




# Wasserstoff: Speicherung; Optionen mobile Speicher

bei Umgebungstemperatur / 1 bar? ⇒



Druckgas, warm (CGH <sub>2</sub> )	Cryocompressed (CcH <sub>2</sub> )	flüssig (LH <sub>2</sub> )	Festbettspeicher; H <sub>2</sub> -Derivate
 Bild: Dynetek	 Bild: BMW	 Bild: BMW	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Physisorption</li> <li>• Metallhydride</li> <li>• komplexe Hydride</li> <li>• chem. Bindung</li> <li>• NH<sub>3</sub> ?? (30 % von H<sub>u</sub> für H<sub>2</sub>-Freisetzung nötig)</li> <li>• LOHC – Dibenzyltoluol, "Marlotherm" ?? (320 °C / 30 % von H<sub>u</sub> für H<sub>2</sub>-Freisetzung nötig)</li> </ul>
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**



← CfK – Kohlefaser/Epoxy

← GfK – Glasfaser/Epoxy

Quelle: SCI

## Wasserstoff: Speicherung; Hochdruckspeicher warm

### Fibres:

Glas  
Aramid  
**Carbon**

### Matrix Materials:

Polyester  
**Epoxy**  
Nylon



**Hoop wrapped**

### Liner:

**Al (6061 T6)**

Al (6069)

Al (70XX)

**34CrMo4**



**Fully wrapped**

### Liner:

**Al (6061 T6)**

Al (6069)

**Edelstahl**

Nylon

Polyethylen  
(Typ 4)

Quelle: Dynetek



## Wasserstoff: Speicherung; Hochdruckspeicher warm



**Vehicle Model:** Citaro City-bus

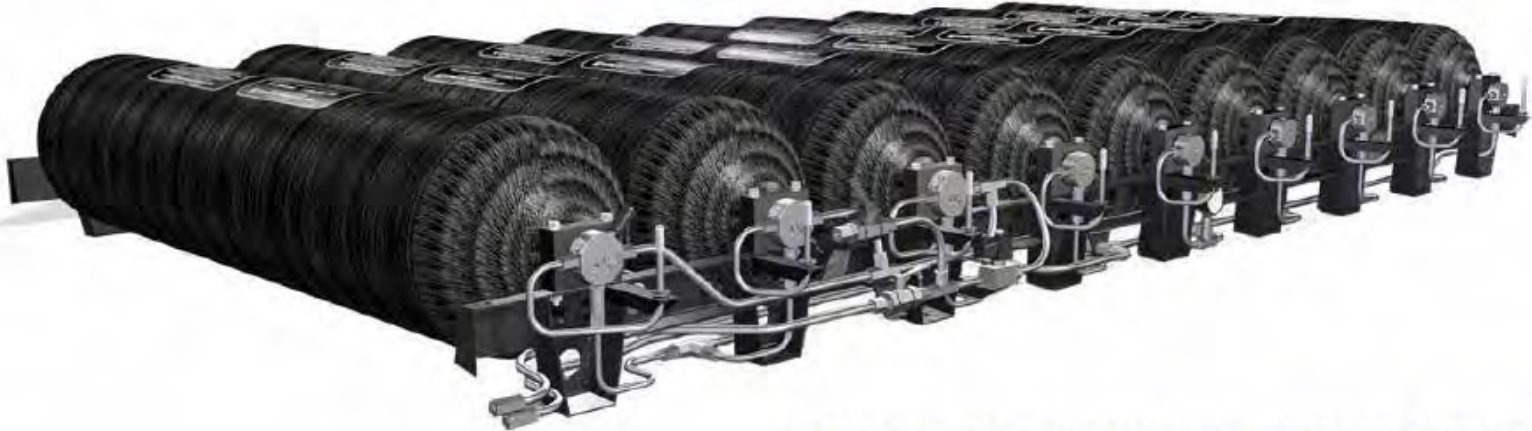
**H2 Storage Capacity:** 43 kg

**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:  $\leq 100\text{ °C}$**  (Begrenzung Tankstellen auf  $85\text{ °C}$ )

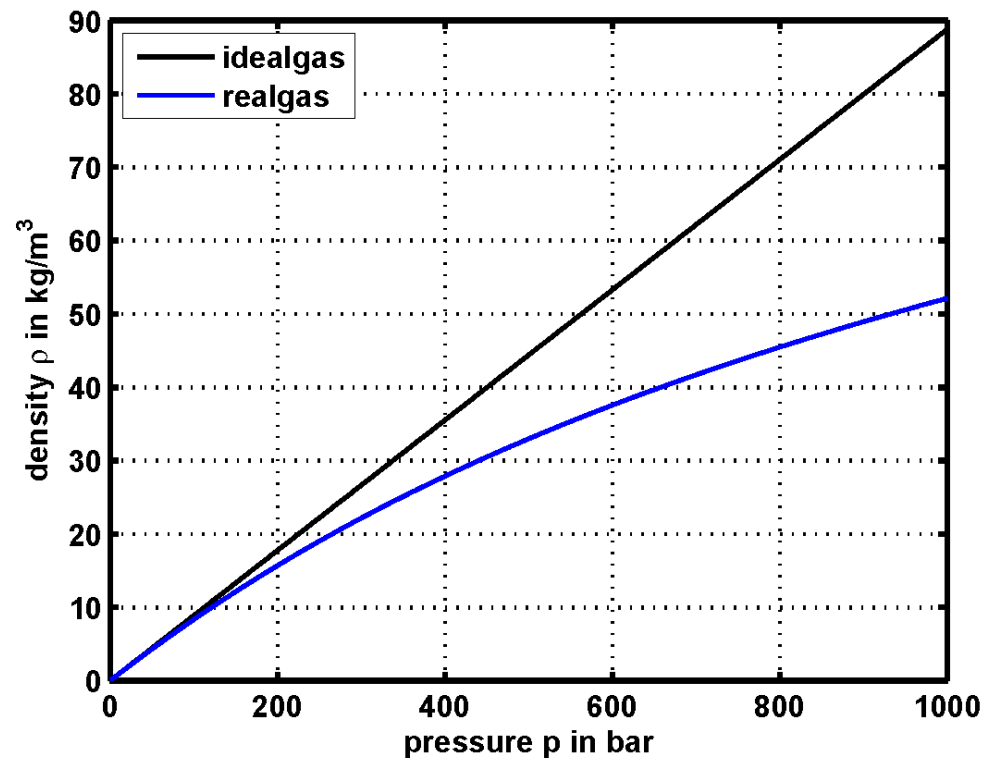
b) Befüllmenge steigt nicht linear  
mit dem Fülldruck  
(**Realgasverhalten**)

derzeit üblich:




200 bar - Druckgasflaschen

350 bar - Nutzfahrzeuge

700 bar – Pkw (, Lkw)

