

Wasserstoff: Speicherung; Optionen mobile Speicher

bei Umgebungstemperatur / 1 bar? ⇒



Druckgas, warm (CGH ₂)	Cryocompressed (Cch ₂)	flüssig (LH ₂)	Festbettspeicher; H ₂ -Derivate
 Bild: Dynetek	 Bild: BMW	 Bild: BMW	<ul style="list-style-type: none"> • Physisoption • Metallhydride • komplexe Hydride • chem. Bindung • NH₃ ?? (30 % von H_u für H₂-Freisetzung nötig) • LOHC – Dibenzyltoluol, “Marlotherm” ?? (320 °C / 30 % von H_u für H₂-Freisetzung nötig)
1 kg - 6 kg ein bzw. mehrere Einzelbehälter	4 kg - 12 kg therm. isolierter Drucktank	7 kg - 12 kg therm. isolierter Dewarbehälter	

**Druck - Wasserstoffspeicherung:
Composite - Behälter zur Speicherung von Druckgasen**



Quelle: SCI

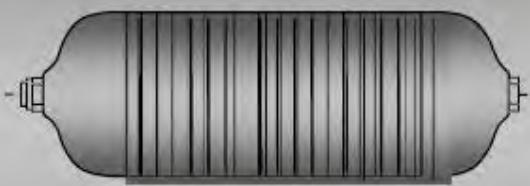
Wasserstoff: Speicherung; Hochdruckspeicher warm

Fibres:

Glas
Aramid
Carbon

Matrix Materials:

Polyester
Epoxy
Nylon



Hoop wrapped

Liner:
AI (6061 T6)
AI (6069)
AI (70XX)
34CrMo4



Fully wrapped

Liner:
AI (6061 T6)
AI (6069)
Edelstahl
Nylon
Polyethylen
(Typ 4)

Wasserstoff: Speicherung; Hochdruckspeicher warm



Vehicle Model: Citaro City-bus

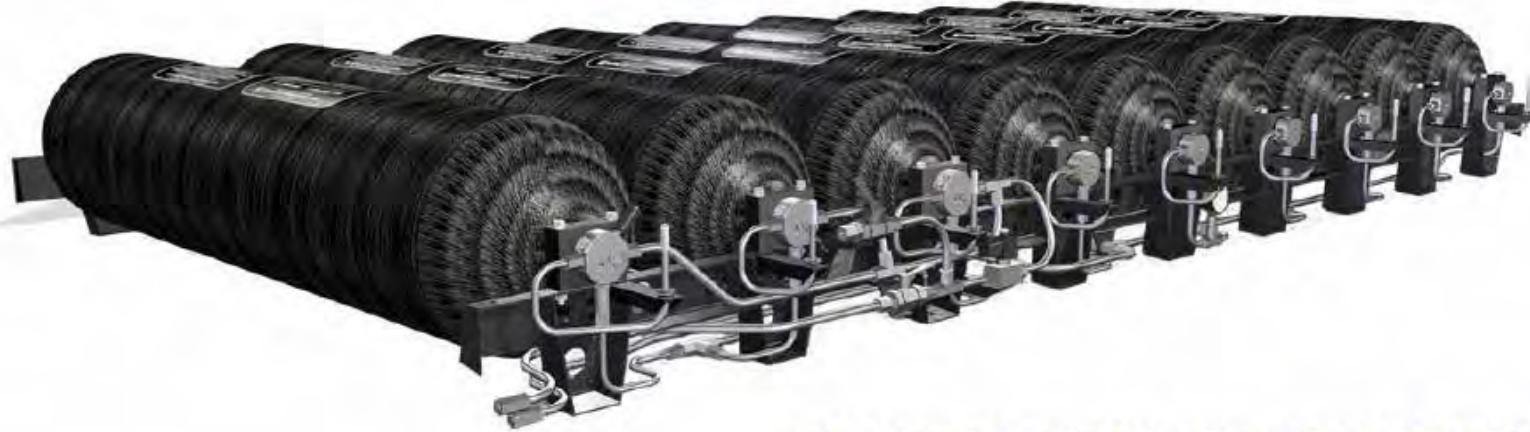
H2 Storage Capacity: 43 kg

Service Pressure: 350 Bar

Approx. Range: 300km

Number of Vehicles: 30

Location: Europe, North America, Australia



ADVANCED LIGHTWEIGHT FUEL STORAGE SYSTEMS™

Wasserstoff: Speicherung; Hochdruckspeicher warm

spezifische Probleme Hochdruckspeicherung:

a) Betankung = Kompression des Gases

⇒ sehr starker **Temperaturanstieg** (da isentrope Zustandsänderung)

Grenzwert Epoxidharz: $\leq 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Begrenzung Tankstellen auf $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

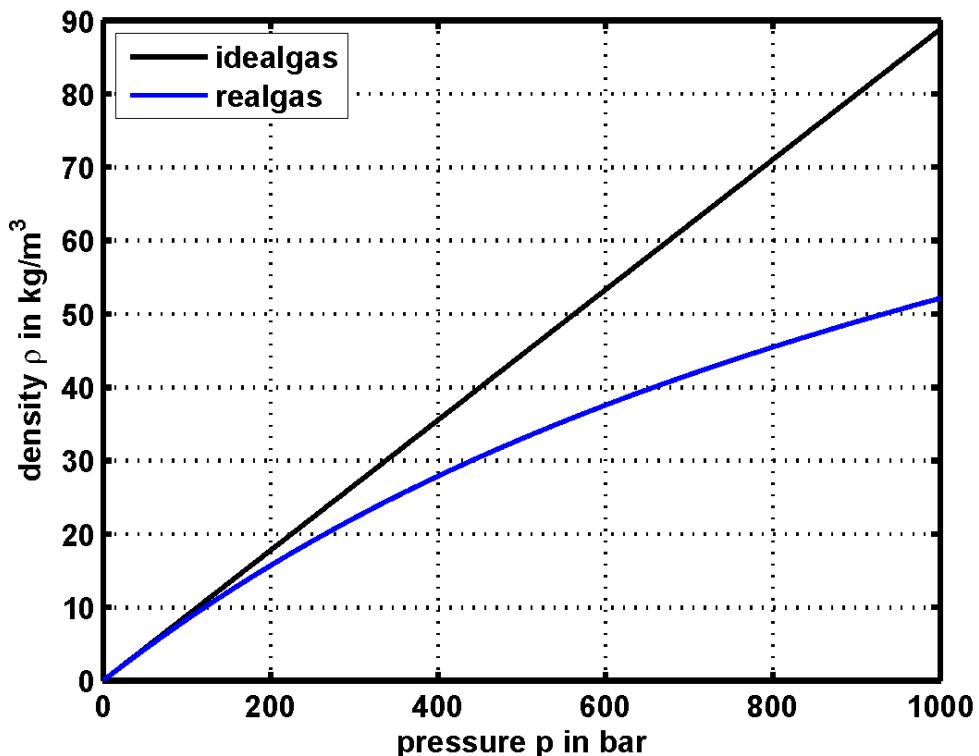
b) Befüllmenge steigt nicht linear mit dem Fülldruck
(Realgasverhalten)

derzeit üblich:

200 bar - Druckgasflaschen

350 bar - Nutzfahrzeuge

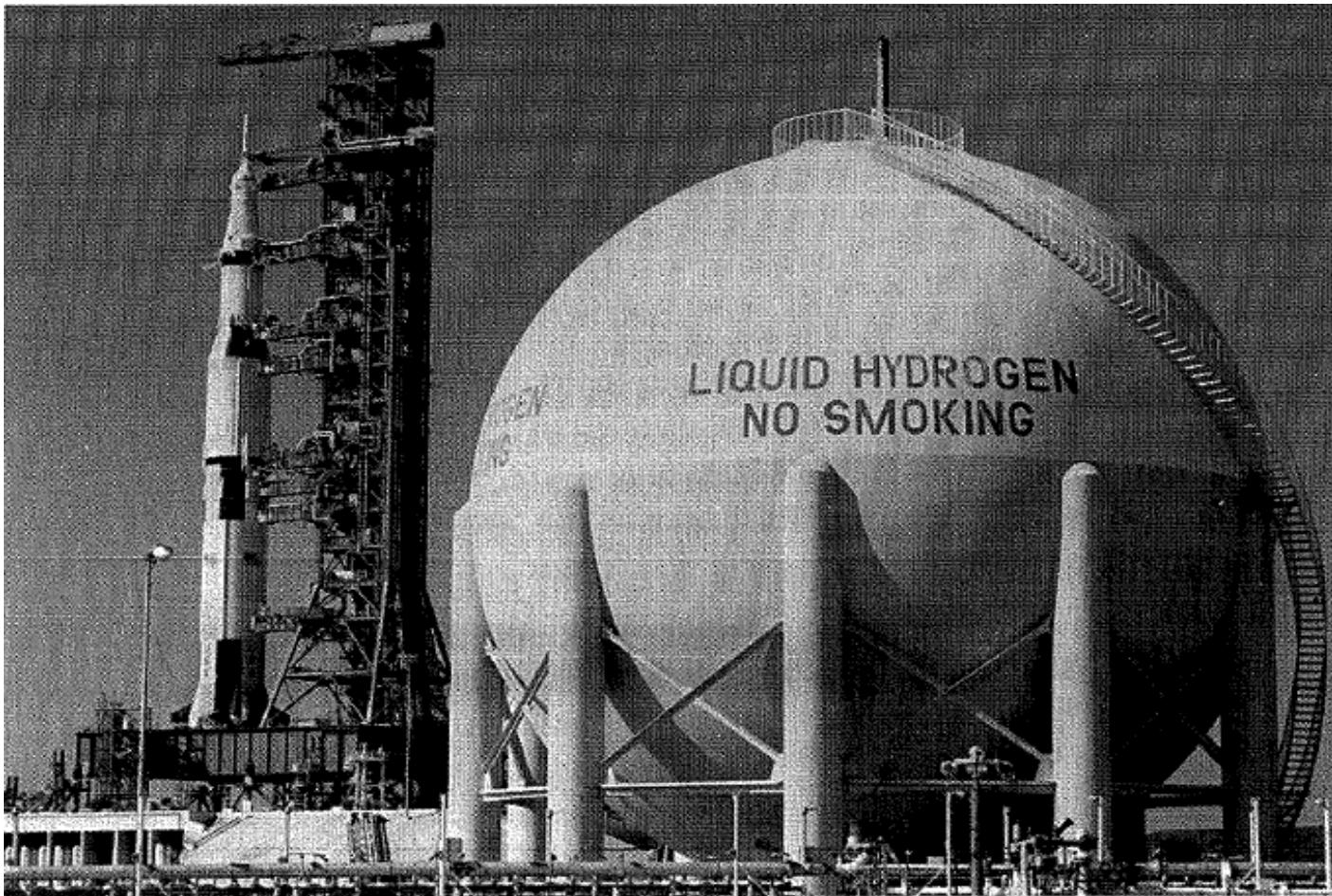
700 bar – Pkw (, Lkw)



Wasserstoff: Speicherung tiefkalt-flüssig

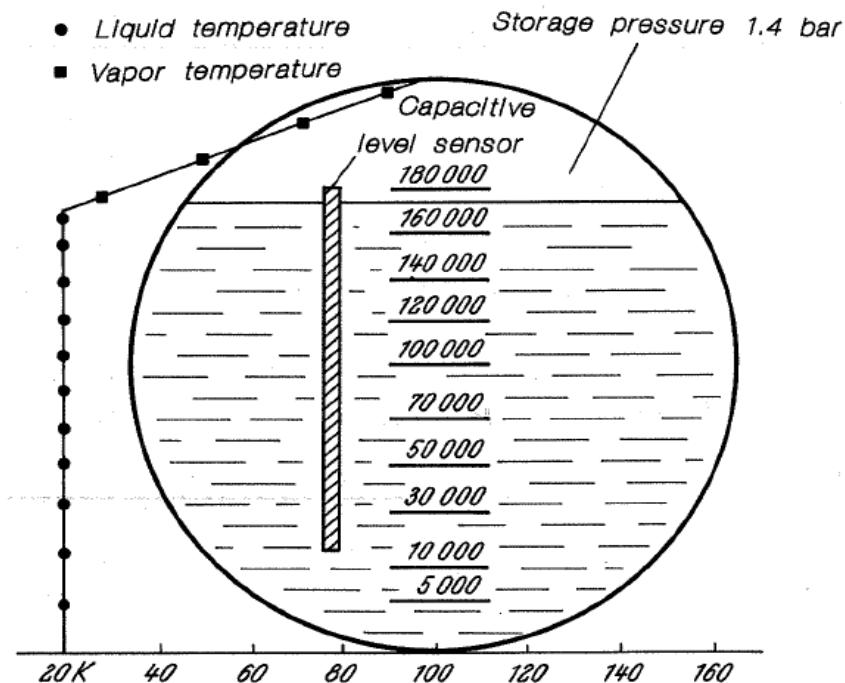
Druckgas, warm (CGH ₂)	Cryocompressed (CcH ₂)	flüssig (LH ₂)	Festbettspeicher
 Bild: Dynetek	 Bild: BMW	 Bild: BMW	<ul style="list-style-type: none">• Physisorption• Metalhydride• komplexe Hydride• chem. Bindung
1 kg - 6 kg ein bzw. mehrere Einzelbehälter	4 kg - 12 kg therm. isolierter Drucktank	7 kg - 12 kg therm. isolierter Dewarbehälter	

Wasserstoff: Speicherung tiefkalt-flüssig

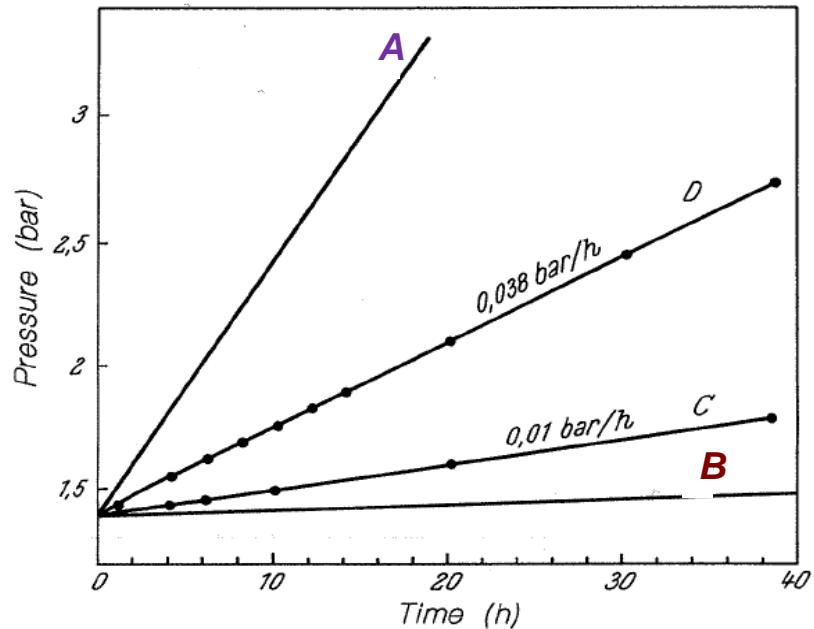


LH_2 -Tank, Kapazität 3800 m³ (270 000 kg), Außendurchmesser 20 m, Perlit-Vakuumisolation,
Abdampfrate 0,03%/Tag. NASA Kennedy Space Center [W. Peschka, Liquid Hydrogen]

Wasserstoff: Speicherung tiefkalt-flüssig

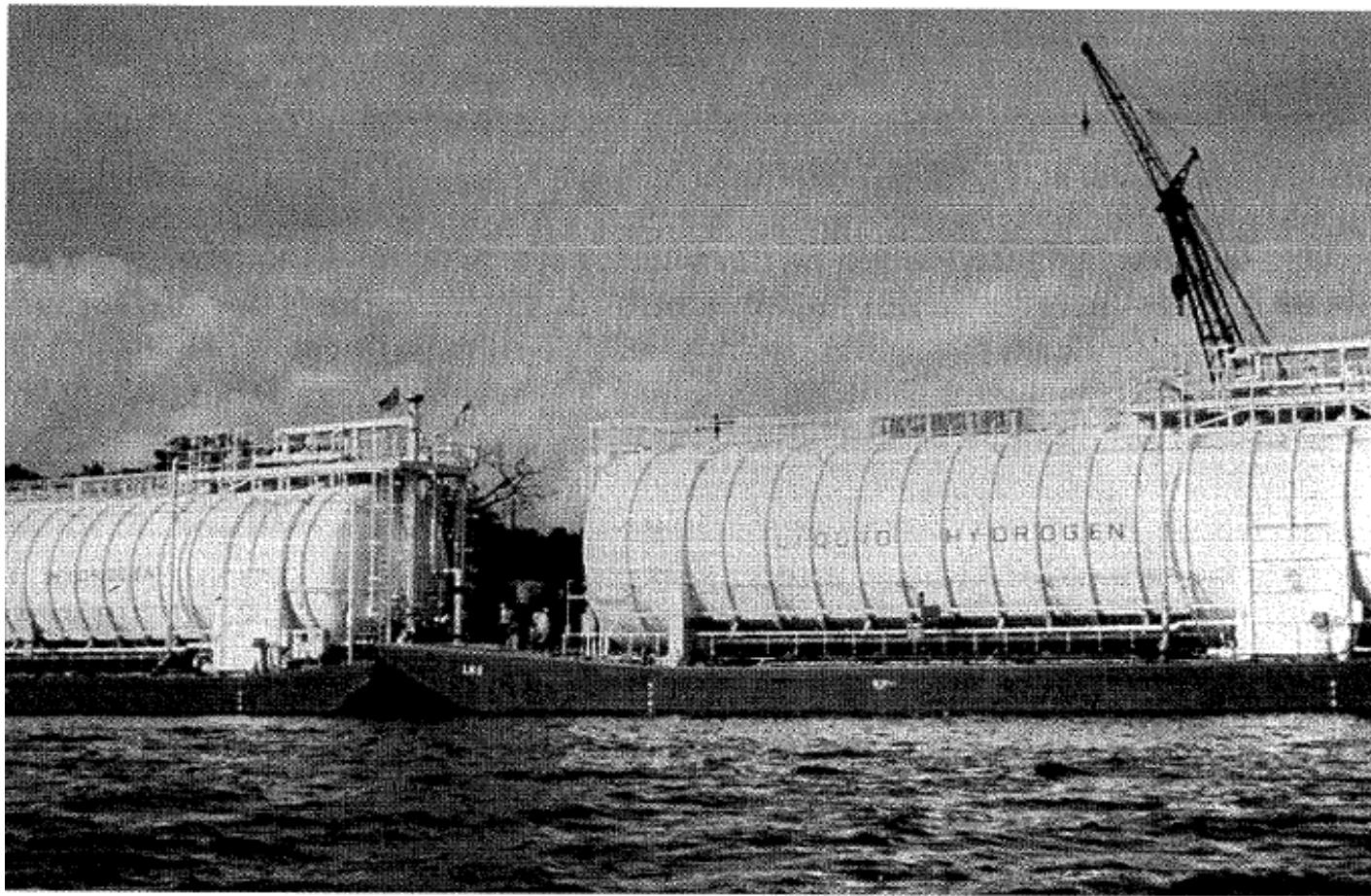


Temperaturschichtung (oben) und Druckanstieg aufgrund der Ruheverdampfung (rechts)
aufgrund der Ruheverdampfung (rechts)
innerhalb eines 180 m^3 LH_2 -Tanks
[W. Peschka, Liquid Hydrogen]



