher apparativer Aufwand für Be- und Entladung.

- ### ➔ Kraftfahrzeugspeicher können aus allen Arten bestehen, das Gewicht und die Reichweite sind hier besonders wichtig. Betankungsdauer bei allen Speicherarten unter 10 min.



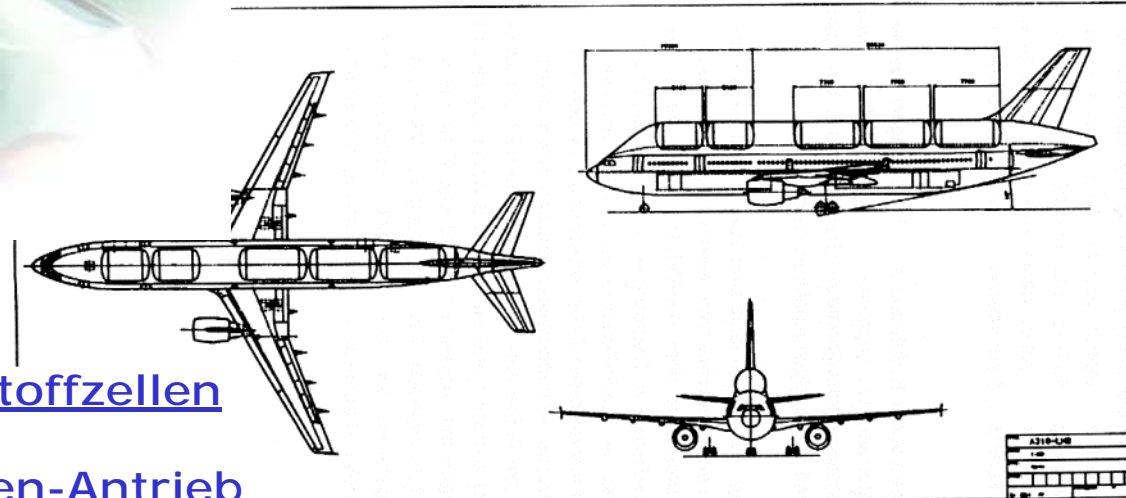
Energiedichte von H_2 -Speichersystemen in Fahrzeugen im Vergleich zu Benzin



Anwendungen für Wasserstoff als Energieträger

➔ Verbrennung

- In KFZ in modifizierten Verbrennungsmotoren (größerer Hubraum);
- In Flugzeugen;
- In Kraftwerken in Gasturbinen;
- In Kraftwerken als Dampferzeuger zur Spitzenlastdeckung;
- In katalytischen Brennern zur Wärmeerzeugung.



➔ Elektrochemisch in Brennstoffzellen

- In KFZ mit Brennstoffzellen-Antrieb
- Zur dezentralen Kraft-/Wärme-/Kältekopplung mit Brennstoffzellen
- In Kraftwerken auf Brennstoffzellen-Basis
- In Sonderanwendungen