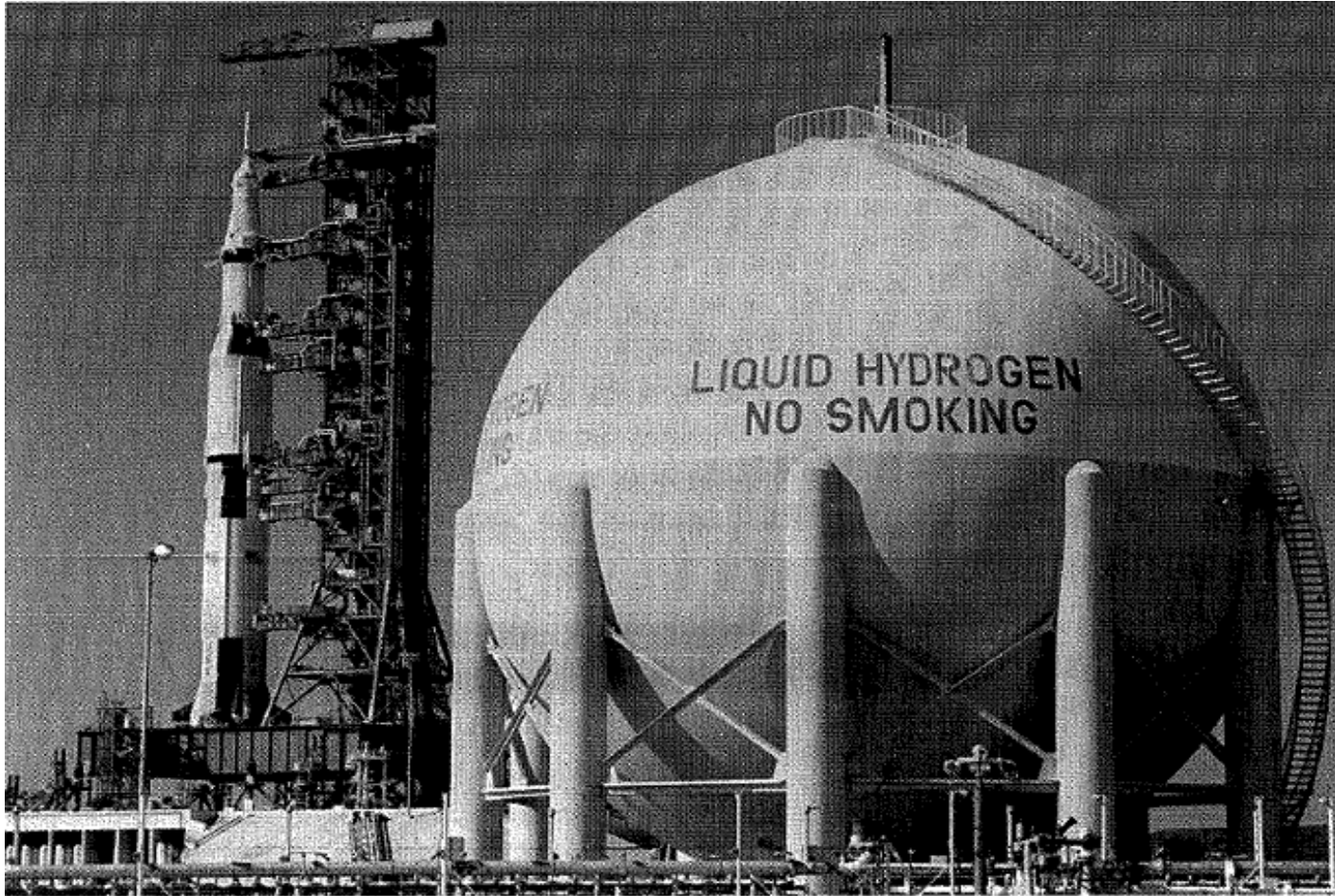


## Wasserstoff: Speicherung tiefkalt-flüssig

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

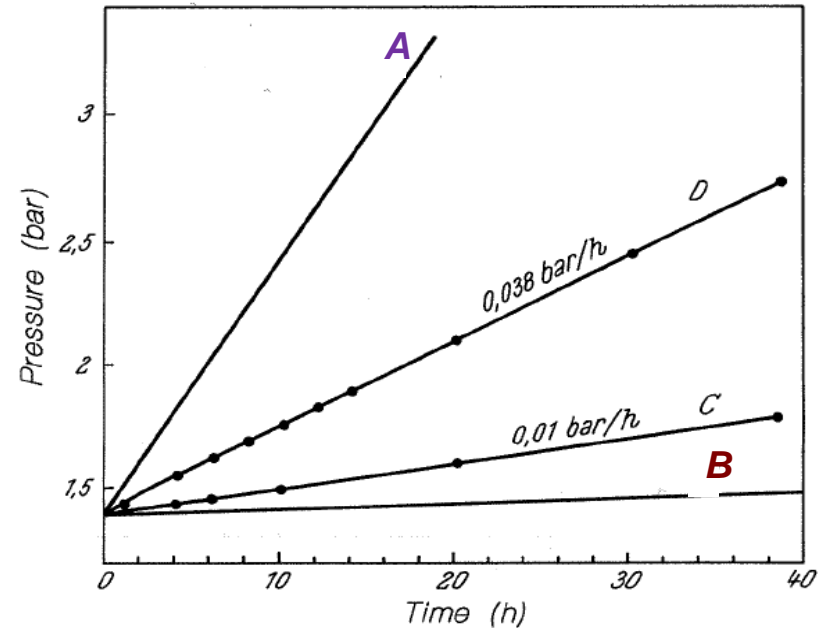
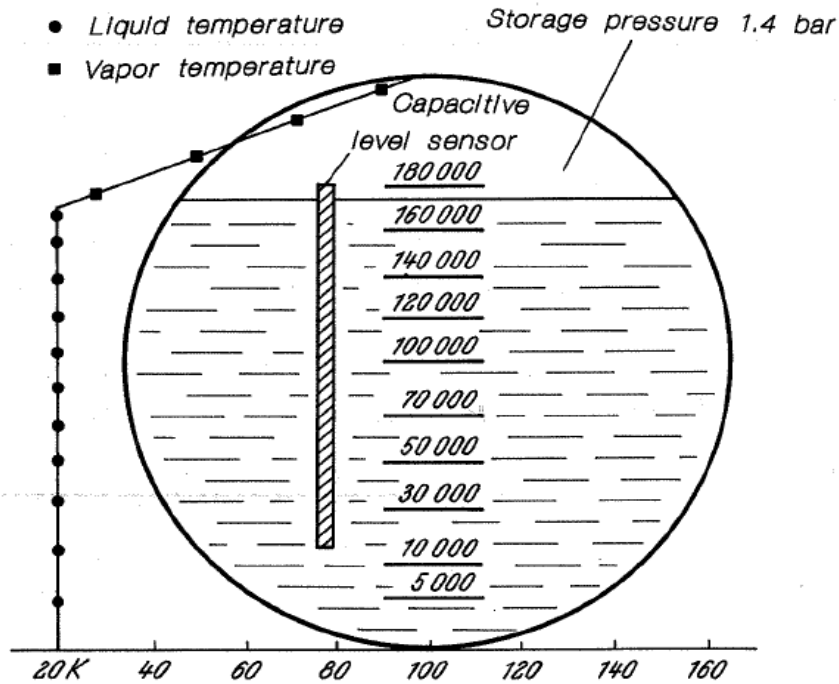


## Wasserstoff: Speicherung tiefkalt-flüssig



LH<sub>2</sub>-Tank, Kapazität 3800 m<sup>3</sup> (270 000 kg), Außendurchmesser 20 m, Perlit-Vakuumisolation, Abdampfrate 0,03%/Tag. NASA Kennedy Space Center [W. Peschka, Liquid Hydrogen]