- A: rechnerisch, Wärmeeintrag ausschließlich durch Gasphase absorbiert
- B: rechnerisch, Wärmeeintrag ausschließlich durch Flüssigphase absorbiert
- C: Meßkurve, hoher Füllstand
- D: Meßkurve, niedrigerer Füllstand

Wasserstoff: Speicherung tiefkalt-flüssig

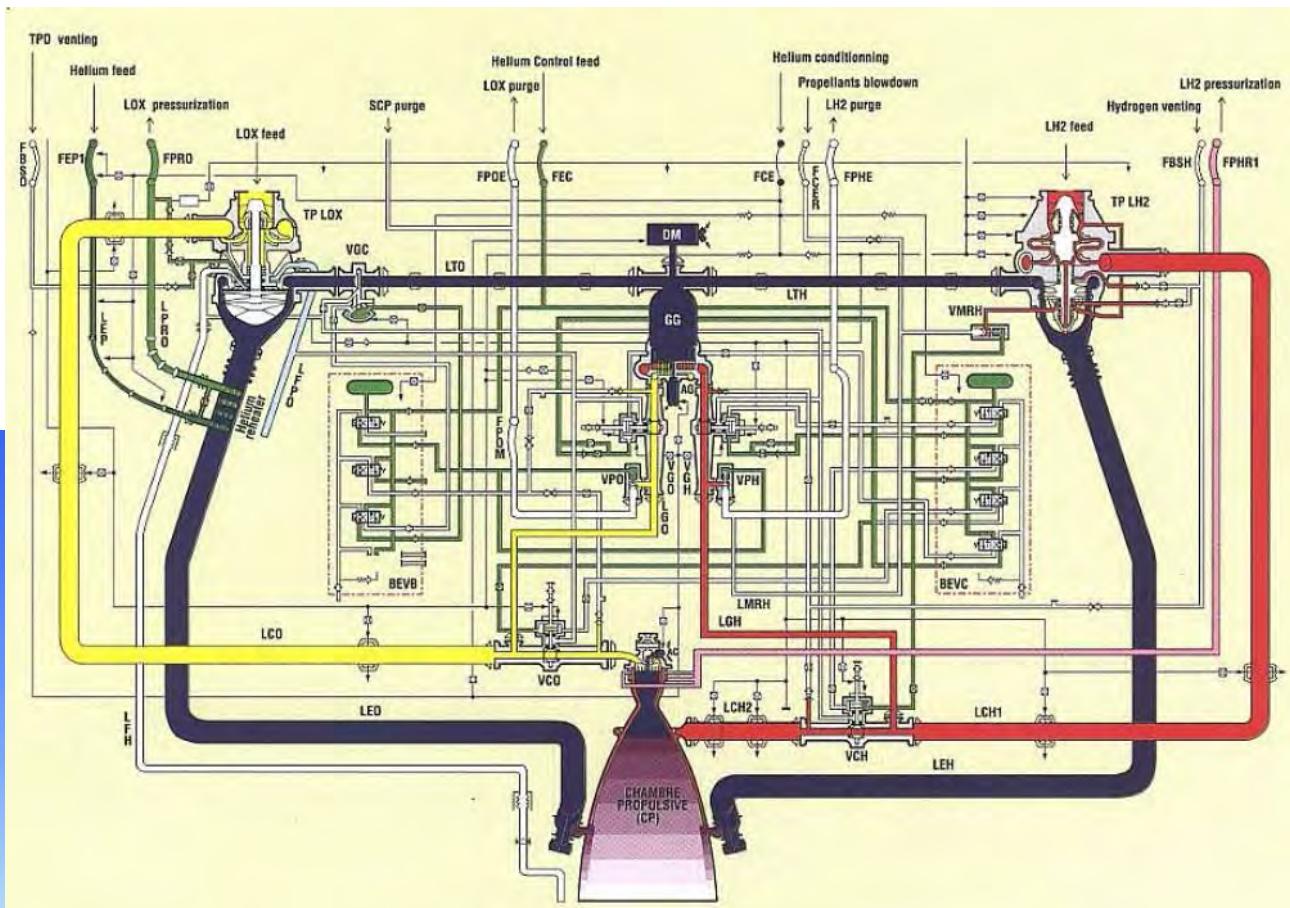


LH₂-Transportcontainer Kapazität 900 m³

(Perlit-Vakuum bzw. MLI-Vakuumisolation, LN₂-Schildkühlung. Erstes H₂-Abblasen z.T. erst nach 20 Tagen (dann mit H₂-Abgasstrom Quirl angetrieben für Vermischung mit Luft < 4%)

[W. Peschka, Liquid Hydrogen]

Wasserstoff: LH₂ als Energieträger in der Raumfahrt



Raketentriebwerk Vulcain 2

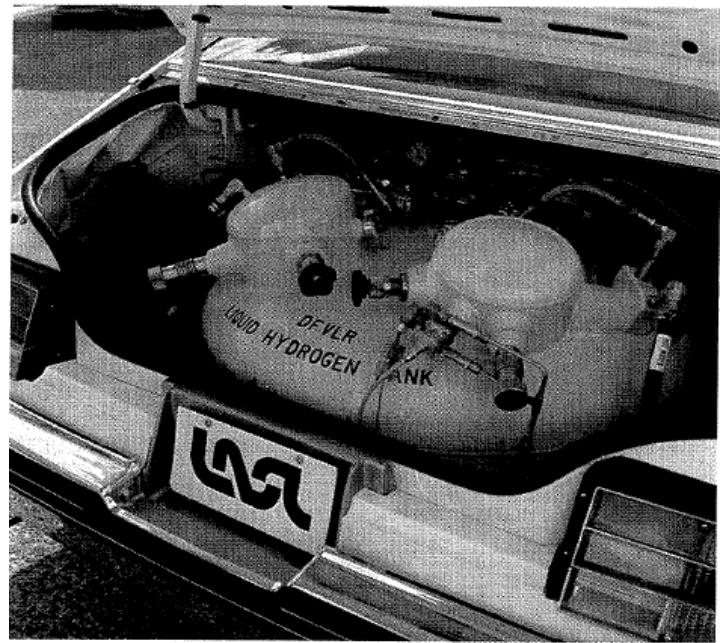
Treibstoff / Oxidationsmittel: LH₂ / LOX

Schub im Vakuumraum: 1340 kN

Schub auf Erdoberfläche: 900 kN

Betriebszeit: 600 s

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks



LH₂-Testfahrzeug, Los Alamos National Laboratory, 1973, (links)

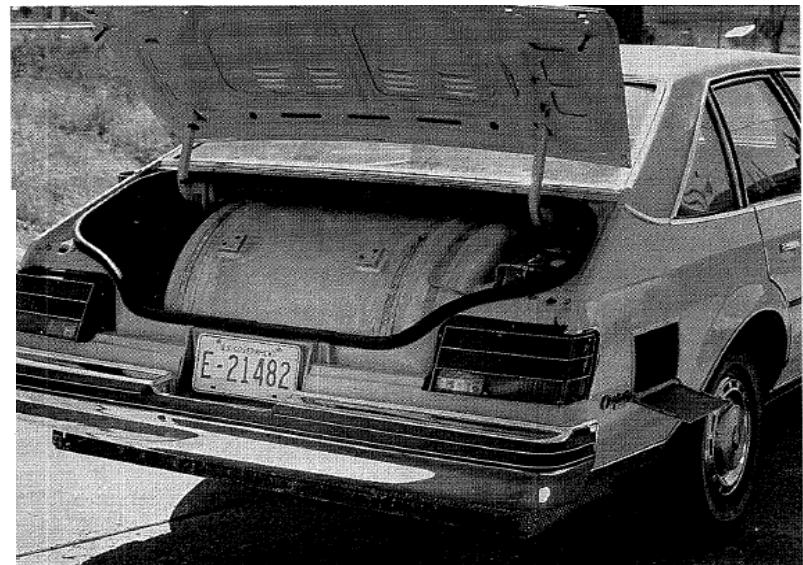
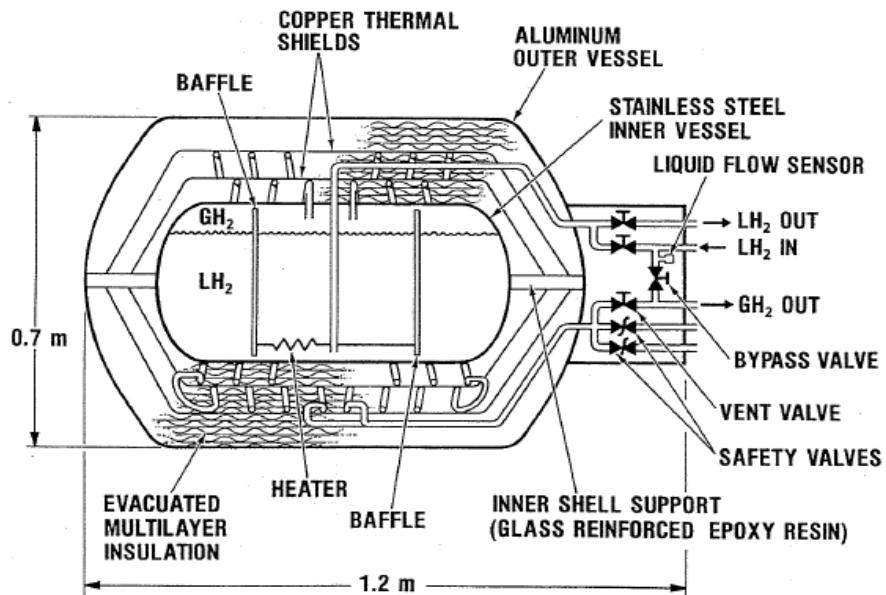
190 l - Aluminiumdewar MVE, Leergewicht 42,6 kg, Ruheverdampfung 3,3 %/Tag

ähnlich: Musashi-Institut, Tokio (div. Testfahrzeuge 70er Jahre, ohne Abb.)

Testfahrzeug LASL, USA, mit DFVLR –Tank, 1980 (rechts)

[W. Peschka, Liquid Hydrogen]

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

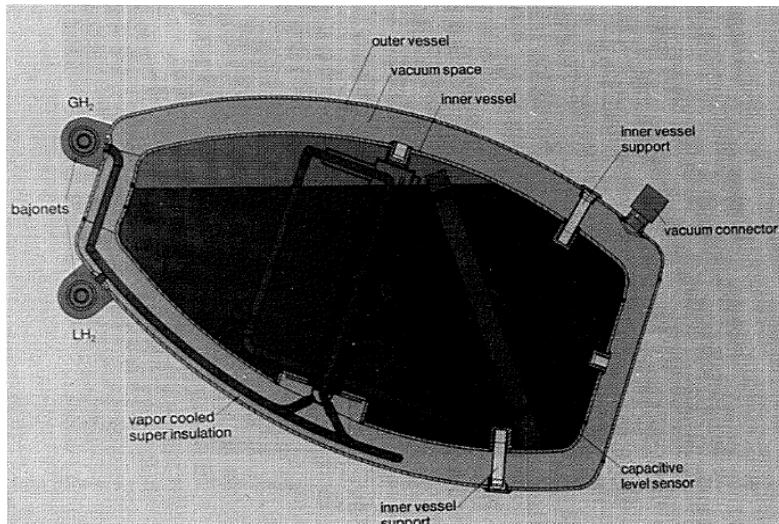
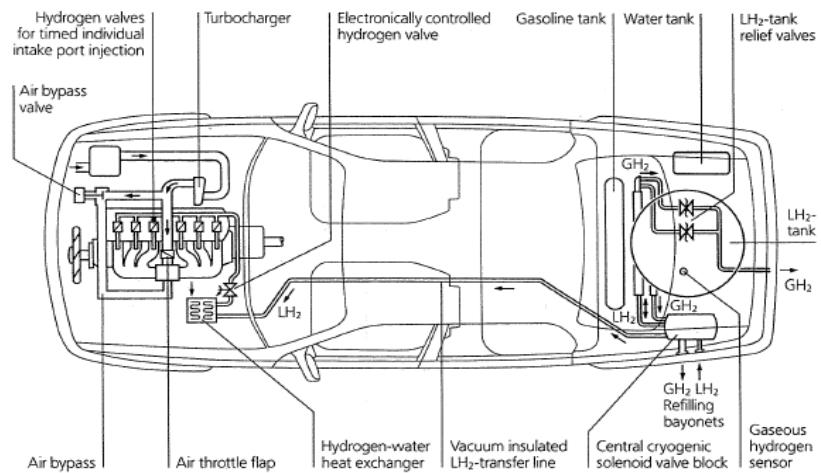
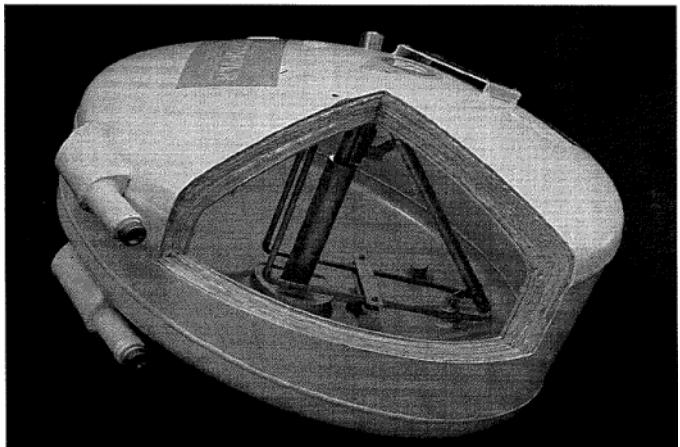


LH₂-Dewartank LASL – DFVLR, 1980

(V₂A-Innentank 155 l, 2 x Cu-Strahlungsschild, Alu-Außenbehälter; Leermasse 156 kg, Ruheverdampfung 4 %/Tag)

[W. Peschka, Liquid Hydrogen]

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks



Testfahrzeug DFVLR – BMW 745i, 1983

(erstes Fahrzeug mit LH₂-Zulassung in Europa, Tank Messer-Griesheim nach DFVLR-Design, 130 l, Leergewicht 65 kg, Ruheverdampfung 1,8 %/Tag)

[W. Peschka, Liquid Hydrogen]

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks



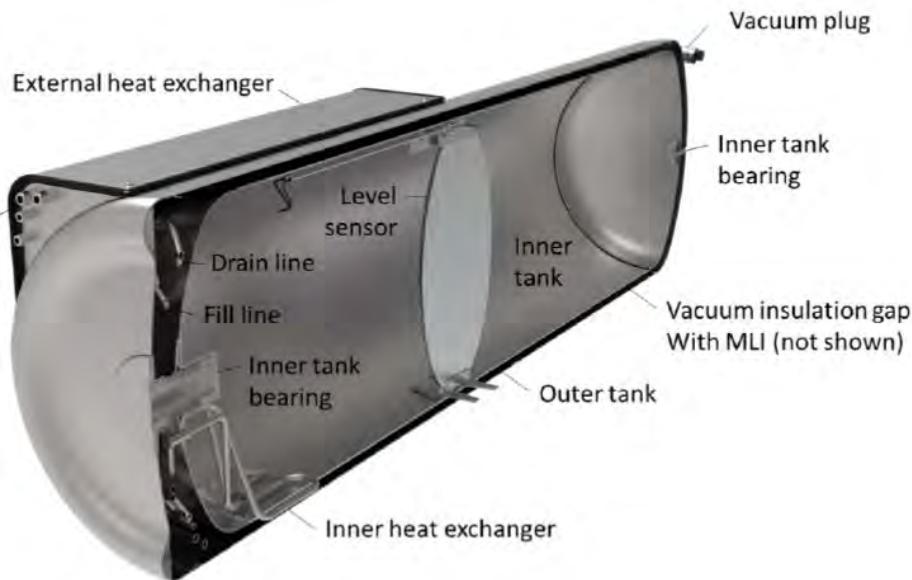
Refueling process in Wörth (Daimler Truck)