# Wasserstoff: Speicherung tiefkalt-flüssig



A: rechnerisch, Wärmeeintrag ausschließlich durch Gasphase absorbiert

B: rechnerisch, Wärmeeintrag ausschließlich durch Flüssigphase absorbiert

C: Meßkurve, hoher Füllstand

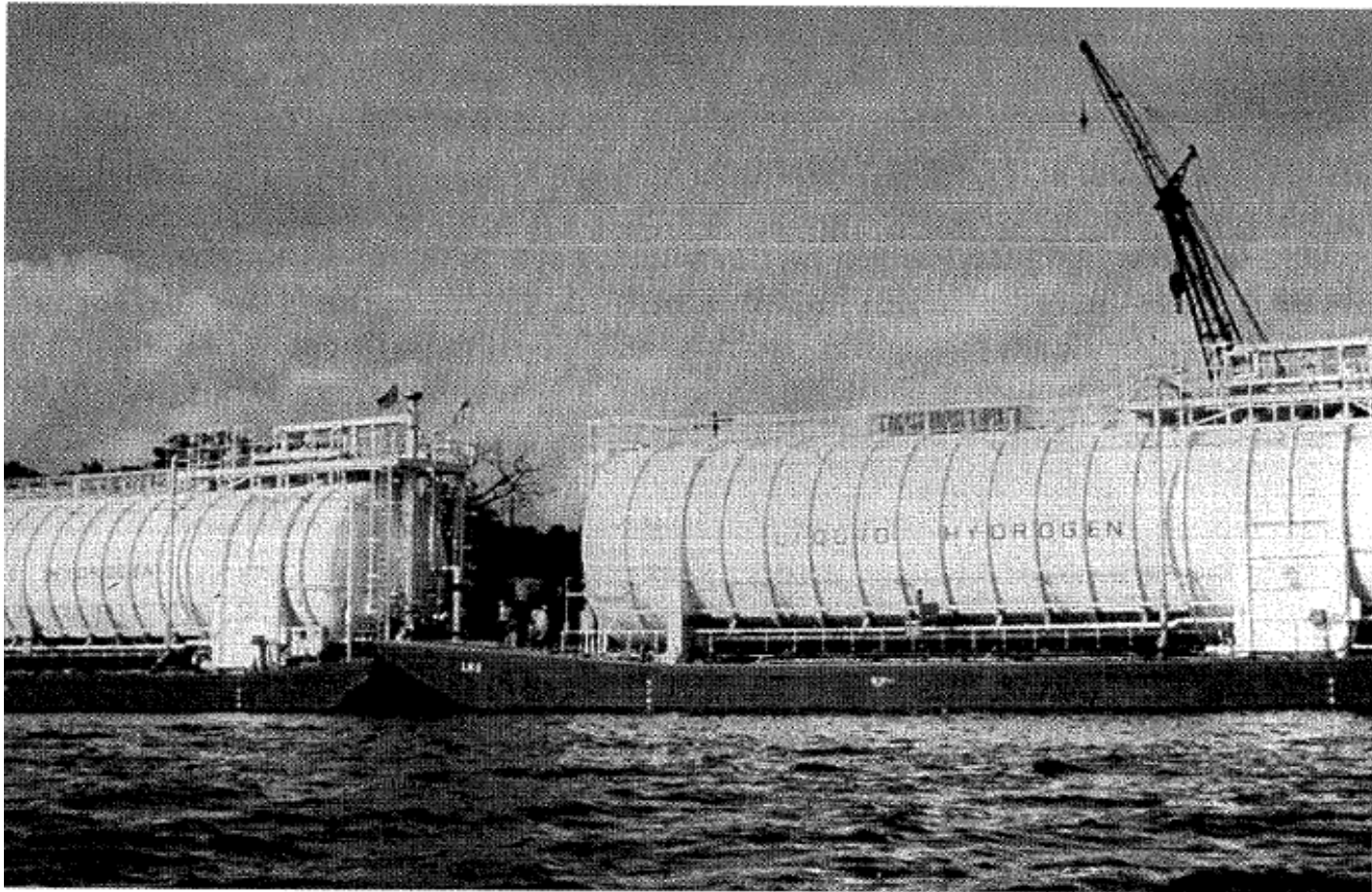
D: Meßkurve, niedrigerer Füllstand

Temperaturschichtung (oben) und Druckerhöhung aufgrund der Ruheverdampfung (rechts) innerhalb eines 180 m<sup>3</sup> LH<sub>2</sub>-Tanks

[W. Peschka, Liquid Hydrogen]



## Wasserstoff: Speicherung tiefkalt-flüssig

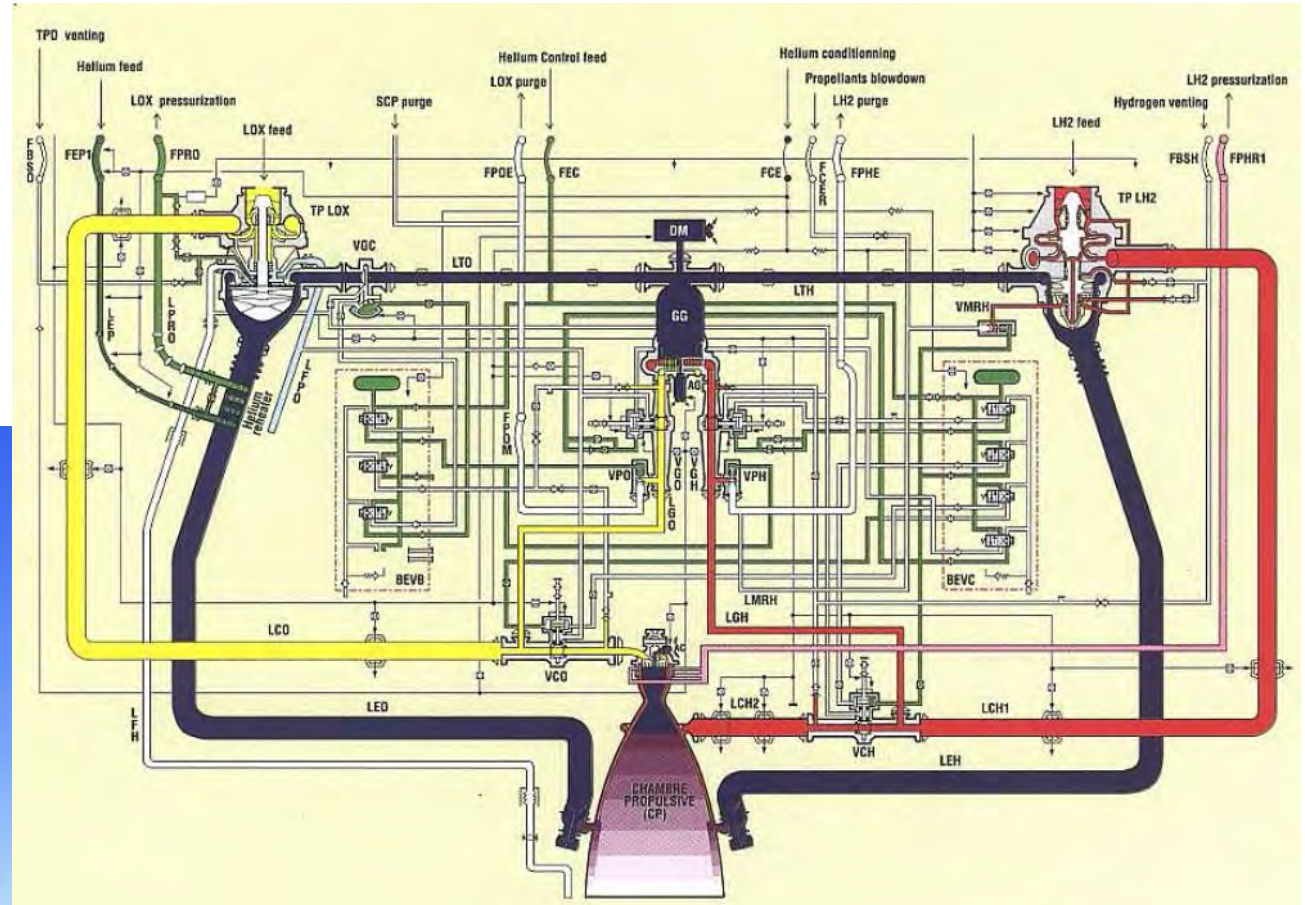


### LH<sub>2</sub>-Transportcontainer Kapazität 900 m<sup>3</sup>

(Perlit-Vakuum bzw. MLI-Vakuumisolation, LN<sub>2</sub>-Schildkühlung. Erstes H<sub>2</sub>-Abblasen z.T. erst nach 20 Tagen (dann mit H<sub>2</sub>-Abgasstrom Quirl angetrieben für Vermischung mit Luft < 4%)

[W. Peschka, Liquid Hydrogen]