Material:	Stainless steel 1.4301,
Outer Diameter	711 mm
Overall Length	2500 mm
Operating Pressure	5 - 20 barg
MAWP	21 barg
Inner tank gross volume	760 l
Weight	430 kg wo H ₂
Hold time at 50 % SOC	4 d
Capacity approx.	42 kg LH ₂

SAG LH₂ on the truck on the IAA Transportation 2022

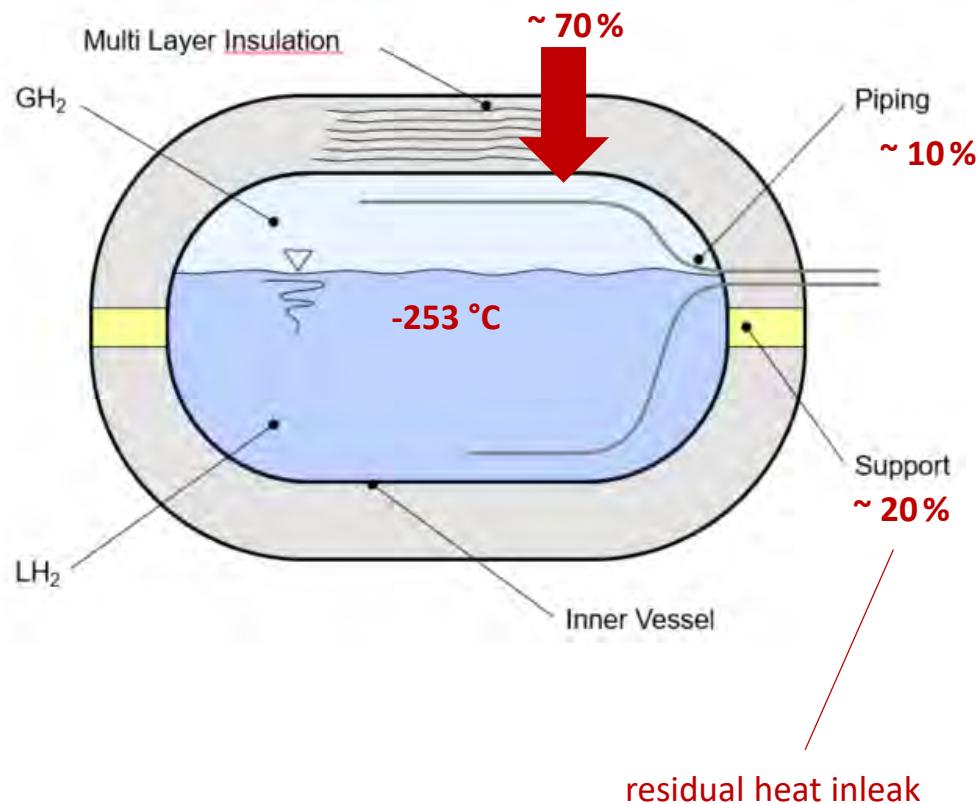
SAG Tank for Daimler LH₂ Truck
Oct. 2022:
1000 km range demonstrated

Thomas Stepan
SAG – Salzburger Aluminium Group
European Cryogenic Days 2023
GSI Darmstadt



Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

möglichst perfekte thermische Isolation:



Restgas-Wärmeleitung

⇒ Hochvakuum

Wärmestrahlung

⇒ MLI – Multi Layer Insulation

Wärmebrücken, Verbindungen

⇒ geeignetes Material,
dünnwandig

Two important parameters:

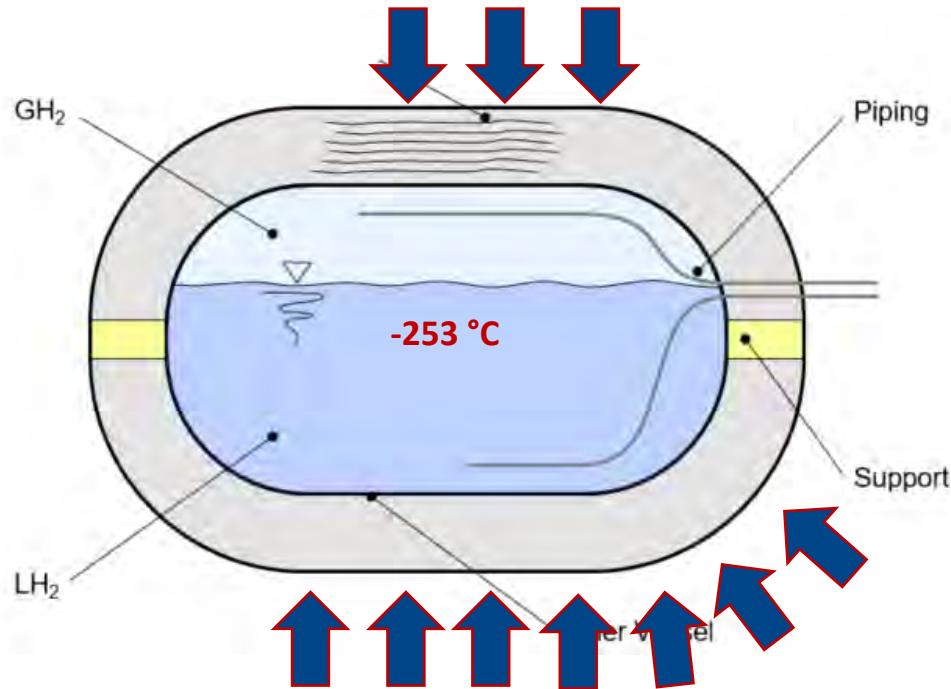
- **Dormancy time**

closed tank, time until MAWP is reached ⇒ boil-off valves opens

once started:

- **Boil-off rate** (e.g. 4 % / day)

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks



mechanical strength:

vacuum vs.

1 bar ambient pressure

→ force 10^5 N/m^2

⇒ **10 tonnes load /m² !**

to avoid buckling is a major issue

⇒ mandatory
spheres
cylinders
maybe egg-shaped

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

Problem: permanent vacuum < 10⁻⁵ mbar



Example: Vacuum reservoir, V = 1 Liter

$$p = 1 \text{ bar} \Rightarrow 1,25 \text{ g Air}$$

$$p = 10^{-6} \text{ mbar} \Rightarrow 10^{-9} \text{ g Air!}$$

high-end valve: leak rate = 10⁻⁹ mbar·l / s

Reservoir V = 10 l

→ in 1 month: 1 · 10⁻⁵ → 2,6 · 10⁻⁴ mbar

1 kg steel: up to 200 ml (0,016 g) H₂ - outgassing

Problem:
(appreciable) gas permeation given
at all non-metallic materials

⇒ Getter materials to be placed inside

Zeolith (cold) fixing N₂, O₂, H₂O, CO₂, organics

PdO binding H₂

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks



- LH₂ tank 1... 4 bar_{abs} working pressure
 - FC: ~ 15 bar_{abs} input pressure
 - ICE / turbine: ~ 50 bar_{abs} input pressure
- ⇒ LH₂ pump or H₂ compressor needed

further headaches:

cool-down:

large quantities of LH₂ are evaporated / lost for cool-down 288 K → 20 K
→ never allow to warm up again once at cryogenic temperatures!

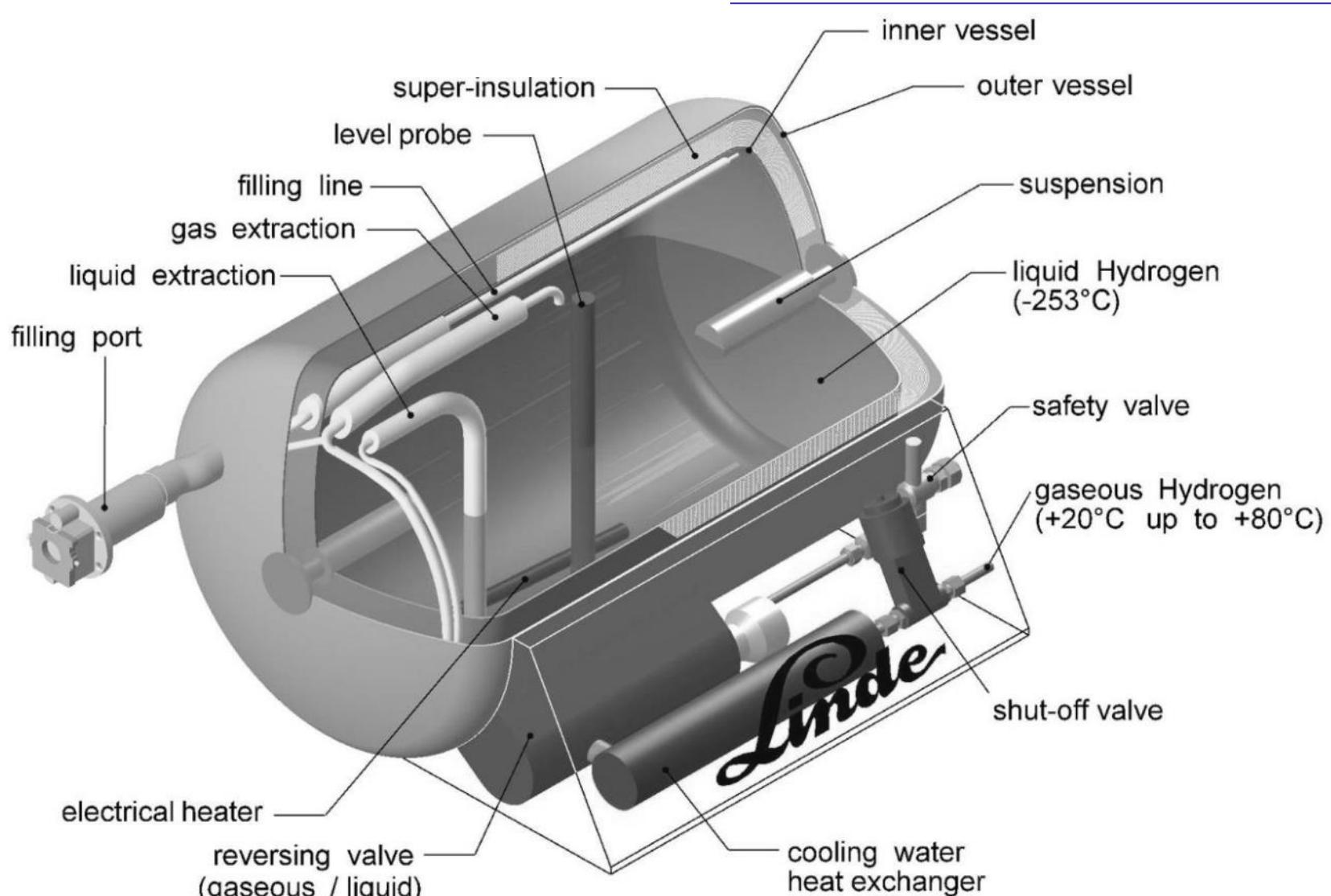
in case vacuum loss:

all LH₂ content evaporates and is blown-off within minutes

when LH₂ is withdrawn:

heat input (kW range!) needed to keep working pressure
LH₂ must be evaporated / warmed up
→ dedicated heat exchanger

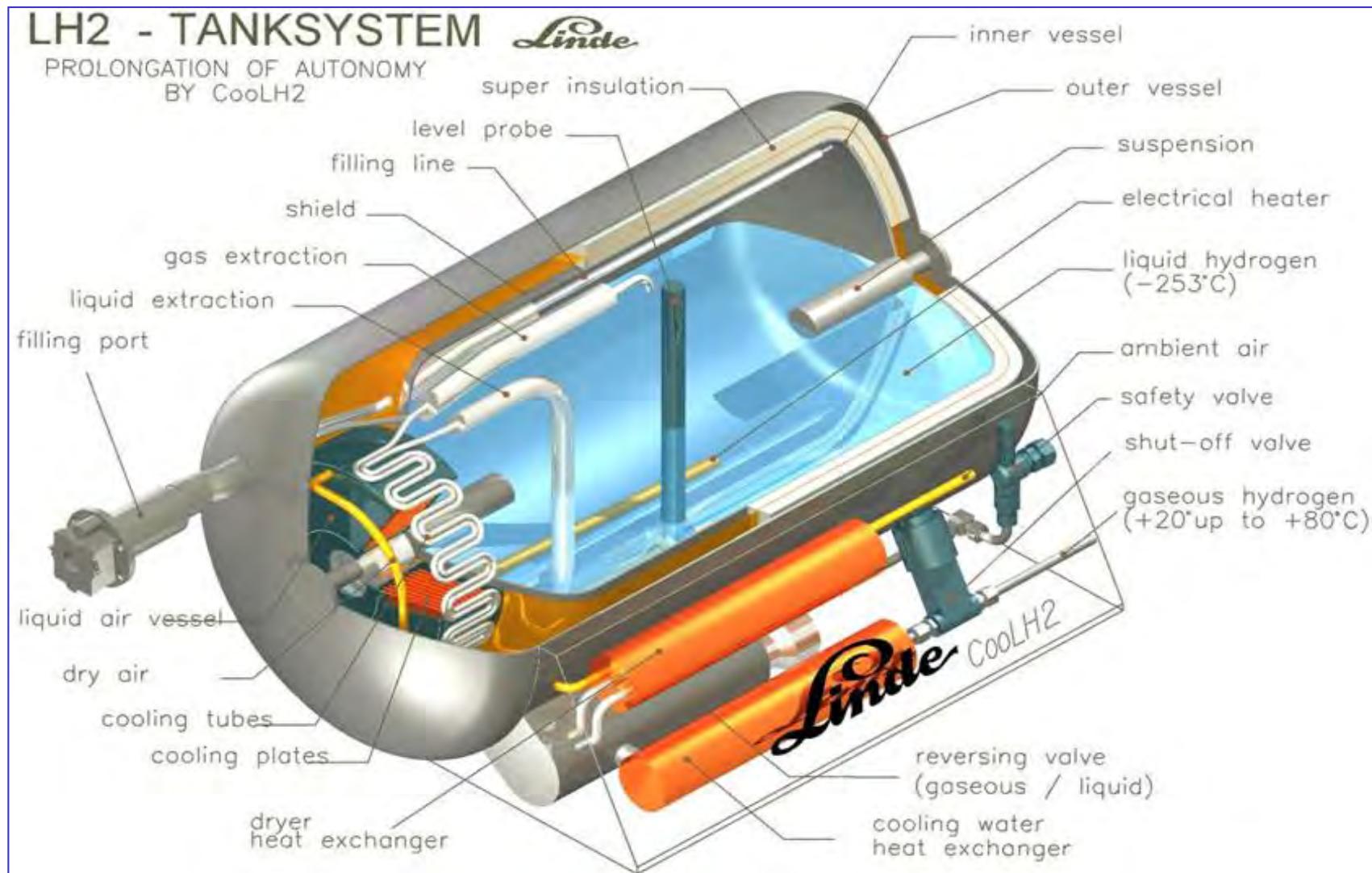
Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks



Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

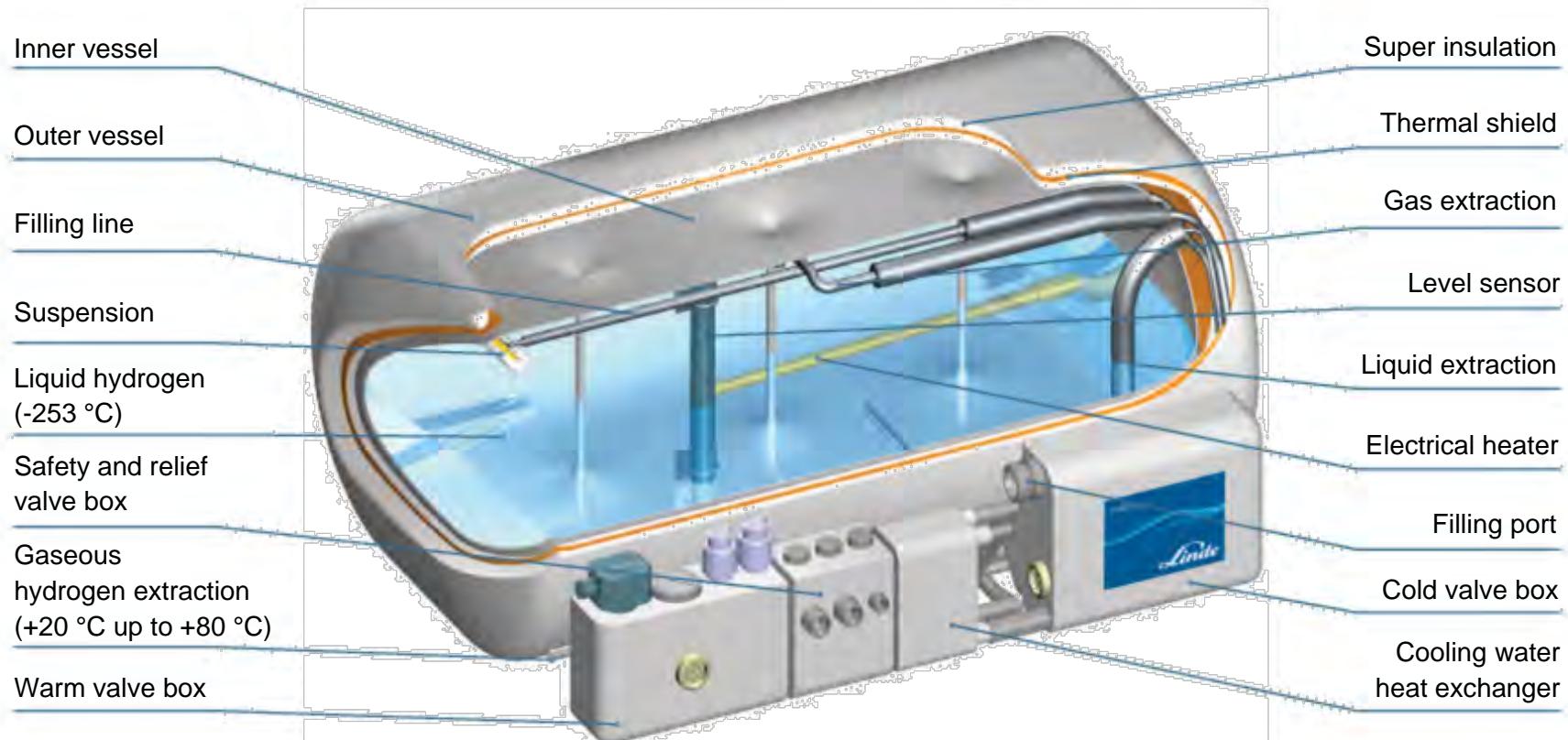
Prototyp:

Bei LH₂-Entnahme Einkondensation von (getrockneter) Umgebungsluft zur Schildkühlung \Rightarrow Standzeitverlängerung



Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

alternative Tank-Geometrien



Source: Linde AG

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

alternative Tank-Geometrien

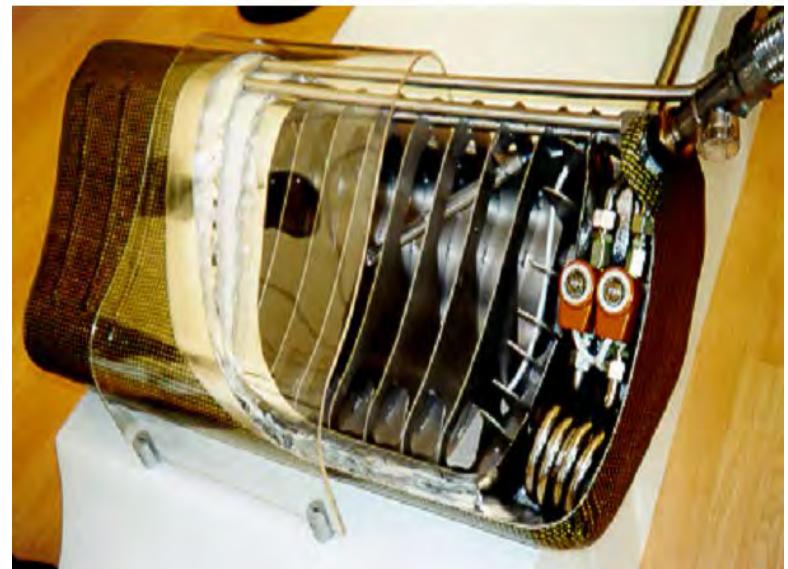
CHARAKTERISTISCHE DATEN PKW-TANK:



Abb. 2: Pkw-Flachtankmodul für Flüssigwasserstoff (LH₂)

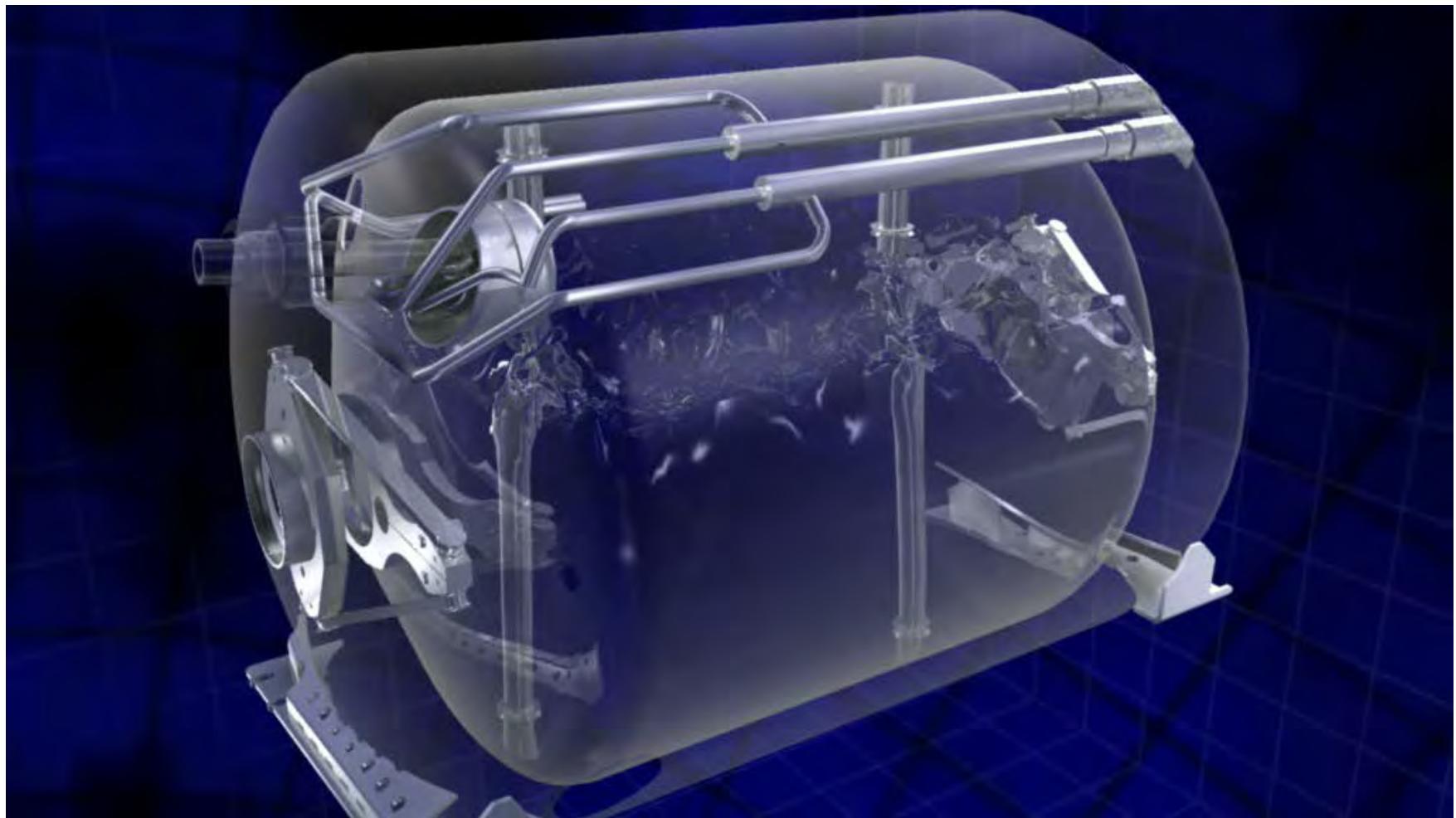
[Quelle: Magna Steyr]

Abmessungen (L x B x H):	0,66 m x 0,88 m x 0,28 m
Gewicht (Netto):	63 kg
Max. Wasserstoffmasse:	4,5 kg @ 0,4 MPa
Arbeitsdruck:	0,4 MPa
Gravimetrische Systemenergiedichte:	2,0 kWh/kg
Druckaufbauzeit (typisch):	> 1 Tage
Abdampfrate (typisch):	< 4 % pro Tag



Quelle: BMW

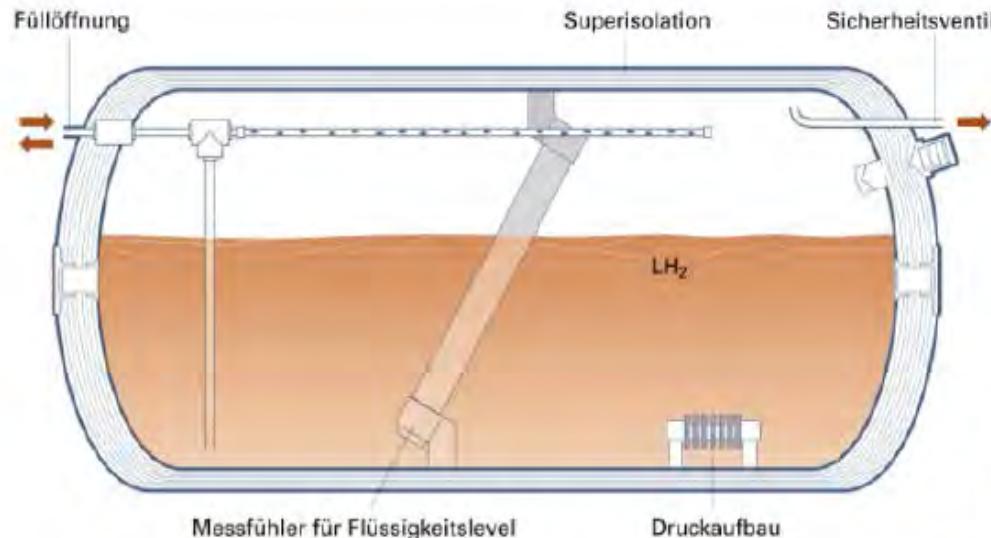
Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks



BMW E 68 – Tank (140 l LH₂)

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

Liquid Hydrogen Tank



Source: Messer GmbH

ADVANCED LIGHTWEIGHT FUEL STORAGE SYSTEMS™

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

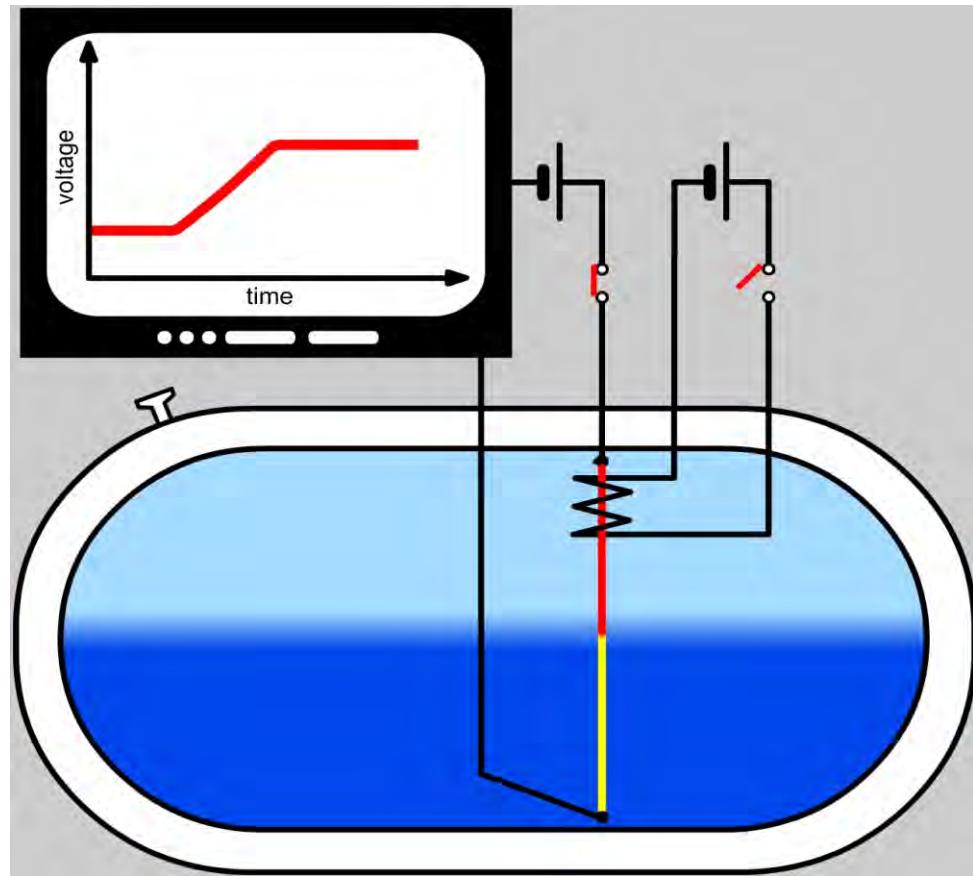
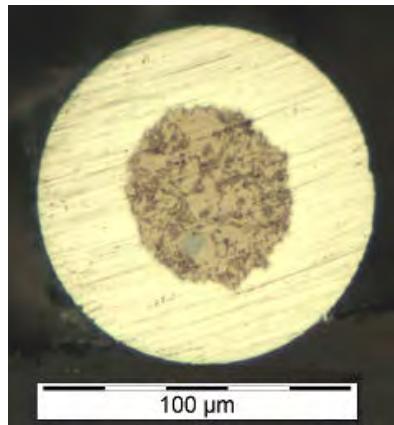
LH₂-Füllstandsmessung: kapazitive Sonden als heutiger Standard

(2 ... 3 Rohre konzentrisch) ungenau, fehleranfällig (Messsignal im pF-Bereich)

⇒ Alternativ-Entwicklung: Supraleitende LH₂ - Füllstandssonde

Funktionsprinzip

MgB₂ - Filamentdraht 50...300 µm
Maßgeschneidert von KIT Karlsruhe
 $T_c = 36\text{ K}$



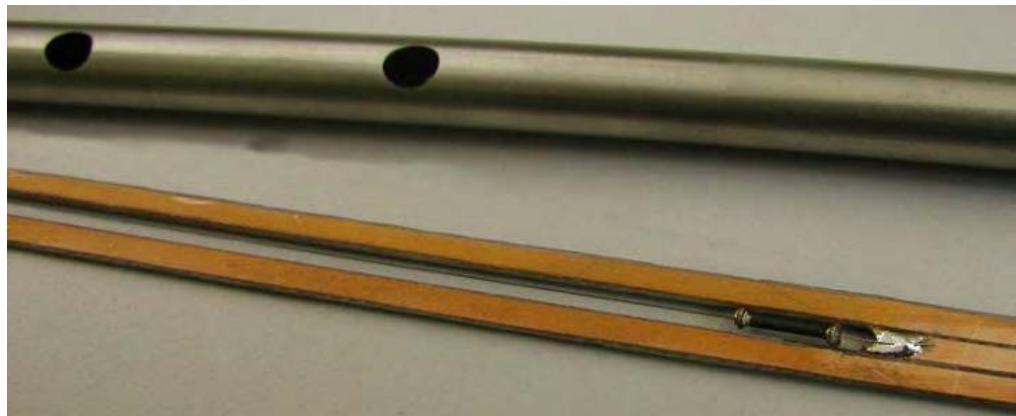
Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

Supraleitende LH₂ - Füllstandssonde

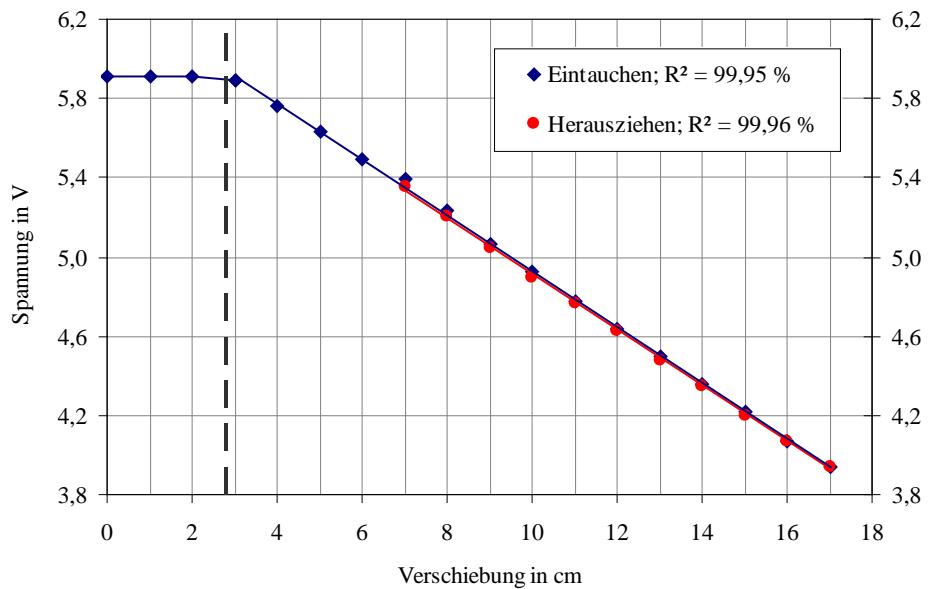
(Haberstroh, Zick, Dehn, Kirsten)

- einfacher Aufbau
- geringe Materialkosten
- extrem präzis ($\pm 0,2$ mm)
- lineares Ausgangssignal
- hohe zeitliche Auflösung
- geringe Störanfälligkeit

von BMW unter realen Bedingungen
2006 getestet,
sehr positives Resultat



Supraleitende LH₂ – Füllstandssonde (Patent TU Dresden)



Linearität, Auflösung

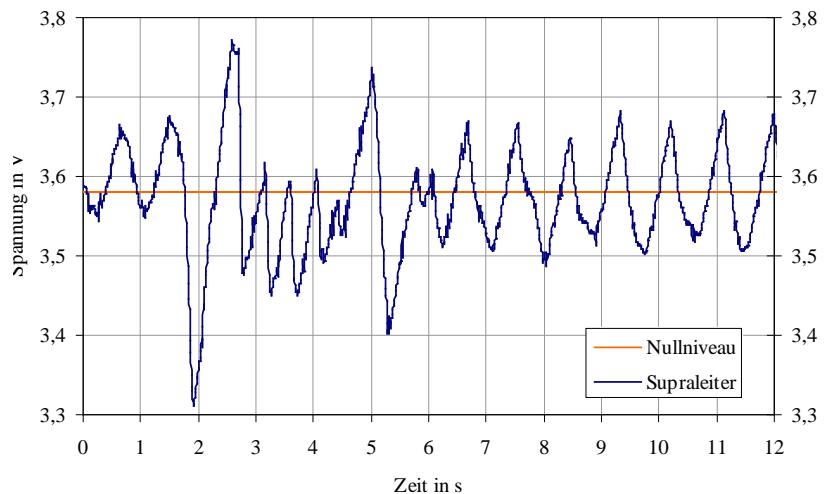
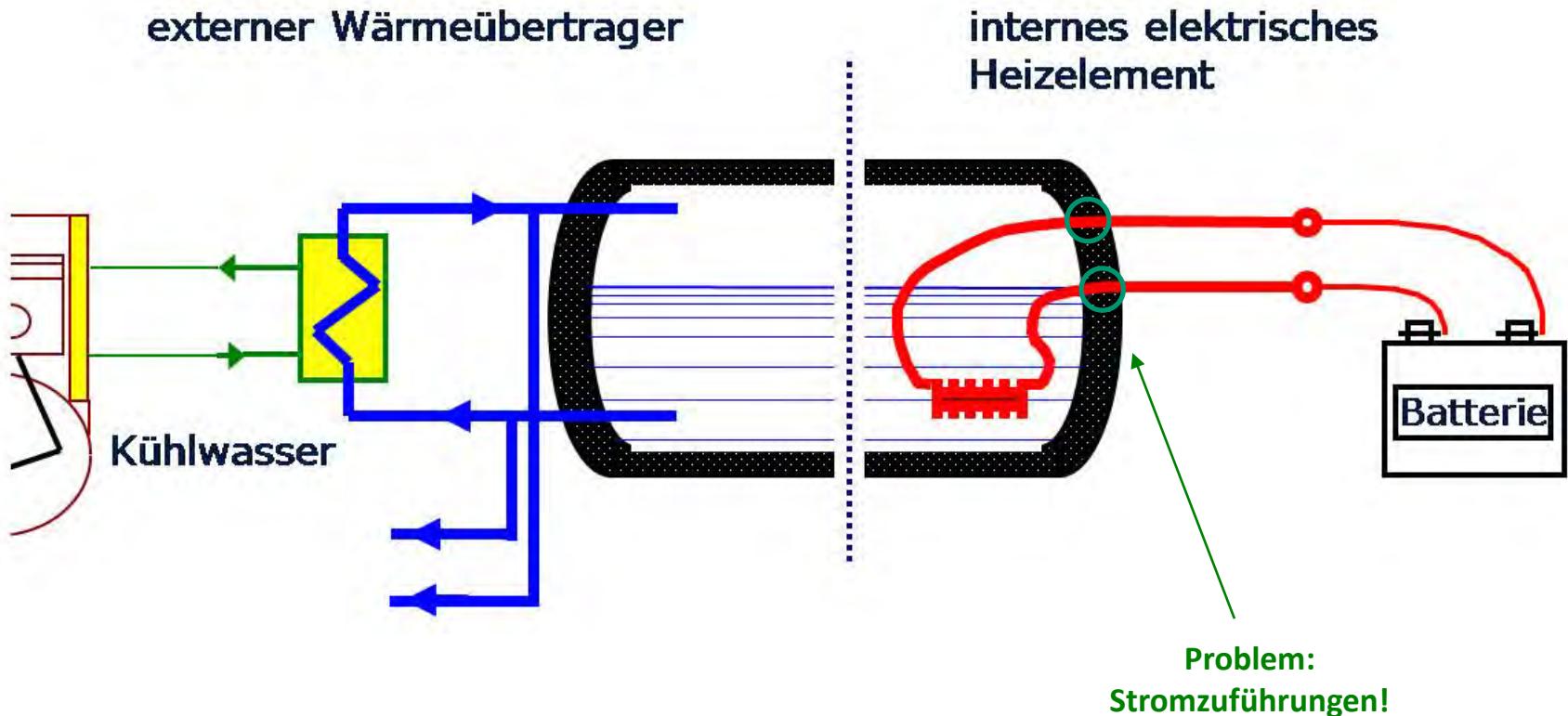


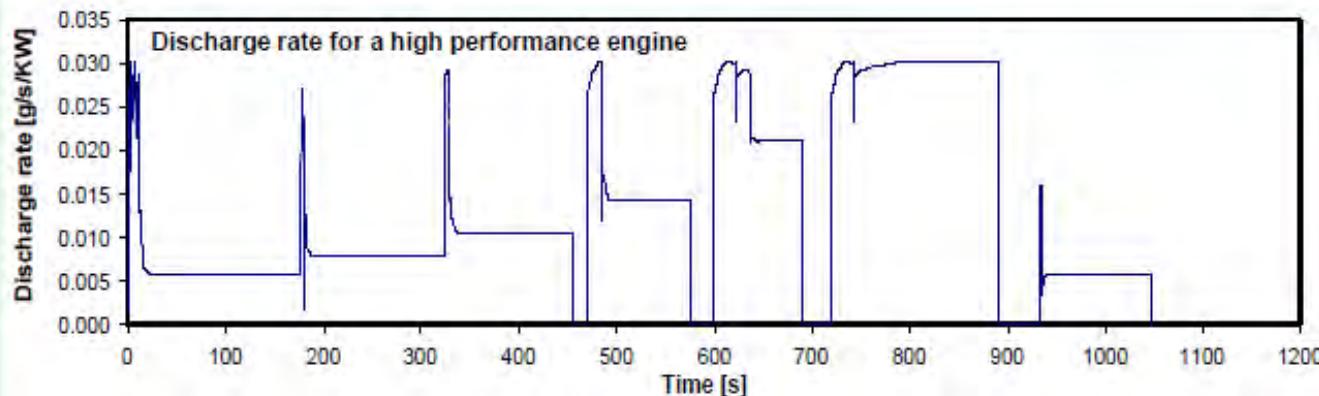
Abbildung schwappende Phasengrenze;
korrekter Mittelwert

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

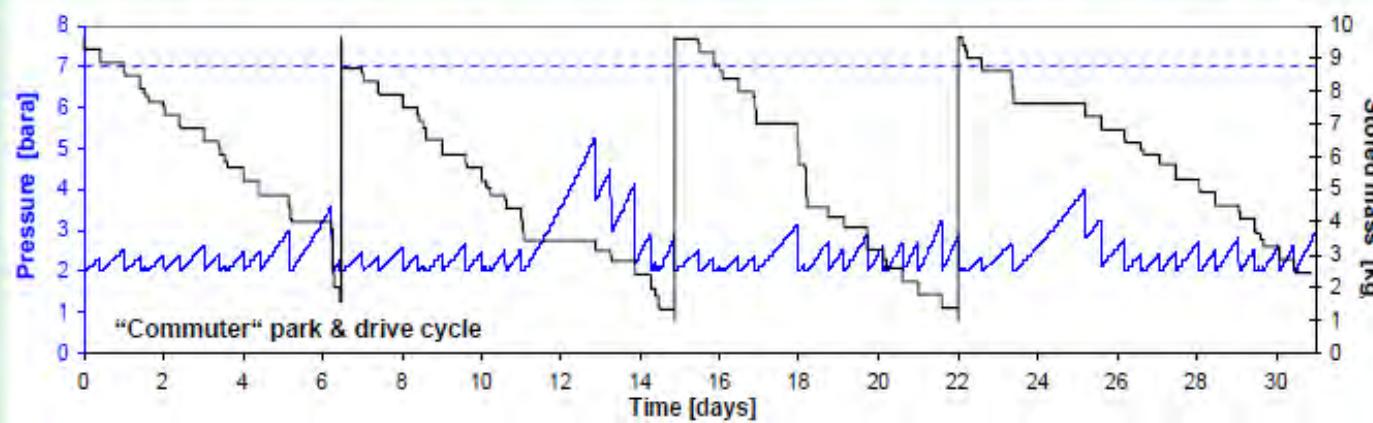
Optionen zur Druckhaltung bei LH₂-Entnahme
(Wärmeeintrag im kW-Bereich erforderlich!)



Storage layout is based on full load requirements.

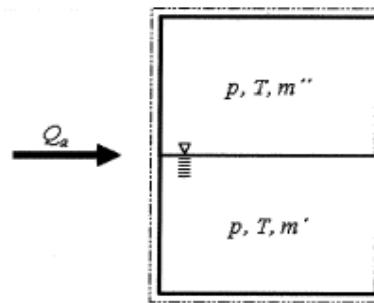
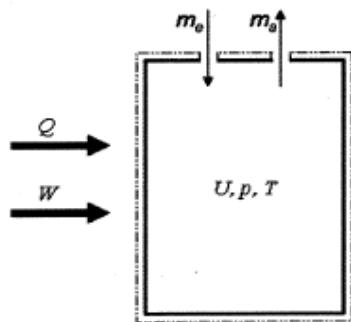


Customer park & drive cycles decide about vent loss-free operation.



Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

LH₂- Dewartank: thermodyn. Beschr.



$$V = \frac{m}{\rho} = mv = V' + V'' = m'v' + m''v''$$

Dampfziffer x

$$x = \frac{m''}{m} = \frac{m''}{m' + m''}$$

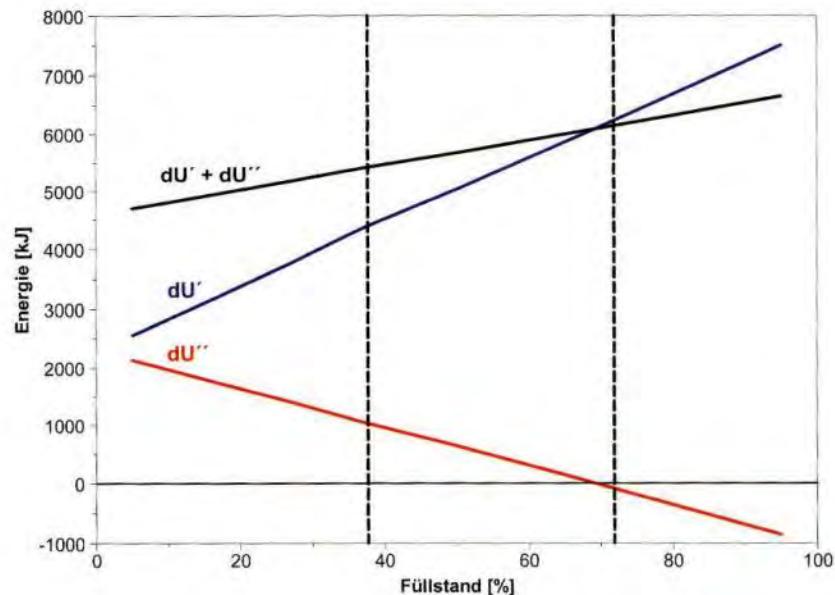
$$\frac{dp}{dt} = \frac{Q}{V} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial u}{\partial p} \right)_\rho$$

$$dQ_a = m' du' + m'' du'' + dm''(u'' - u')$$

$$\frac{dU}{dt} = Q_{1,2} + A_{1,2} + m_e \cdot h_e - m_a \cdot h_a - p \cdot \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{dU}{dt} = \rho \cdot V \cdot \frac{du}{dt} + \rho \cdot u \cdot \frac{dV}{dt} + V \cdot u \cdot \frac{d\rho}{dt}$$

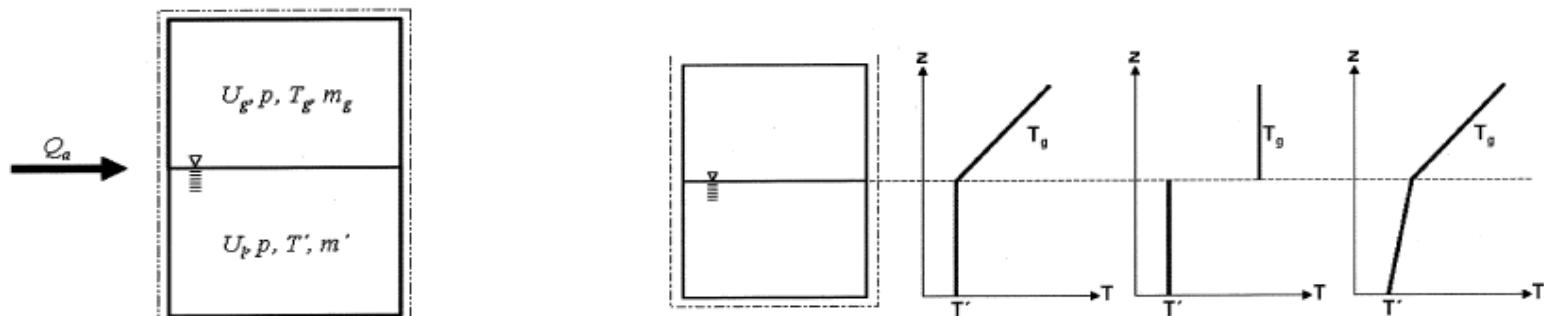
$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= \frac{1}{\rho V \left(\frac{\partial u}{\partial p} \right)_\rho} \cdot \left\{ Q_{1,2} + A_{1,2} + m_e \cdot \left[h_e - h - \rho \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial \rho} \right)_p \right] \right\} - \\ &\quad - \frac{1}{\rho V \left(\frac{\partial u}{\partial p} \right)_\rho} \cdot \left\{ m_a \cdot \left[h_a - h - \rho \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial \rho} \right)_p \right] + \rho^2 \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial \rho} \right)_p \cdot \left(\frac{dV}{dt} \right) \right\} \end{aligned}$$



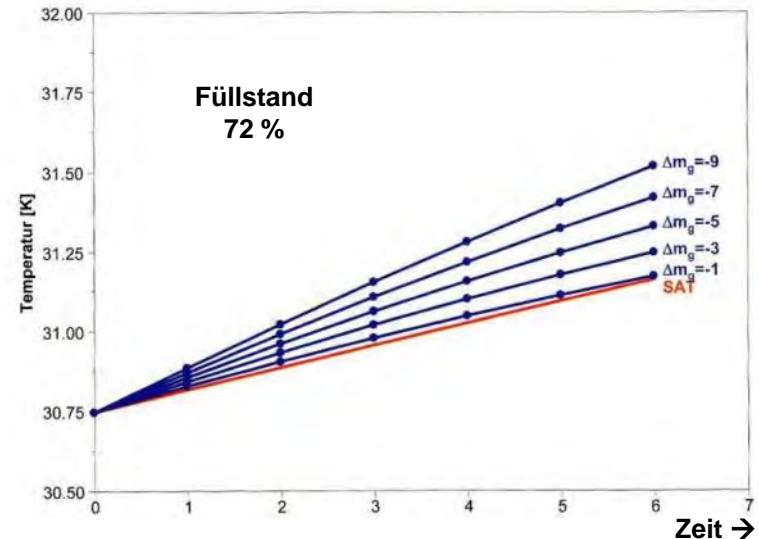
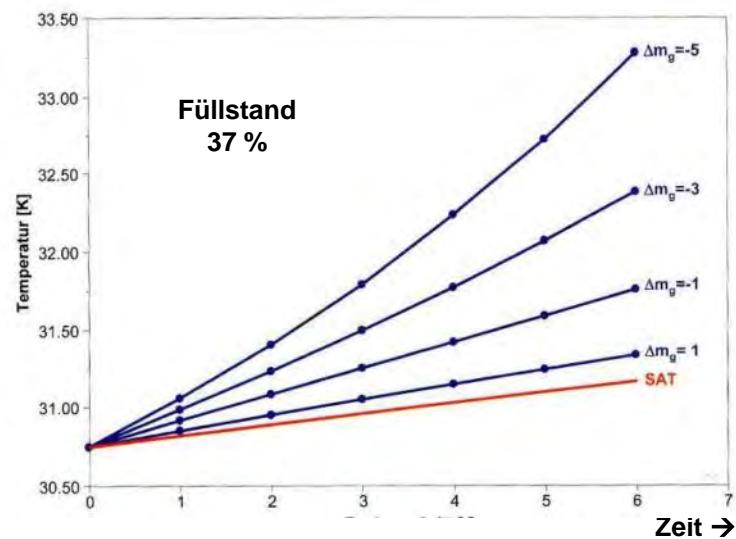
[Eichlseder/Klell, Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Vieweg + Teubner 2008]

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

LH₂- Dewartank: thermodyn. Beschr.