# Wasserstoff: LH<sub>2</sub> als Energieträger in der Raumfahrt



## Raketentriebwerk Vulcain 2

Treibstoff / Oxidationsmittel: LH<sub>2</sub> / LOX

Schub im Vakuumraum: 1340 kN

Schub auf Erdoberfläche: 900 kN

Betriebszeit: 600 s



## Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks



***LH<sub>2</sub>-Testfahrzeug, Los Alamos National Laboratory, 1973, (links)***

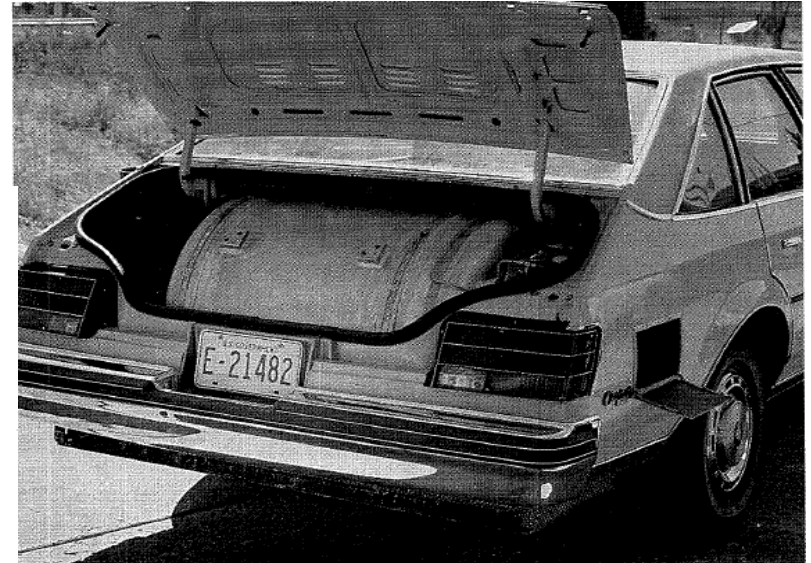
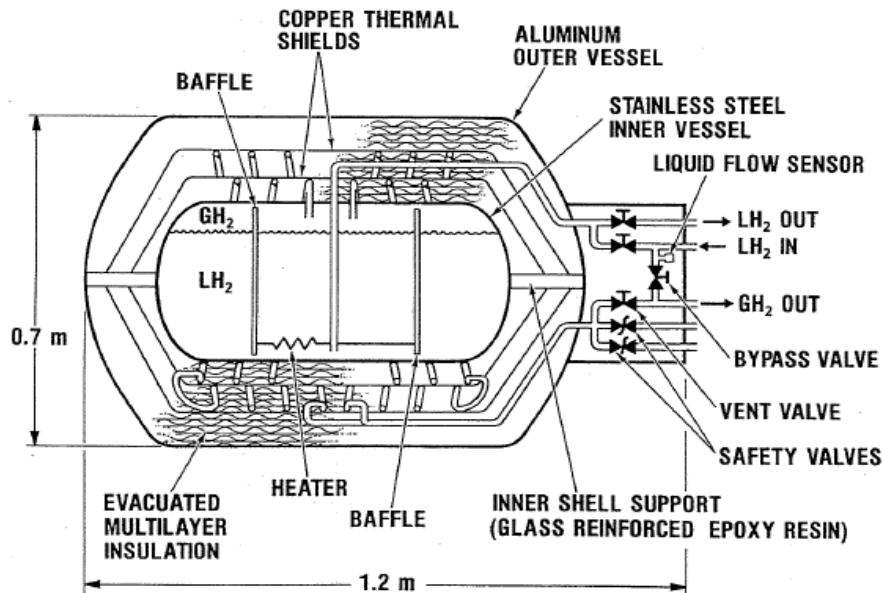
*190 l - Aluminiumdewar MVE, Leergewicht 42,6 kg, Ruheverdampfung 3,3 %/Tag*

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

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

[W. Peschka, Liquid Hydrogen]

## Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks



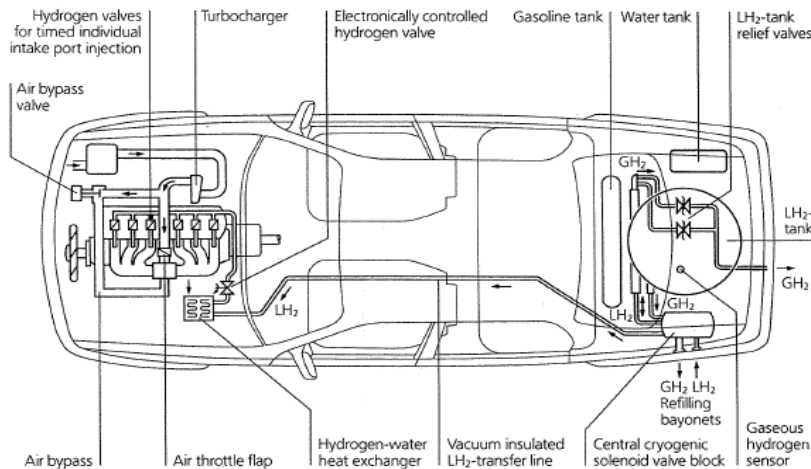
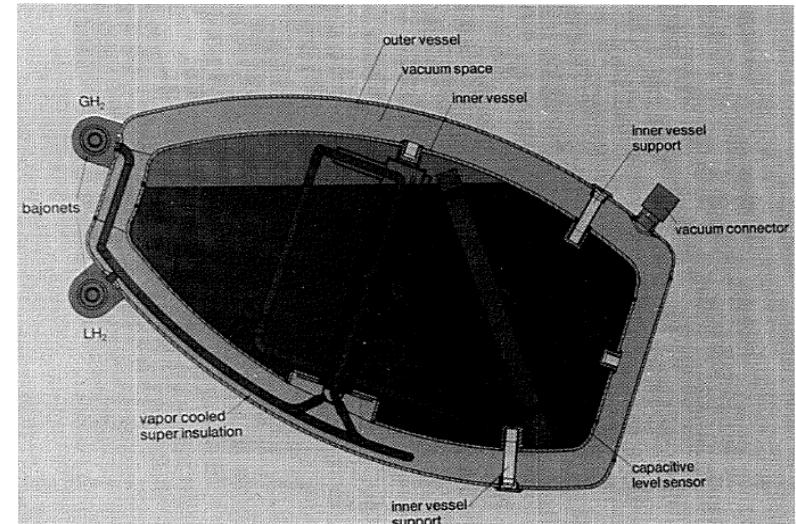
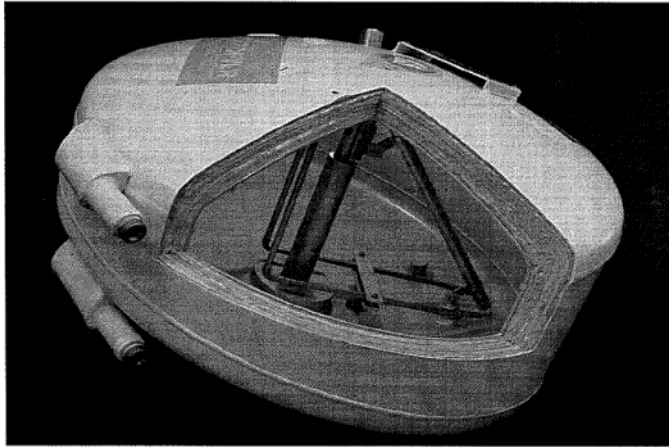
### **LH<sub>2</sub>-Dewartank LASL – DFVLR, 1980**

(V<sub>2</sub>A-Innentank 155 l, 2 x Cu-Strahlungsschild, Alu-Außenbehälter; Leermasse 156 kg, Ruheverdampfung 4 %/Tag)

[W. Peschka, Liquid Hydrogen]



# Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks



## Testfahrzeug DFVLR – BMW 745i, 1983

(erstes Fahrzeug mit LH<sub>2</sub>-Zulassung in Europa, Tank Messer-Griesheim nach DFVLR-Design, 130 l, Leergewicht 65 kg, Ruheverdampfung 1,8 %/Tag)  
[W. Peschka, Liquid Hydrogen]

# Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks

Refueling process in Wörth (Daimler Truck)