Temperaturverläufe (unterschiedliche Stratifikation)

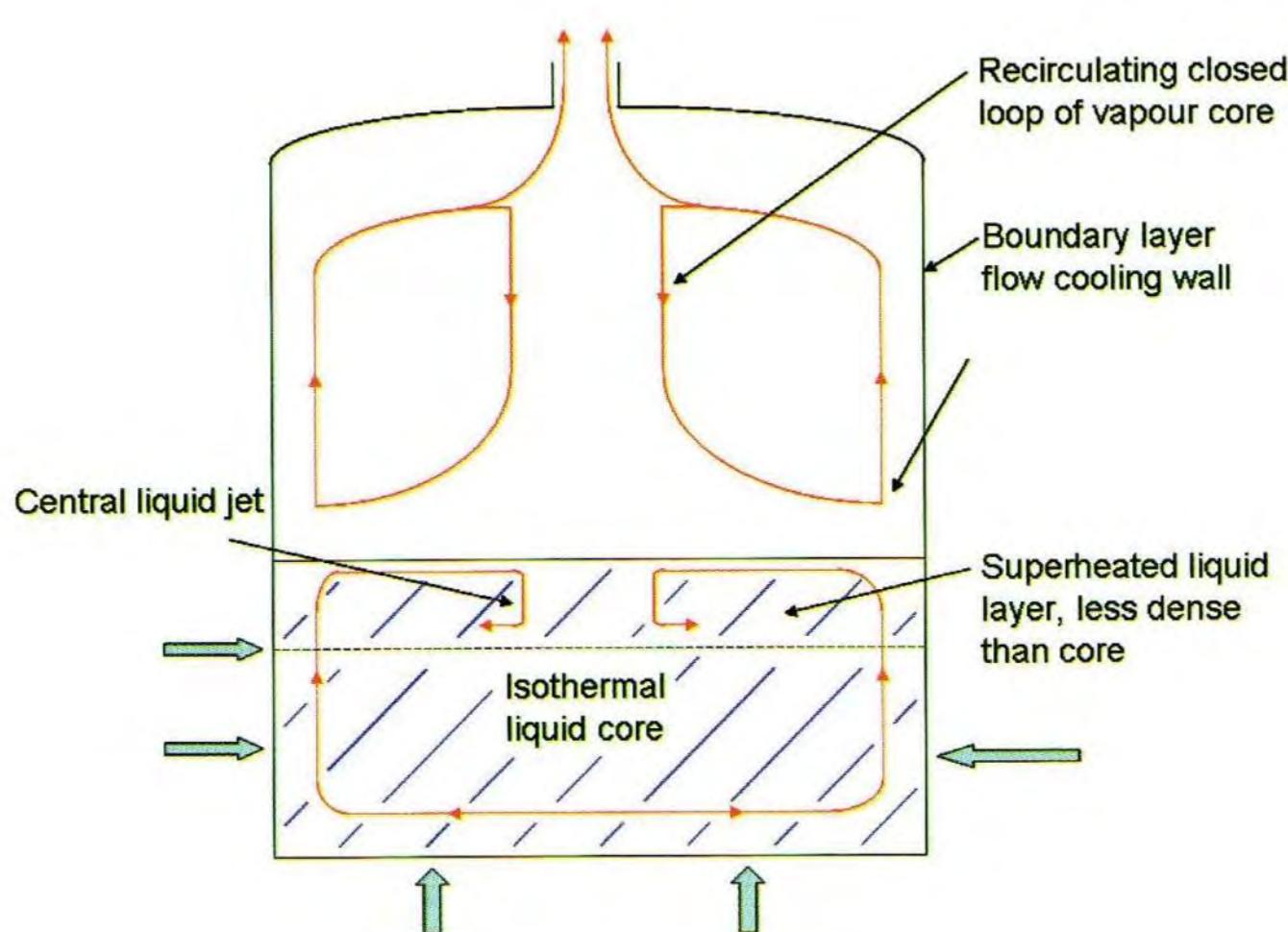


Temperaturanstieg überhitzter Dampf bzw. Phasengrenze (SAT); Δm_g : verdampfte Menge

[Eichlseder/Klell, Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Vieweg + Teubner 2008]

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

LH₂- Dewartank: thermodyn. Beschr.

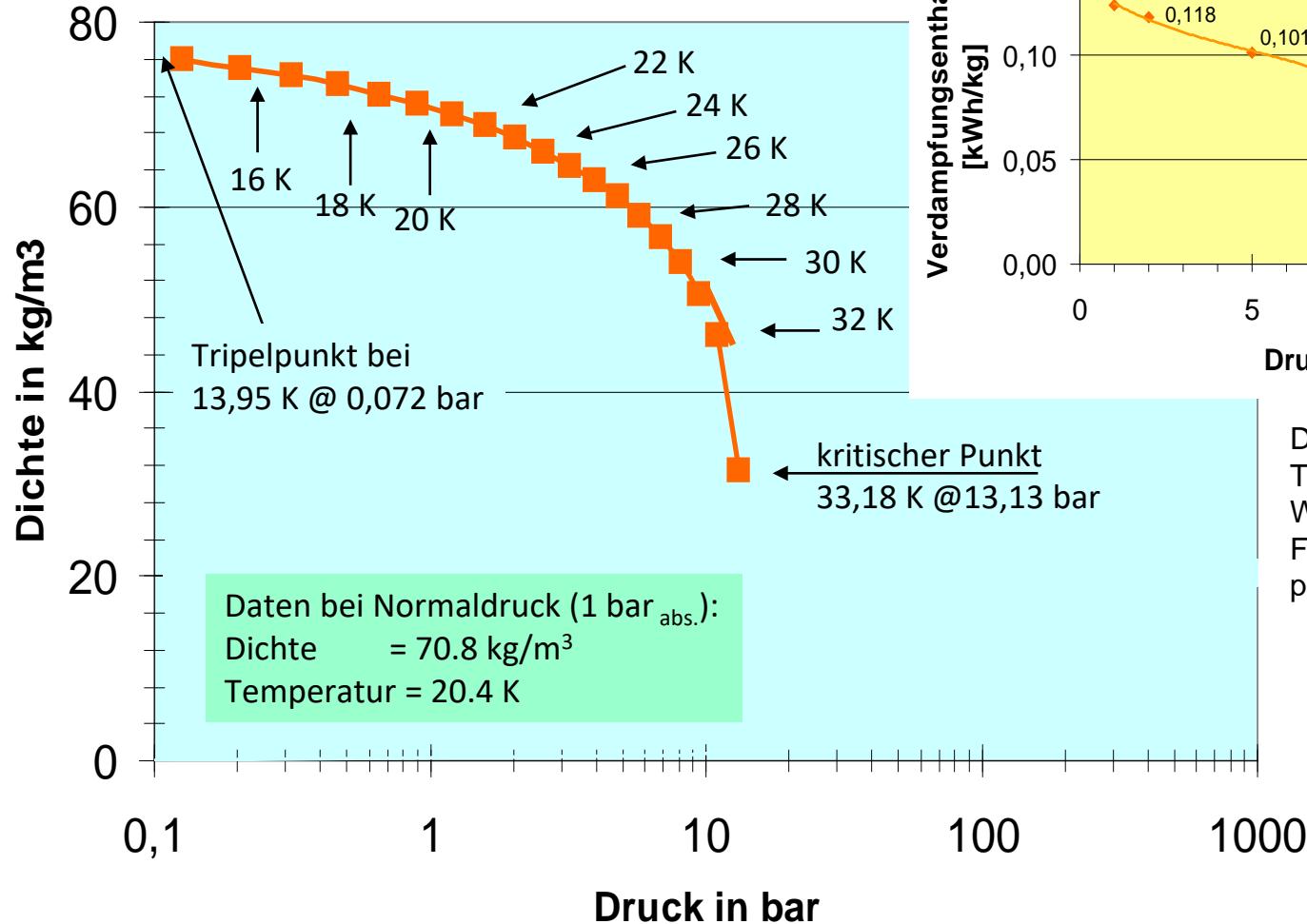


nach R. Scurlock

[Eichlseder/Klell, Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Vieweg + Teubner 2008]

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

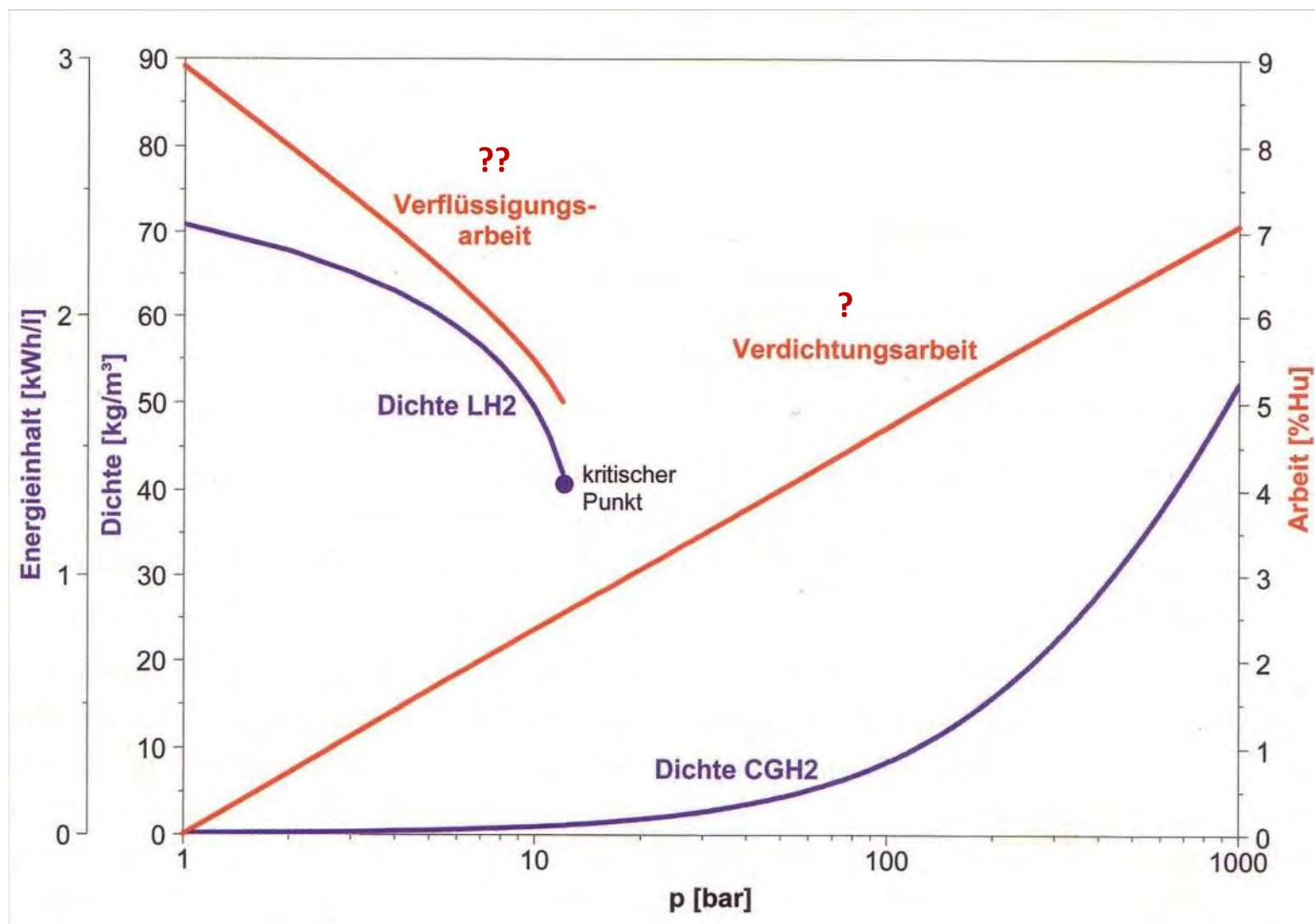
LH₂- Dewartank: thermodyn. Beschr.



Daten aus:
T-S Diagramm in:
W. Peschka,
Flüssiger Wasserstoff...,
p. 234

⇒ bei erhöhtem
Druck nimmt die
Flüssigdichte
(Tankkapazität)
sehr schnell
kräftig ab!

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks



[Eichlseder/Klell, Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Vieweg + Teubner 2008]

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

**LH₂- Dewartank:
Herstellung aufwändige
Manufaktur-Arbeit**

Testen

Sicherheitsuntersuchungen

Multi-Layer Insulation

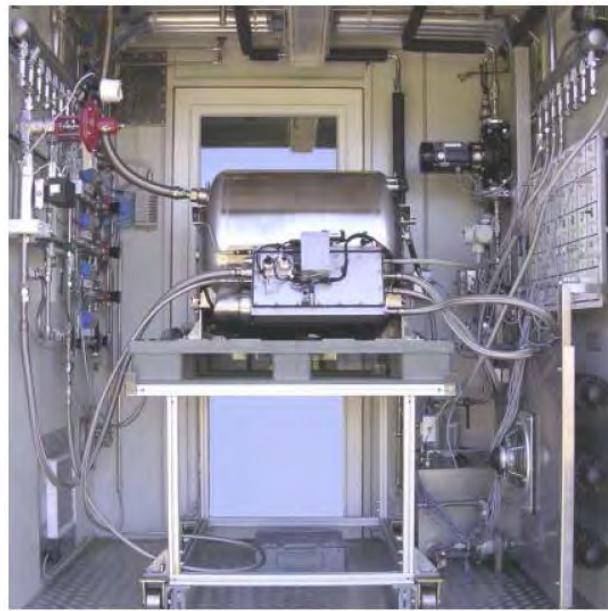
- Installation of layers of high reflecting aluminum foils and spacer of glass fiber in a clean-room
- Sewing process for fixing the foils and spacer on the inner tank



Source: MAGNA STEYR



Source: MAGNA STEYR



Source: HyCentA



Source: BMW Group

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

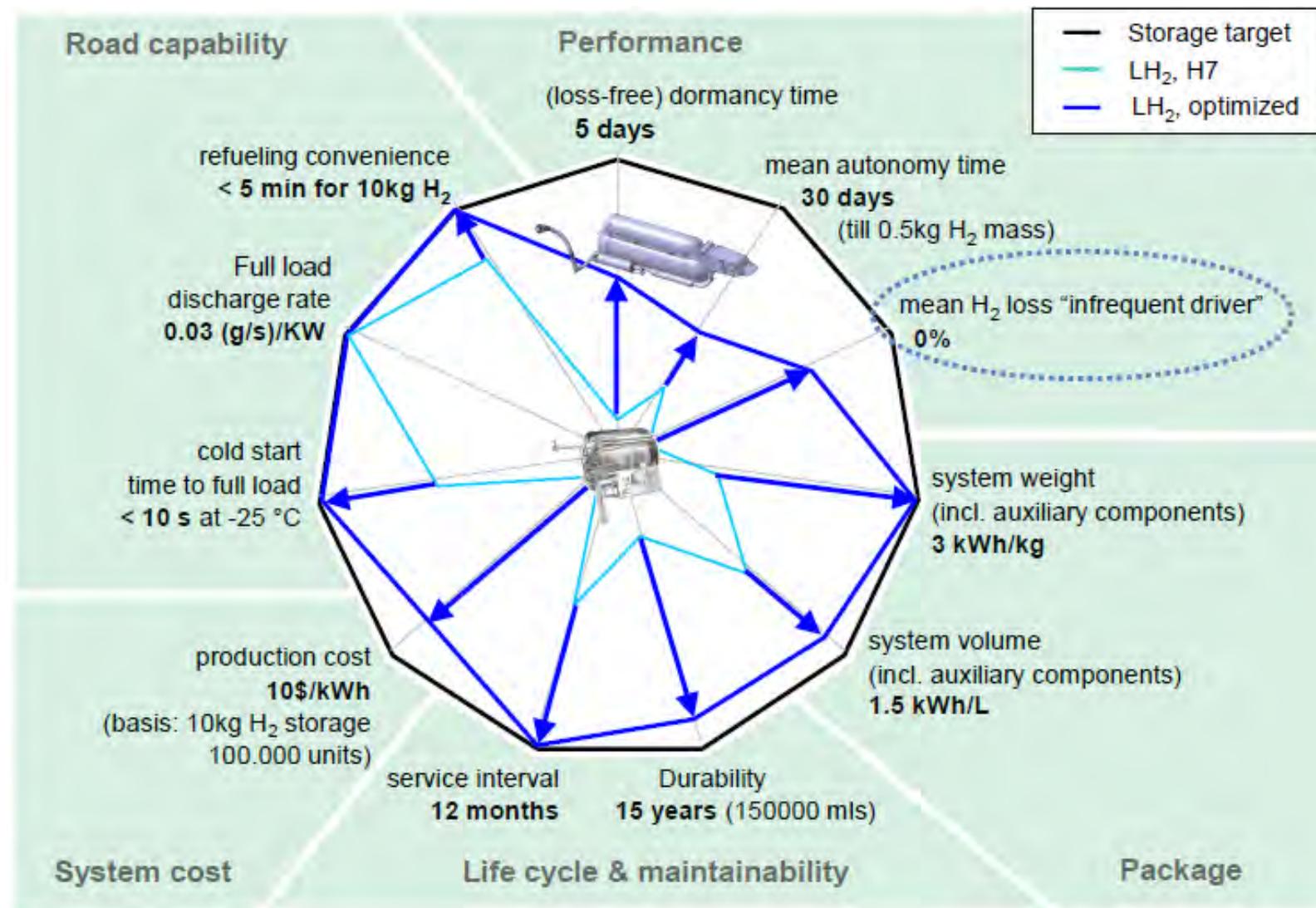


LH₂-Tanks Fa. Air Liquide (ex-MesserGriesheim)
mit/für **Verbrennungsmotor!**

> 300 km/h mit LH₂



Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks



LH₂- Fahrzeugtank: Anforderungen vs. Realisierung (Quelle: BMW)

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

Anforderungen:

- kompakt
- robust
- horizontale Anordnung
- Vakuum-Superisolierung
- LH₂-kompatible Ventile, Wärmeübertrager
- Füllstandsmessung
- max. **2 ... 6 W** Wärmeeinfall
- ...
- Wärmebrücken durch
 - Isolation (60-80 %)
 - Rohre (~ 10 %)
 - Stützen (10-30 %)
 - elektr. Leitungen

Nutzvolumen: 140 l

max. Druck: 7 bar

boil-off: 4 % pro Tag (4 ... 5 l_{liq} pro Tag)

Langzeitvakumschutz: Getter-Material



Bild: BMW

⇒ LH₂-Tanks (Wasserstoff zweiphasig)

für Pkw

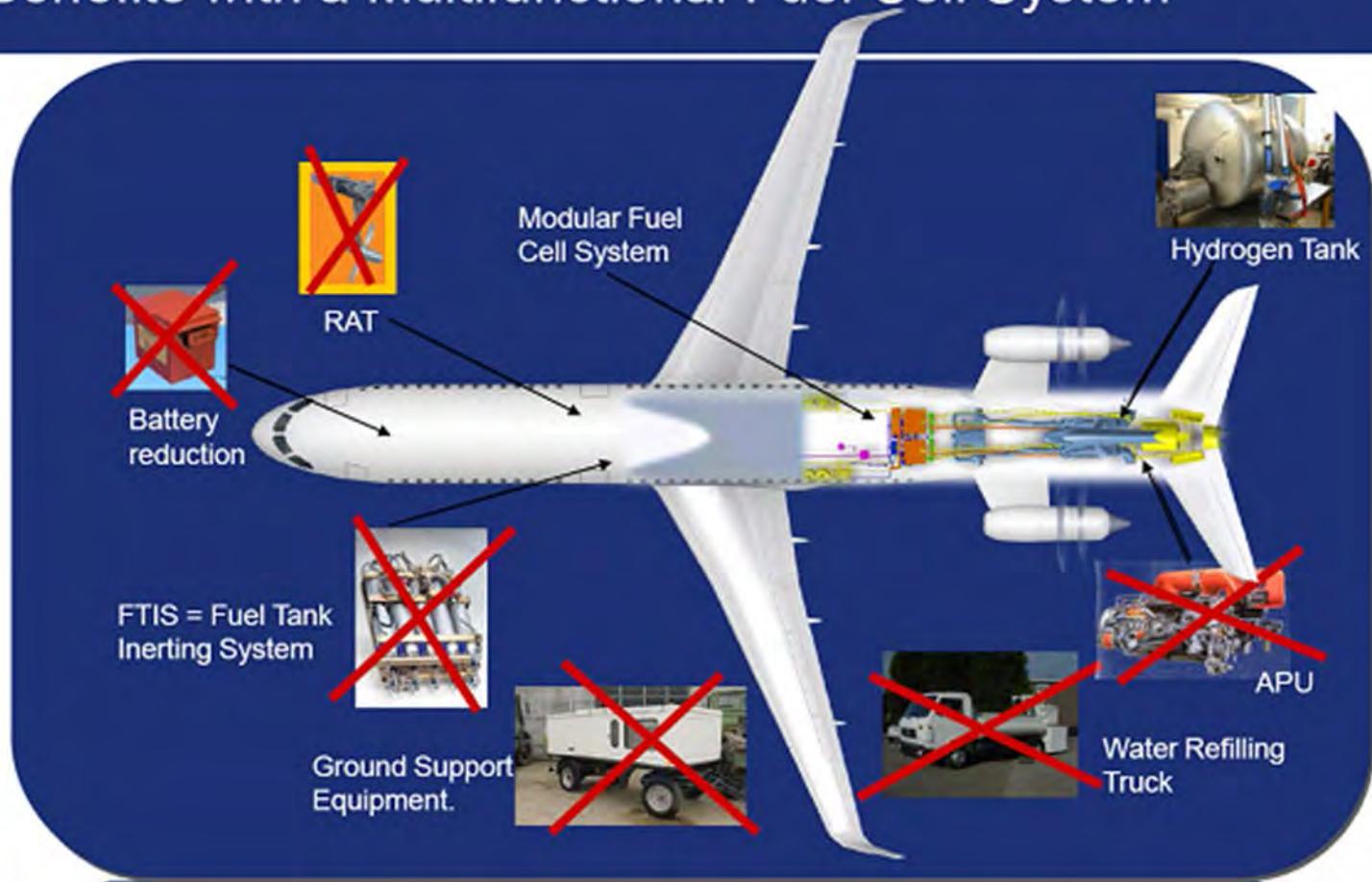
nicht mehr weiterverfolgt

Wasserstoff: LH₂-Fahrzeugtanks

Luftfahrt als neue Anwendung LH₂- Tank !?

- Ersatz Auxiliary Power Unit APU → derzeit nicht weiterverfolgt
- ggf. gesamte Bord-Elektroversorgung → derzeit nicht weiterverfolgt

Benefits with a Multifunctional Fuel Cell System



Emission reduction

Weight reduction

DOC reduction



aktuelle Initiativen: clean aviation; LuFo VI-2 / -3, LuFo VII-1 – Förderprojekte

LH₂-Tanks im Rumpf!? in Tragflächen!? in Gondeln!?

LH₂ → H₂ → Brennstoffzellen → elektr. Antrieb

LH₂ → H₂ → konvent. Turbinentriebwerk

Introducing Airbus **ZEROe**

Turboprop



<100

Passengers



Hydrogen
Hybrid Turboprop
Engines (x 2)



1,000+nm

Range



Liquid Hydrogen
Storage & Distribution
System

Blended-Wing Body



<200

Passengers



Hydrogen
Hybrid Turbofan
Engines (x 2)



2,000+nm

Range



Liquid Hydrogen
Storage & Distribution
System

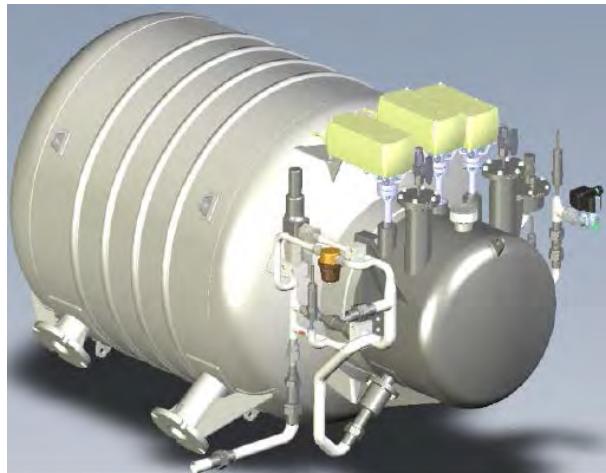
Turbofan



AIRBUS

H_2 / LH_2 als Energieträger: erwartete Anwendungen Mobilitätssektor

1 kg H_2 entspricht 4 kg Kerosin



LH₂ Tank for Aviation

228 l / 6.3 bara
25 W heat inleak

erwartet:

CGH₂-Tanks
~ 30 kg/kg_{H2}

LH₂-Tanks
3...5 kg/kg_{H2}

derzeit: 12 kg/kg_{H2}

Pierre Crespi (head R&D),
Liquid Hydrogen for Aviation
ECD – Europ. Cryogenic Days
3./4. Nov. 2021

Cruise ships
10 T/day LH_2



Material handling vehicles
100 kg/day per site



Buses
20 kg/day per bus



Drones

Individual cars
100-200 kg/day per station



Bicycles & scooters



LH₂ als Energieträger: Anwendungen maritim

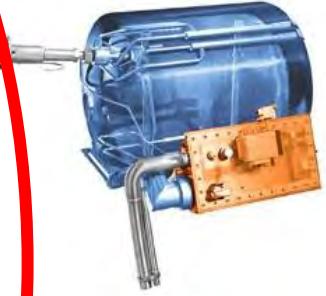
MF Hydra
worldwide first H₂ ferry
Hjelmeland - Nesvik
start of operation: March 31, 2023



however:
LH₂ supply
(by diesel trailer)
from Linde Leuna

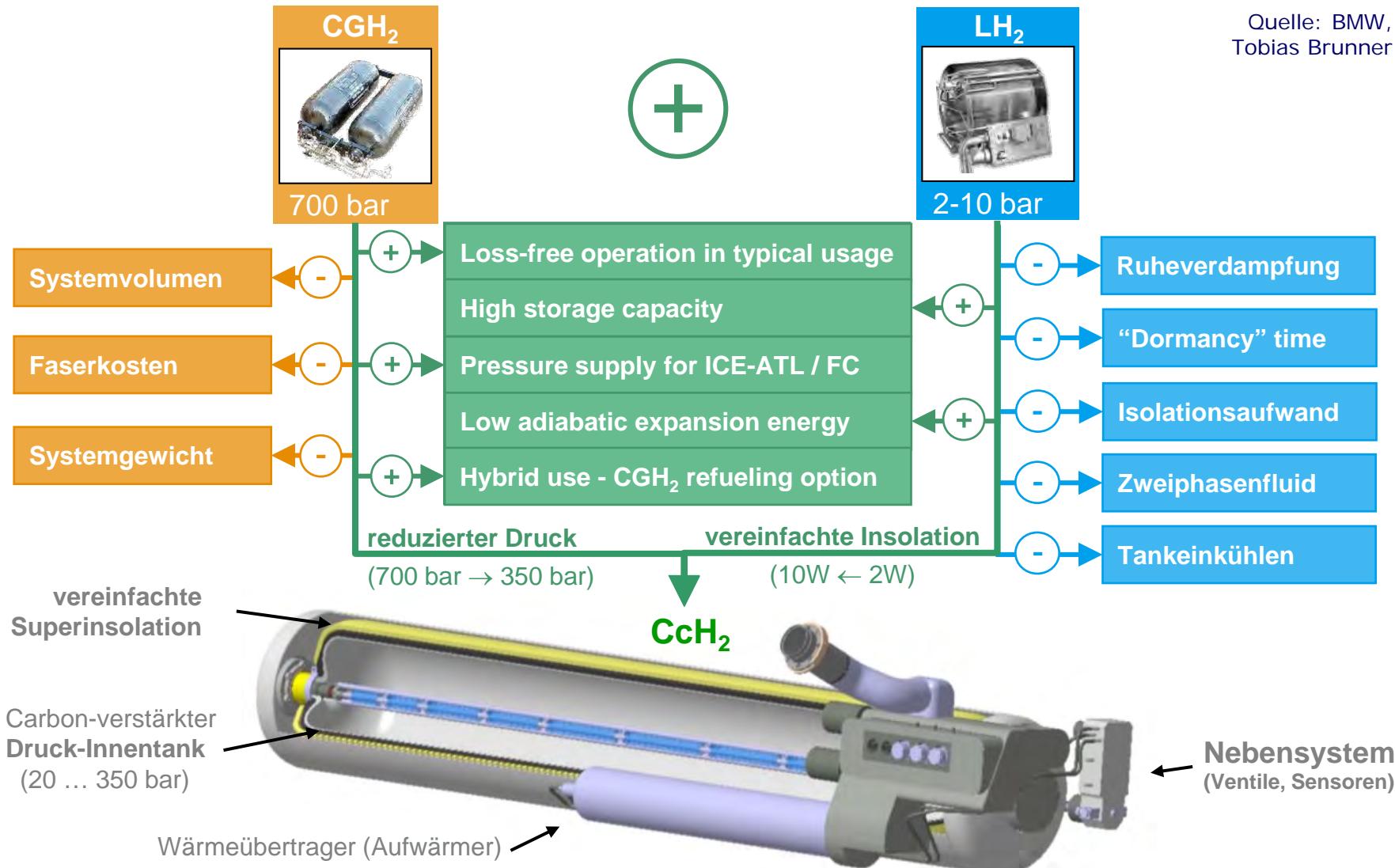


Wasserstoff: CcH₂-Fahrzeugtank (Wasserstoff tiefkalt-überkritisch)

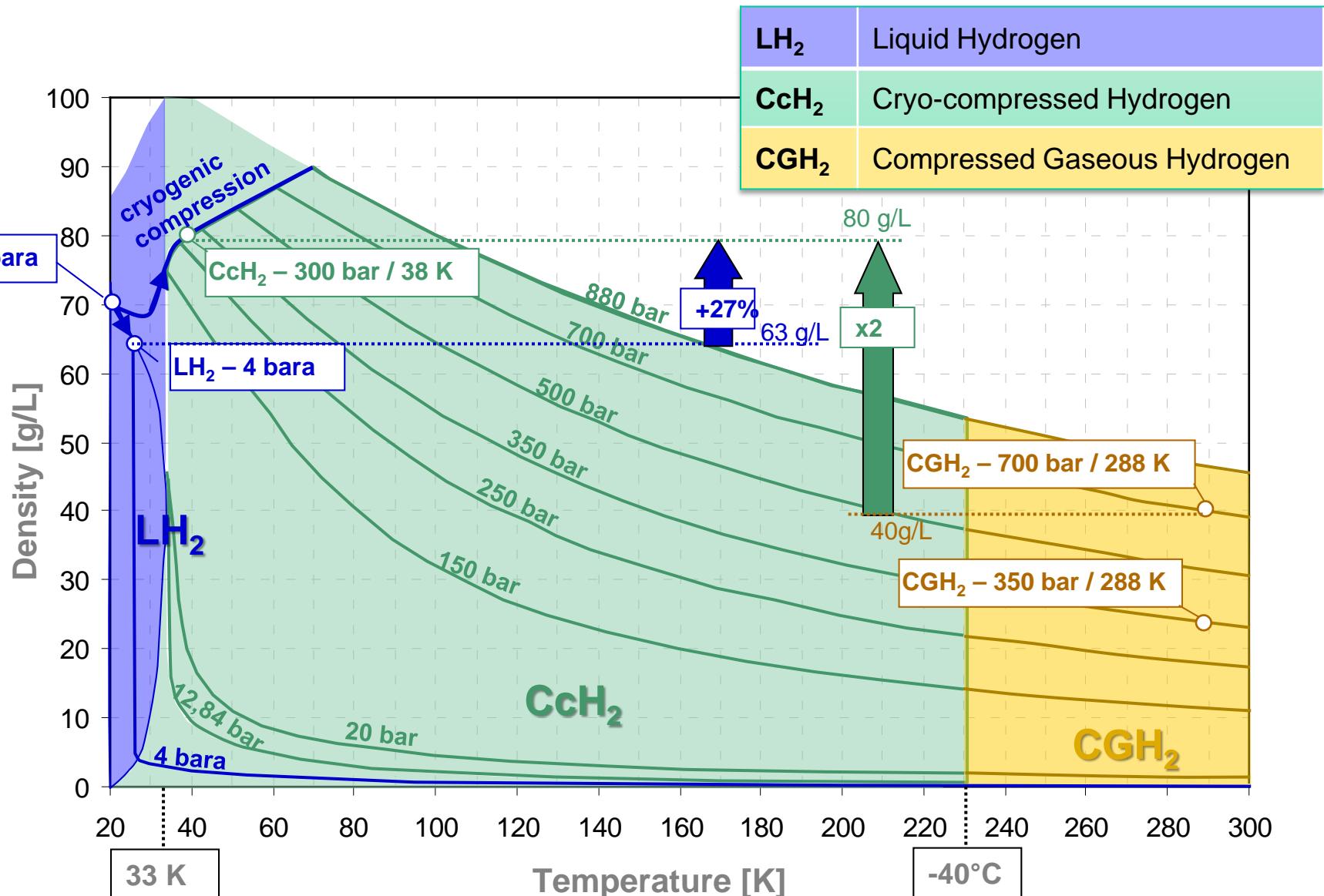
Druckgas, warm (CGH ₂)	Cryocompressed (CcH ₂)	flüssig (LH ₂)	Festbettspeicher
 Bild: Dynetek	 Bild: BMW	 Bild: BMW	<ul style="list-style-type: none">• Physisorption• Metalhydride• komplexe Hydride• chem. Bindung
1 kg - 6 kg ein bzw. mehrere Einzelbehälter	4 kg - 12 kg therm. isolierter Drucktank	7 kg - 12 kg therm. isolierter Dewarbehälter	

Wasserstoff: CcH₂-Fahrzeugtank (Wasserstoff tiefkalt-überkritisch)

geschickte Kombination der jeweiligen Vorteile



Wasserstoff: CcH₂-Fahrzeugtank (Wasserstoff tiefkalt-überkritisch)



Quelle: Tobias Brunner, BMW

Fertigstellung Testfahrzeug BMW: 2015/2016

Wasserstoff: Anwendung in der Grundlagenforschung

H₂ - Neutronenmoderator für ESS Lund / Schweden

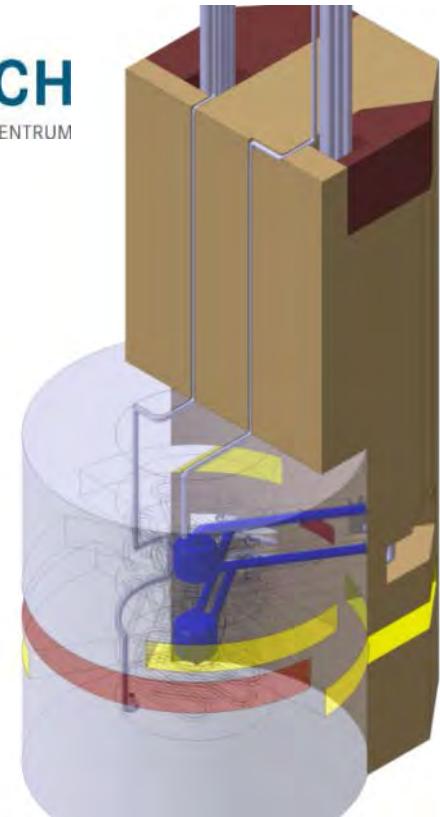


European Spallation Source ESS:
2 GeV Protonenbeschleuniger + Target;
22 Neutronstreu-Messplätze; 2019 fertig (?)