SAG LH2 on the truck on the IAA Transportation 2022

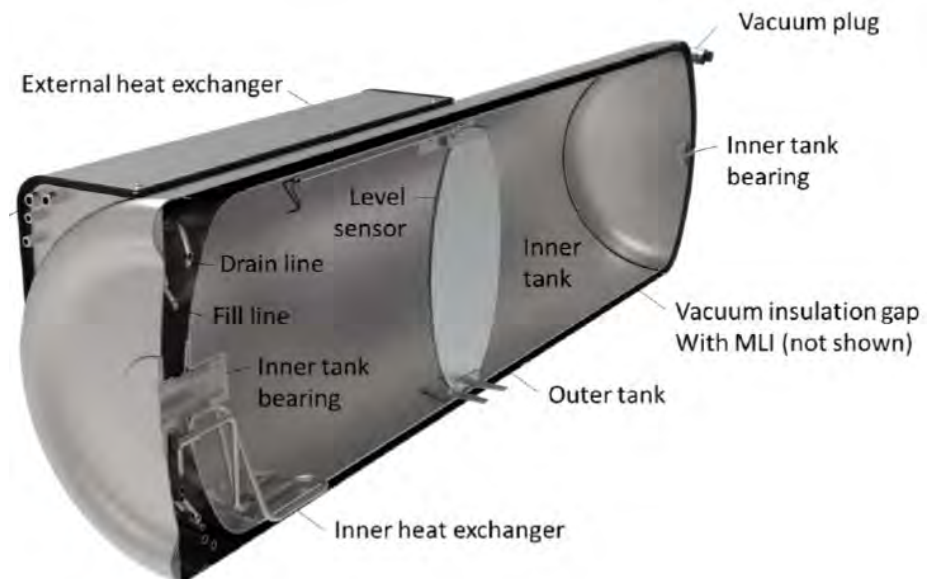
## SAG Tank for Daimler LH<sub>2</sub> Truck

Oct. 2022:

1000 km range demonstrated

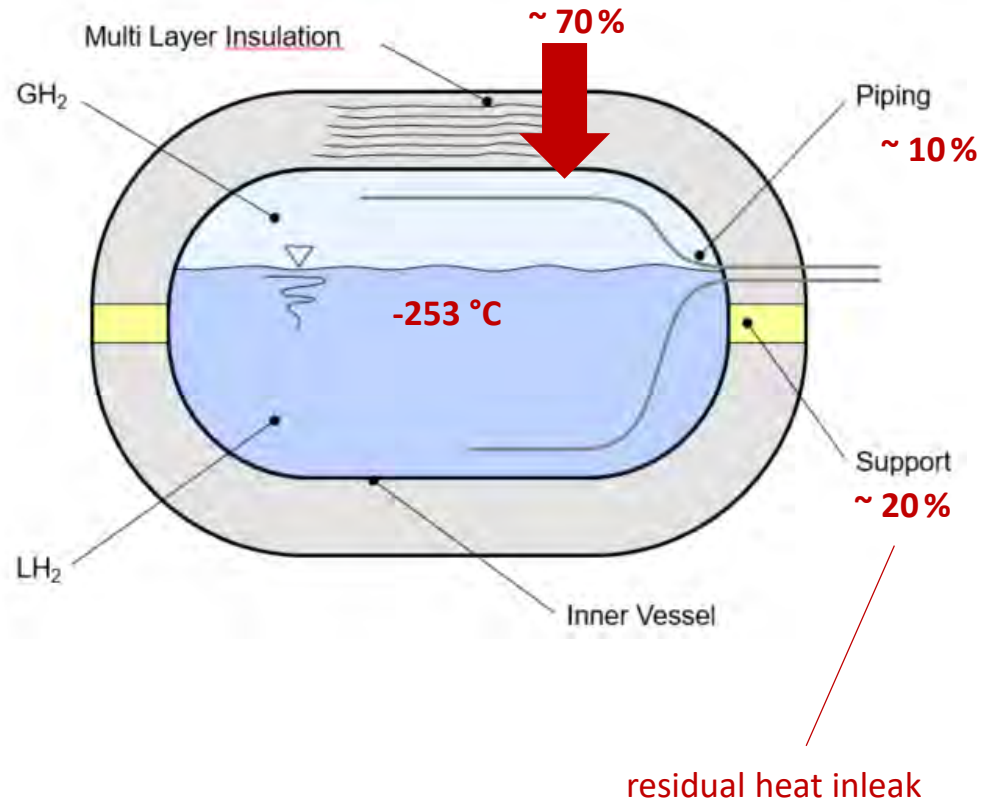
Thomas Stepan  
SAG – Salzburger Aluminium Group  
European Cryogenic Days 2023  
GSI Darmstadt

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 <sub>2</sub>
Hold time at 50 % SOC	4 d
Capacity approx.	42 kg LH <sub>2</sub>



## Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks

möglichst perfekte thermische Isolation:



Restgas-Wärmeleitung

⇒ Hochvakuum

Wärmestrahlung

⇒ MLI – Multi Layer Insulation

Wärmebrücken, Verbindungen

⇒ geeignetes Material,  
dünnwandig

Two important parameters:

- **Dormancy time**

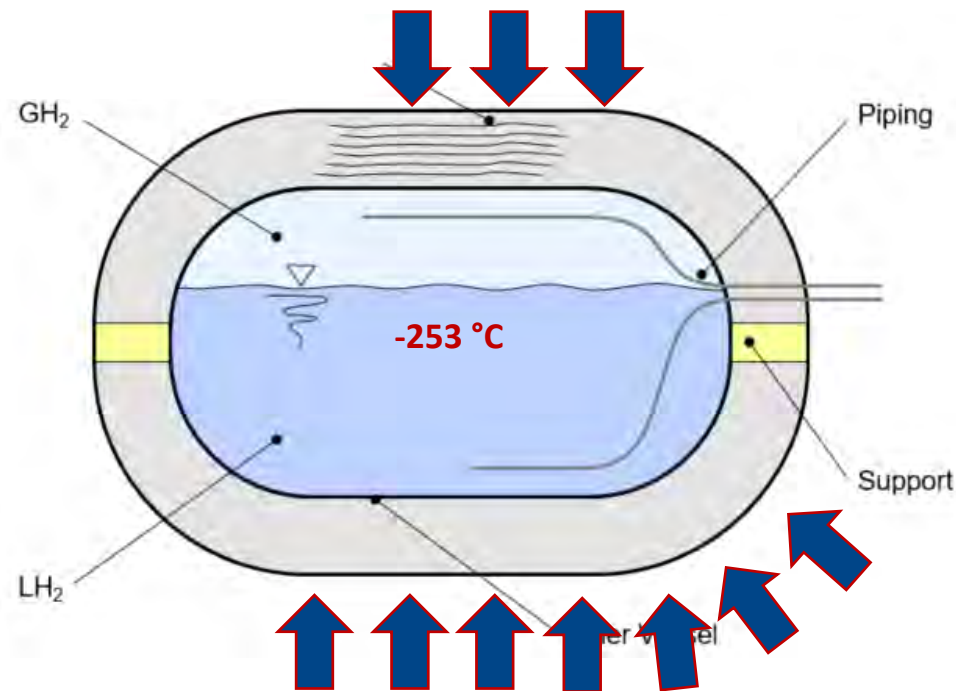
closed tank, time until MAWP is reached ⇒ boil-off valves opens

once started:

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



## Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks



### mechanical strength:

vacuum vs.