⇒ H₂ tiefkalt benötigt zur Abbremsung schneller Neutronen
Neutronen-Endenergie entspricht therm. Energieniveau Moderator
ebenso: Oak Ridge Spallation Source / USA
J-PARC Spallation Source / Tokai, Japan

Aufgaben:

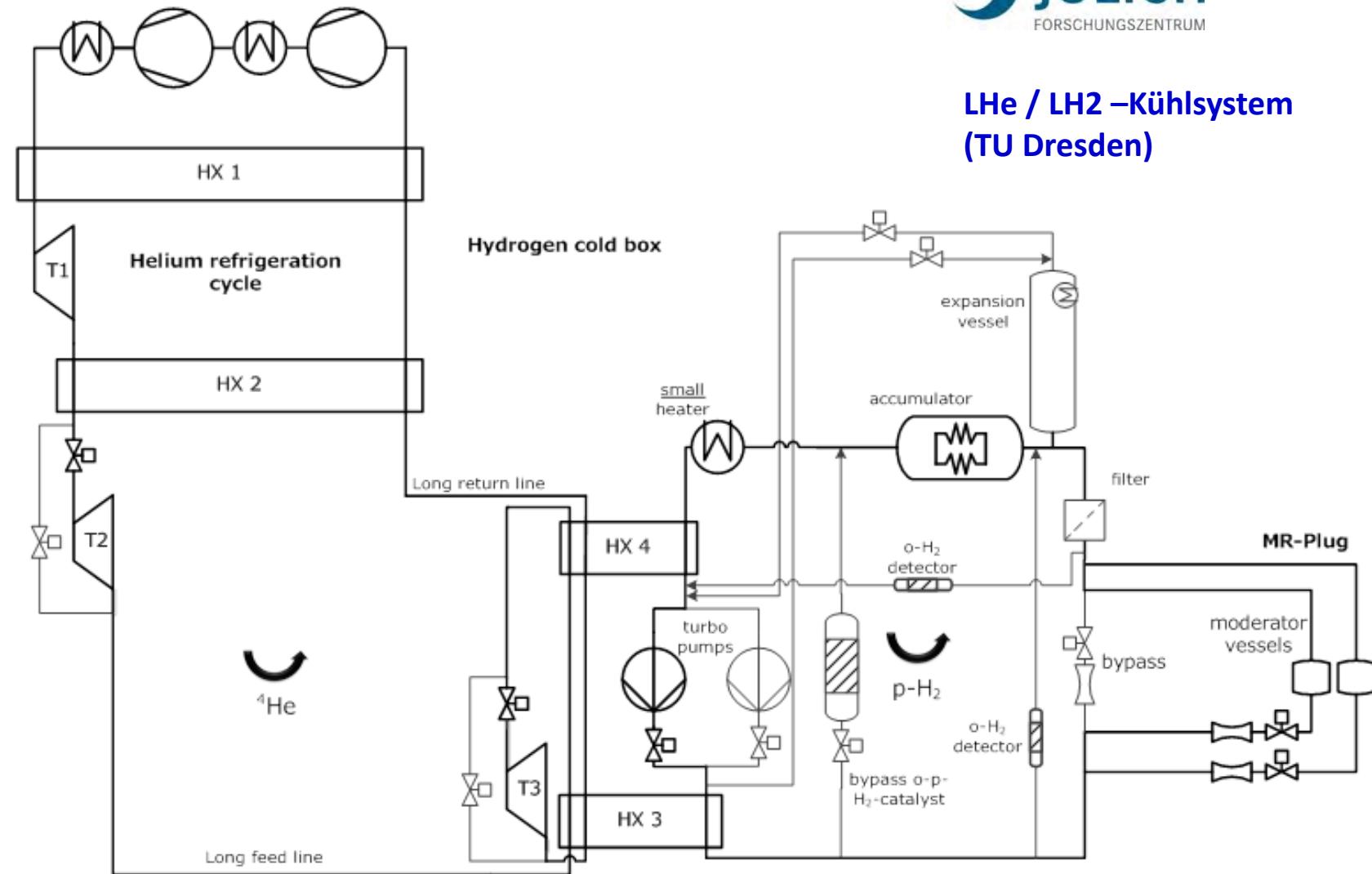
- Kühlung Moderatorbehälter (20 kW @ 17 ... 20 K; 15 bar / 0,8 kg/s)
- p-o – Umwandlung unter Bestrahlung kompensieren
- LH₂ - Umwälzpumpe



ESS Targetblock mit
kaltem Moderator (blau)

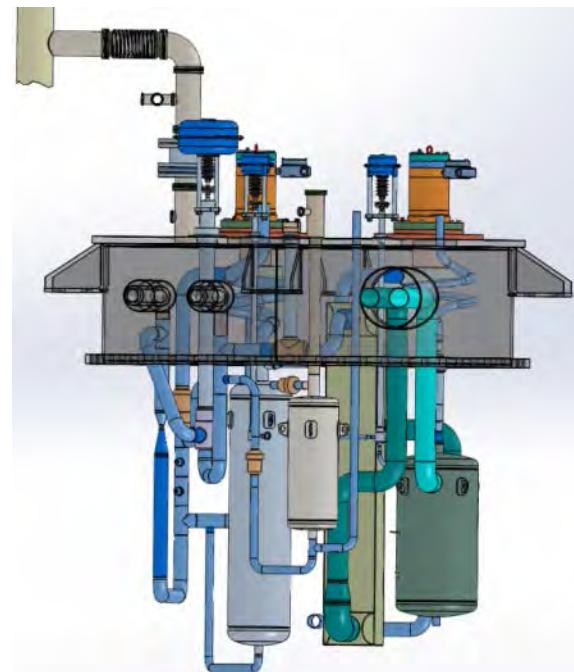
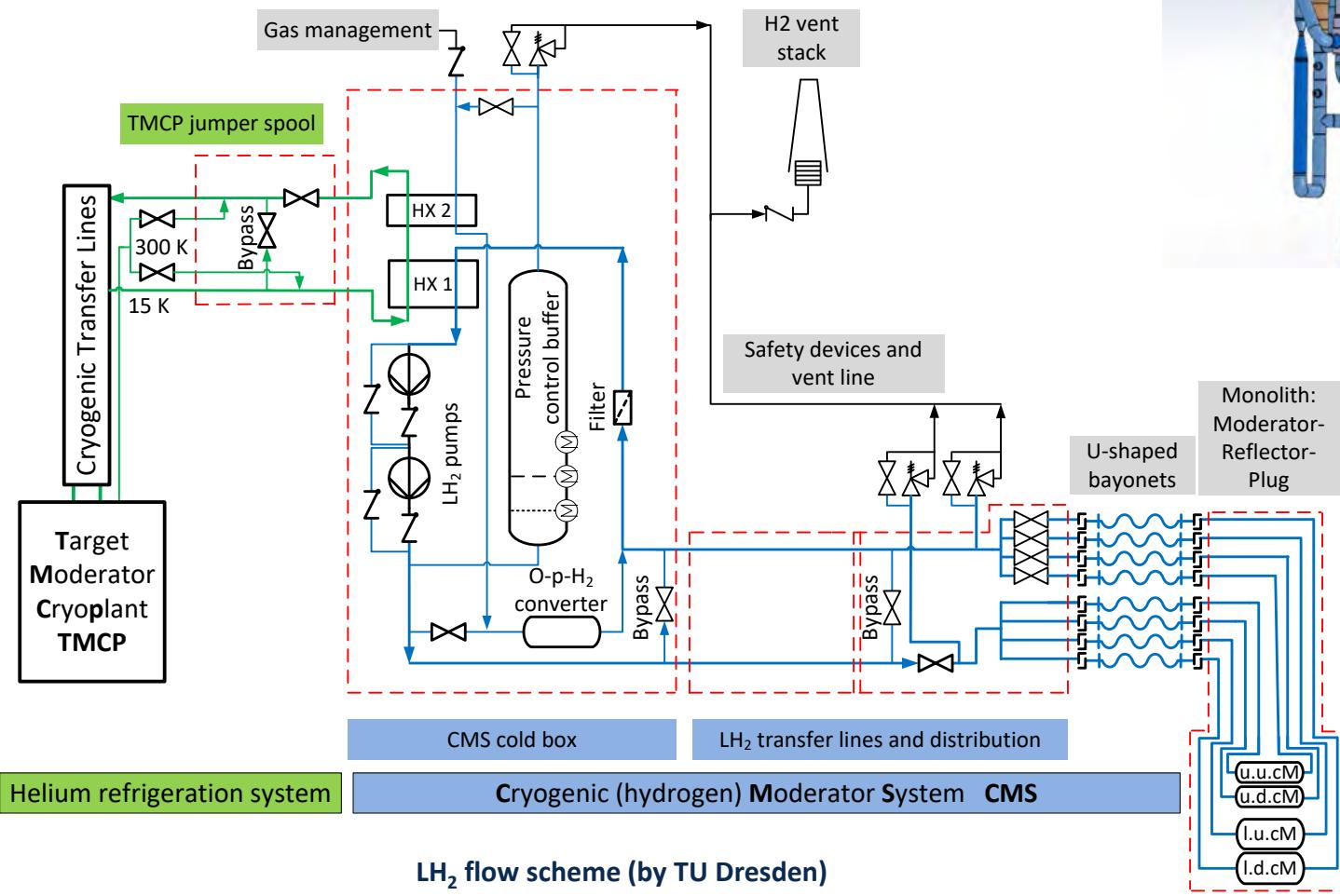
Wasserstoff: Anwendung in der Grundlagenforschung

LH₂ - Neutronenmoderator für ESS Lund / Schweden



Wasserstoff: Anwendung in der Grundlagenforschung

LH₂ - Neutronenmoderator für ESS Lund / Schweden



LH₂ coldbox

design: TU Dresden
fabrication: FZ Jülich



4 moderator boxes

Wasserstoff: Anwendung in der Grundlagenforschung

Parallelprojekt LH₂ Neutronenmoderator (mit FZ Jülich und TU Dresden,
Professur f. Kernenergietechnik):



High Brilliant neutron Source – HBS

experiments with a low neutron flux

D₂O warm moderator + 17 K cryogenic moderator volume (280 cm³)

moderator properties to be compared: CH₄ (solid), Mesithylene C₉H₁₂ (solid), LH₂ (liquid)

neutron spectrum analysis, scattering angle distribution



⇒ nur 30 m
von uns entfernt

Nuclear experimental reactor
for research and education

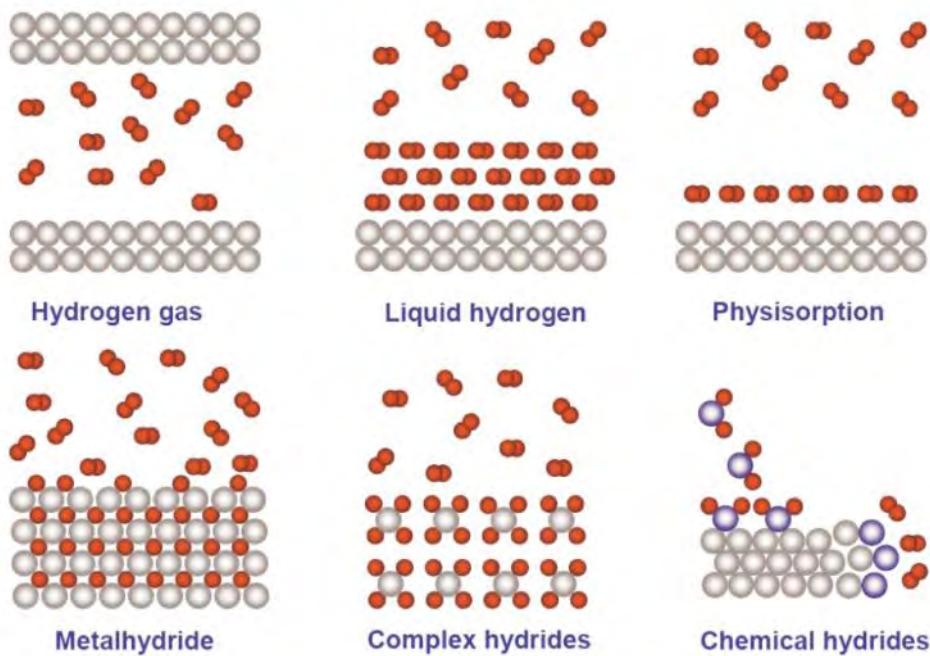
built 1978, up-dated
uranium oxide (20 % U-235 = 794 g)
max. 2 Watt thermal power
neutron flux max. $2.5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Wasserstoff: Festbett-Speicher

Druckgas, warm (CGH ₂)	Cryocompressed (CcH ₂)	flüssig (LH ₂)	Festbettspeicher
 Bild: Dynetek	 Bild: BMW	 Bild: BMW	<ul style="list-style-type: none">• Physisorption• Metalhydride• komplexe Hydride• chem. Bindung
1 kg - 6 kg ein bzw. mehrere Einzelbehälter	4 kg - 12 kg therm. isolierter Drucktank	7 kg - 12 kg therm. isolierter Dewarbehälter	

Wasserstoff: Festbett-Speicher

HYDROGEN STORAGE



source: StoreHy; P. Mauron, A. Züttel; Solid Storage Technology

Wasserstoff in Festkörper-Matrix:

Physisorption: **MOF** (metal-organic framework)

Metalle: **Palladium, Ni**

Metall-Hydride: **Mg, Na**

Komplexe Hydride: **NaAlH₄, Mg(AlH₄)₂**

Laden: p ↑ und/oder T ↓ (exotherm)

Entladen: p ↓ bzw. T ↑ (endotherm)

Wasserstoff: Festbett-Speicher

Mean distance between hydrogen molecules

CGH₂
1 bar
300 K
3.3 nm
 5.6×10^{19} atoms cm⁻³



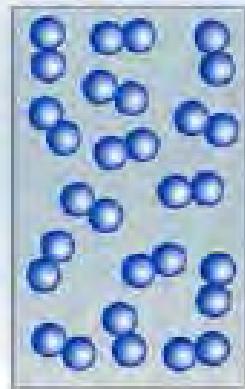
CGH₂
350 bars
300 K
0.54 nm
 1.3×10^{22} atoms cm⁻³



CGH₂
700 bars
300 K
0.45 nm
 2.3×10^{22} atoms cm⁻³



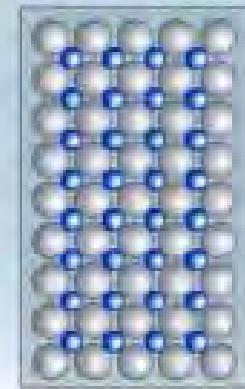
LH₂
1 bar
20 K
0.36 nm
 4.2×10^{22} atoms cm⁻³



Mean distance between hydrogen atoms

Conventional metal hydrides

0.21 nm Westlake Criterion
 10.7×10^{22} atoms cm⁻³



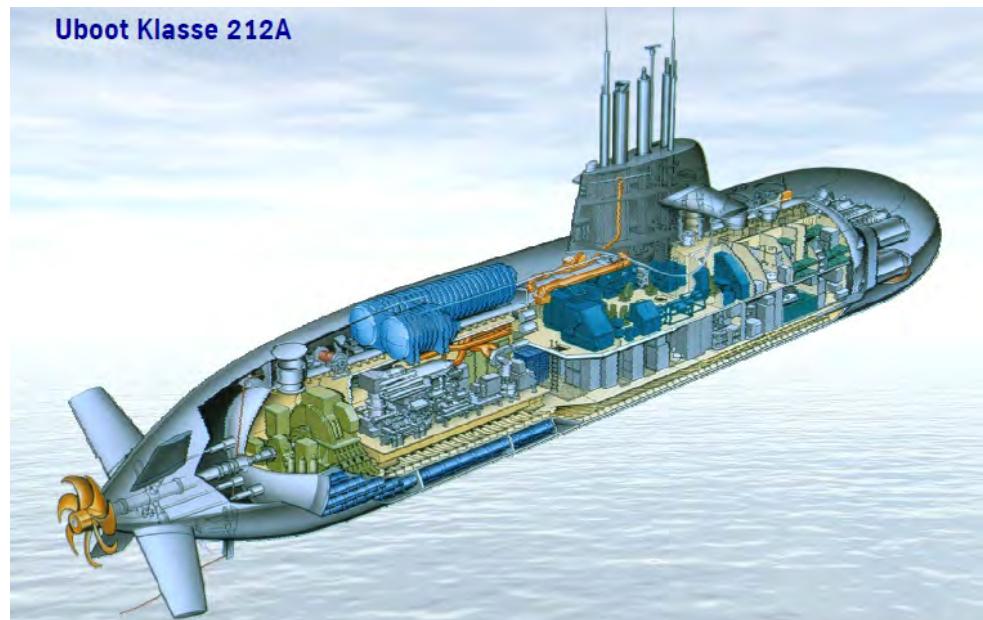
H₂-Atome auf Zwischengitterplätzen dichter gepackt als in reinem LH₂ !

Wasserstoff: Festbett-Speicher

Probleme Festmatrixspeicher:

- a) Belade-/Entladezyklen mit großem Energieeinsatz verbunden (p, T)
- b) langsames Be-/Entladen (wegen Wärmeumsatz)
- c) geringe gravimetrische Speicherdichte (1,4 8 %)
- d) Matrixmaterial teuer
- e) hohe Gesamtmasse

4 Boote bis 2010
von Dt. an Griechenland
geliefert (gesamt 2,8 G€)



einige Anwendung bisher:

H₂-Speicher U-Boote

Hydralloy: 1,5 Gew.-% H₂

Ti Zr (Mn V Fe X)₂ - Legierung

Bild: Howaldtswerke Dt. Werft