1 bar ambient pressure

→ force  $10^5 \text{ N/m}^2$

⇒ 10 tonnes load /m<sup>2</sup> !

to avoid buckling is a major issue

⇒ mandatory  
spheres  
cylinders  
maybe egg-shaped



## Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks

Problem: permanent vacuum  $< 10^{-5}$  mbar



Example: Vacuum reservoir,  $V = 1$  Liter

$p = 1$  bar  $\Rightarrow 1,25$  g Air

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

high-end valve: leak rate =  $10^{-9}$  mbar·l / s

Reservoir  $V = 10$  l

$\rightarrow$  in 1 month:  $1 \cdot 10^{-5} \rightarrow 2,6 \cdot 10^{-4}$  mbar

1 kg steel: up to 200 ml (0,016 g) H<sub>2</sub> - outgasing

Problem:

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

$\Rightarrow$  Getter materials to be placed inside

Zeolith (cold) fixing N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, organics

PdO binding H<sub>2</sub>

## Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks

### further headaches:

#### cool-down:

large quantities of LH<sub>2</sub> 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 LH<sub>2</sub> content evaporates and is blown-off  
within minutes

#### when LH<sub>2</sub> is withdrawn:

heat input (kW range!) needed to keep  
working pressure

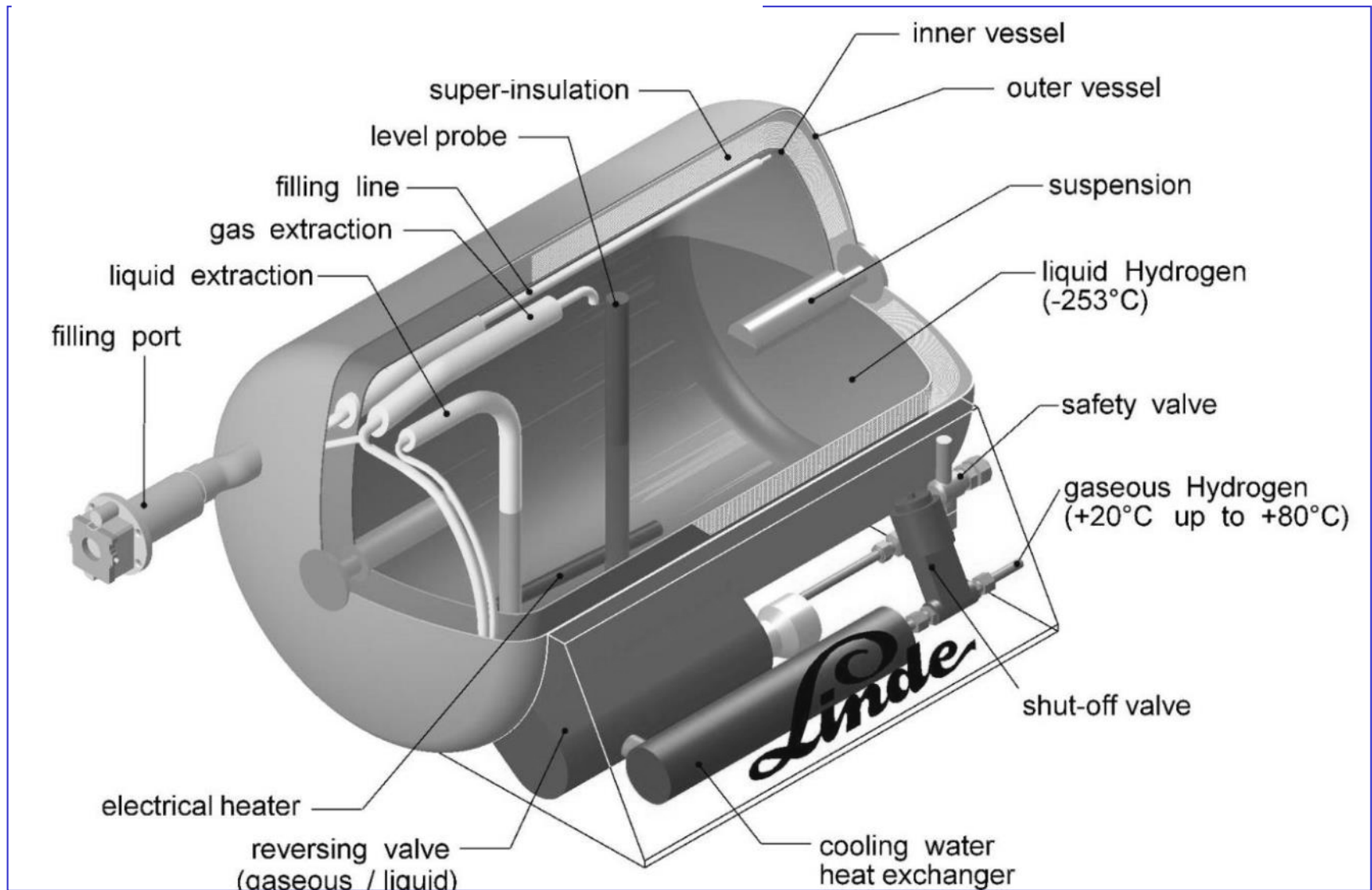
LH<sub>2</sub> must be evaporated / warmed up

→ dedicated heat exchanger



- LH<sub>2</sub> tank      1... 4 bar<sub>abs</sub> working pressure
  - FC:              ~ 15 bar<sub>abs</sub> input pressure
  - ICE / turbine: ~ 50 bar<sub>abs</sub> input pressure
- ⇒ LH<sub>2</sub> pump or H<sub>2</sub> compressor needed

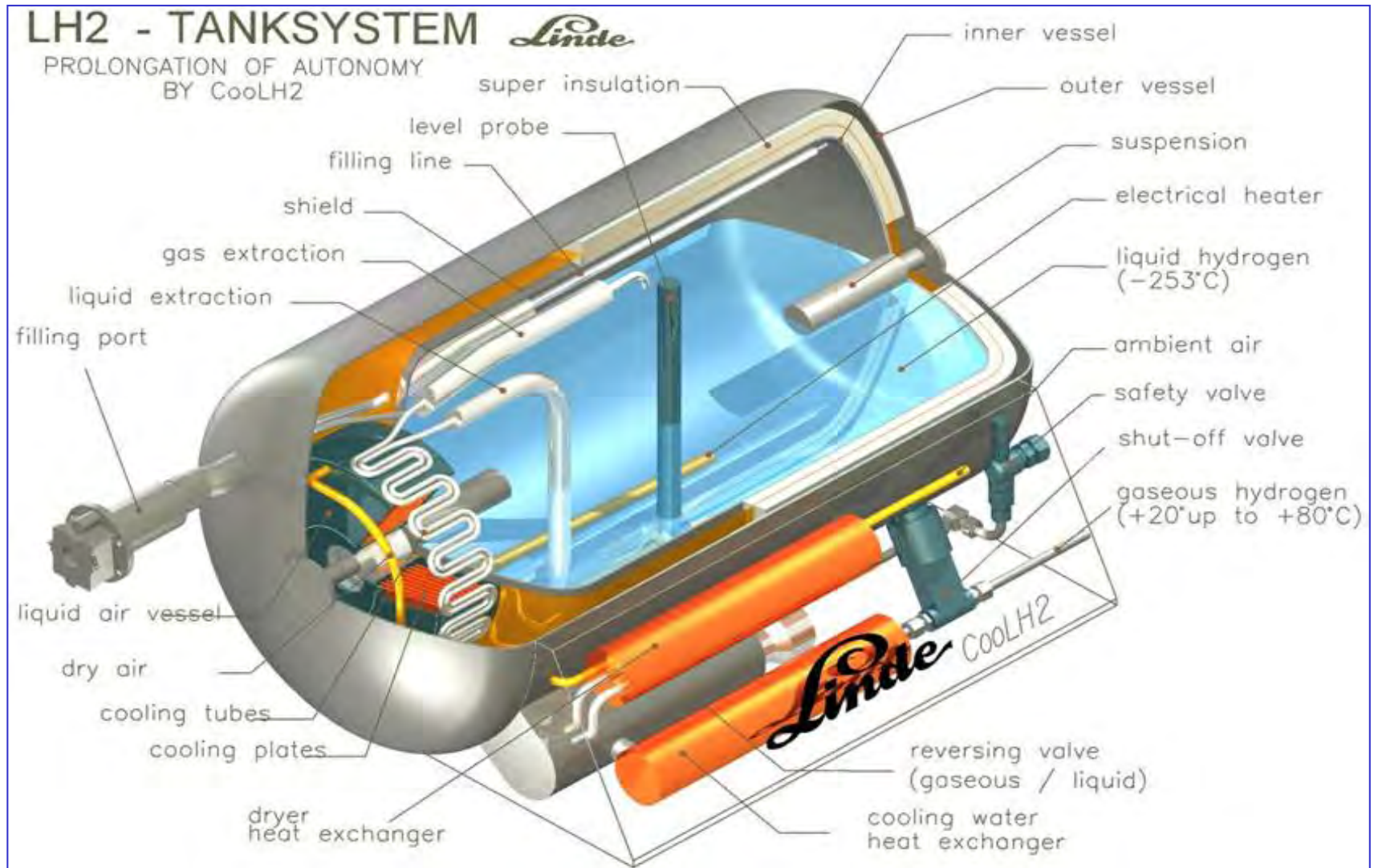
## Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks



## Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks

### Prototyp:

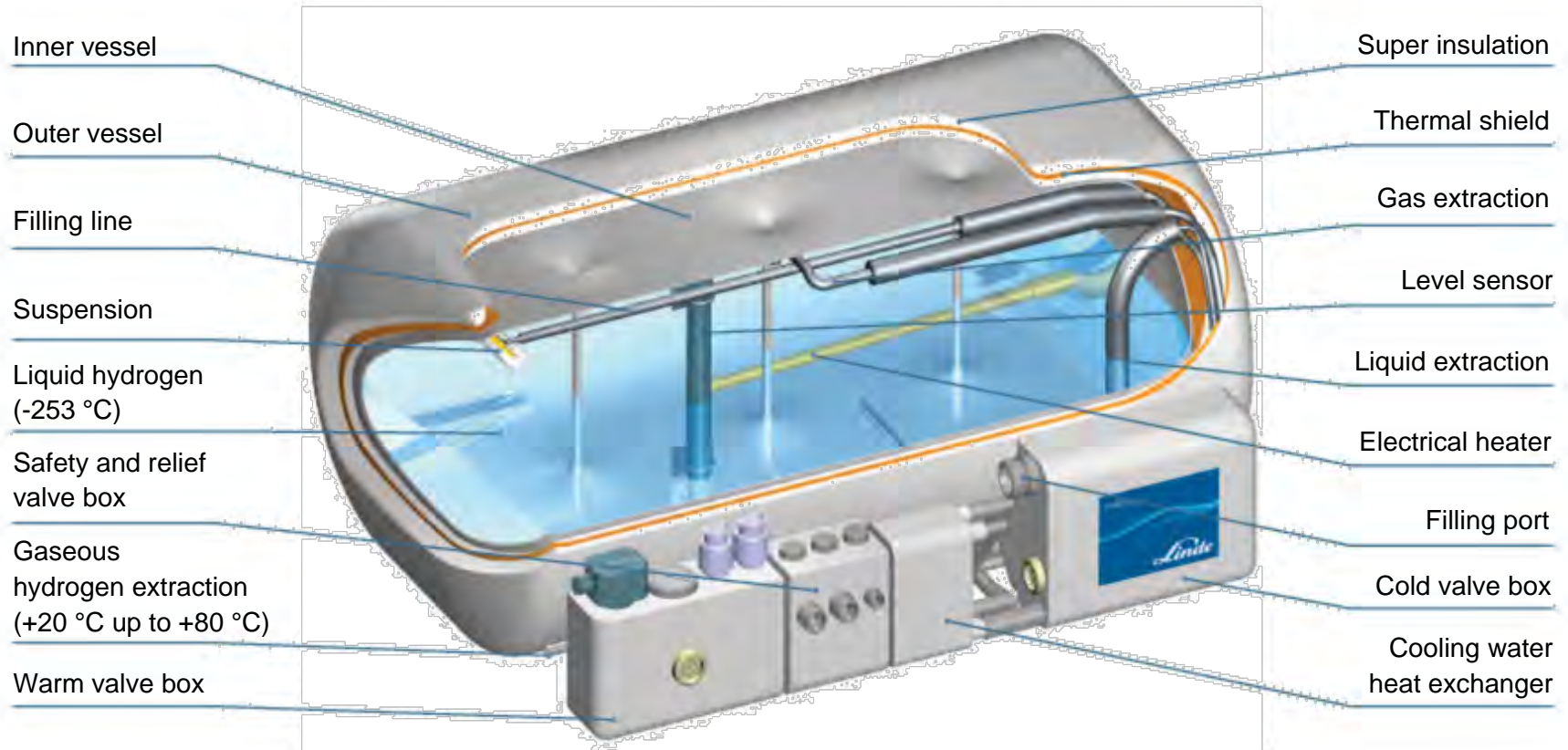
Bei LH<sub>2</sub>-Entnahme Einkondensation von (getrockneter) Umgebungsluft zur Schildkühlung ⇒ Standzeitverlängerung





# Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks

## alternative Tank-Geometrien



Source: Linde AG

# Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks

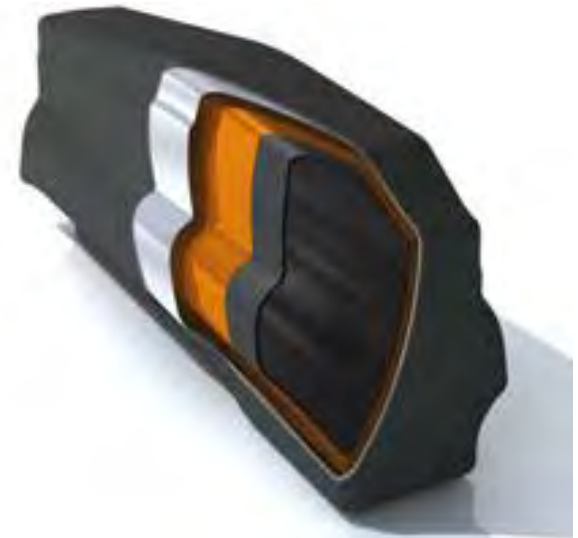
## alternative Tank-Geometrien

CHARAKTERISTISCHE DATEN PKW-TANK:

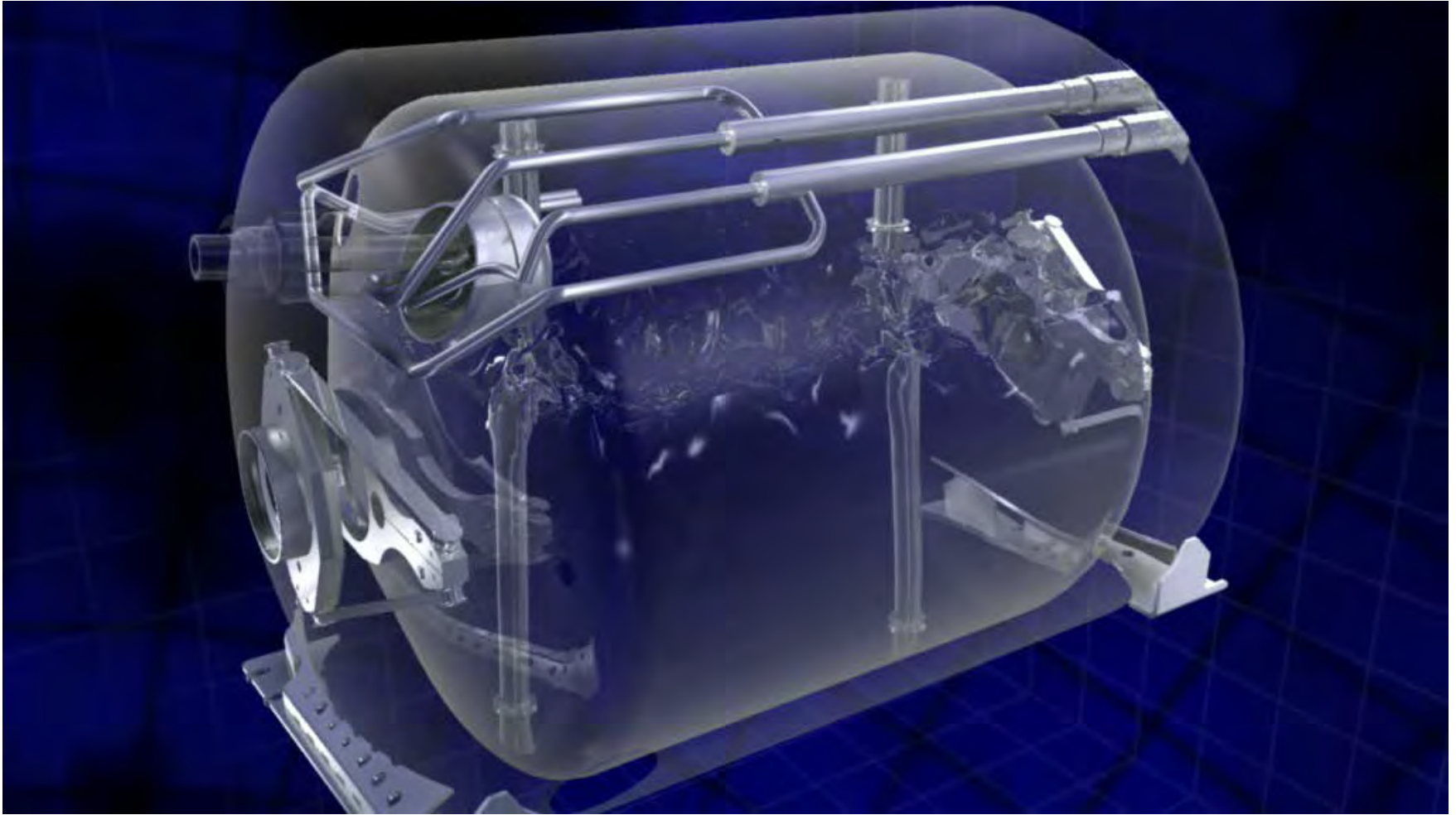


Abb. 2: Pkw-Flachtankmodul für Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>)  
[Quelle: Magna Steyr]

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
Abdampftrate (typisch):	< 4 % pro Tag



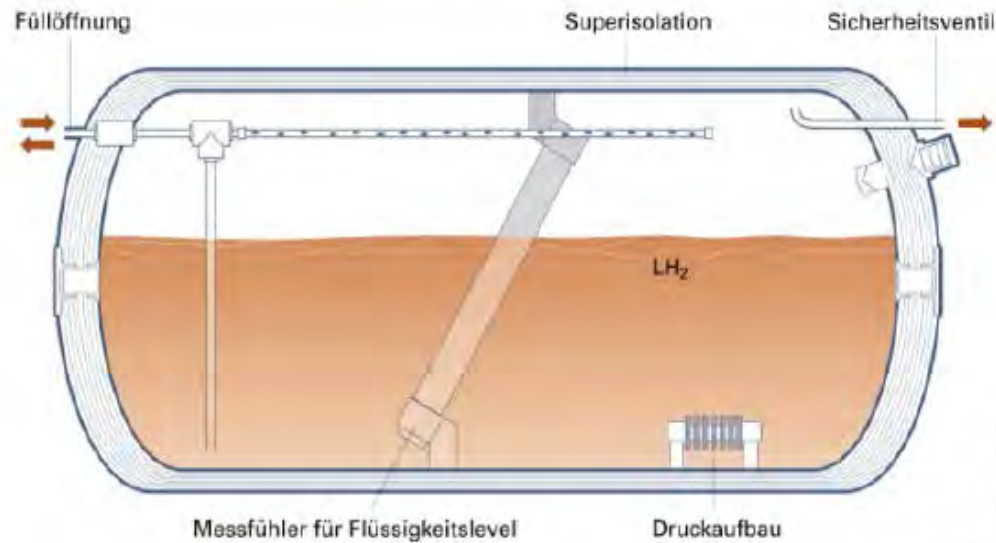
Quelle: BMW



**BMW E 68 – Tank (140 l LH<sub>2</sub>)**



## Liquid Hydrogen Tank



Source: Messer GmbH

ADVANCED LIGHTWEIGHT FUEL STORAGE SYSTEMS™

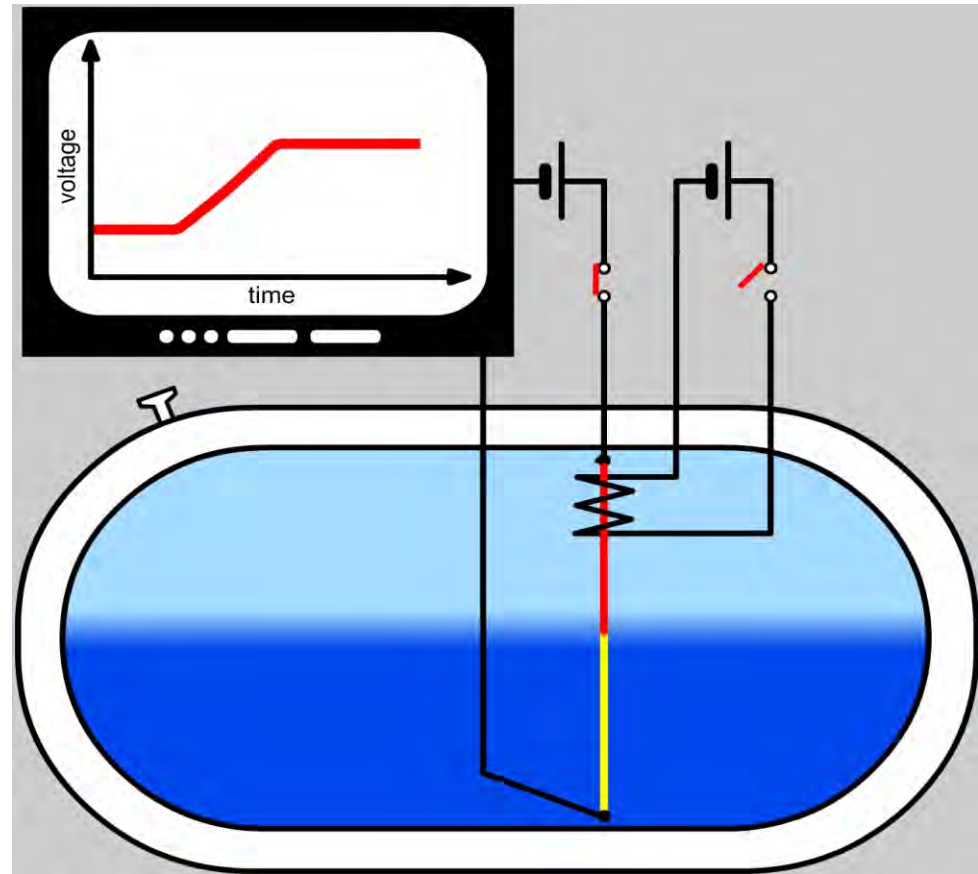
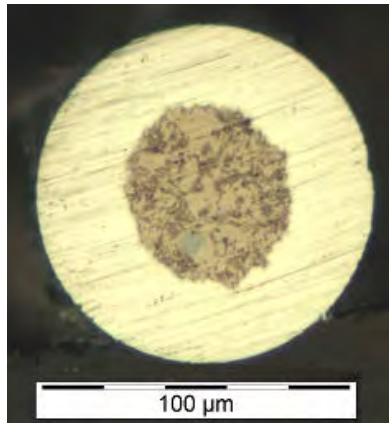
### LH<sub>2</sub>-Füllstandsmessung: kapazitive Sonden als heutiger Standard

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

⇒ Alternativ-Entwicklung: **Supraleitende LH<sub>2</sub> - Füllstandssonde**

Funktionsprinzip

MgB<sub>2</sub> - Filamentdraht 50...300 µm  
Maßgeschneidert von KIT Karlsruhe  
 $T_c = 36 \text{ K}$

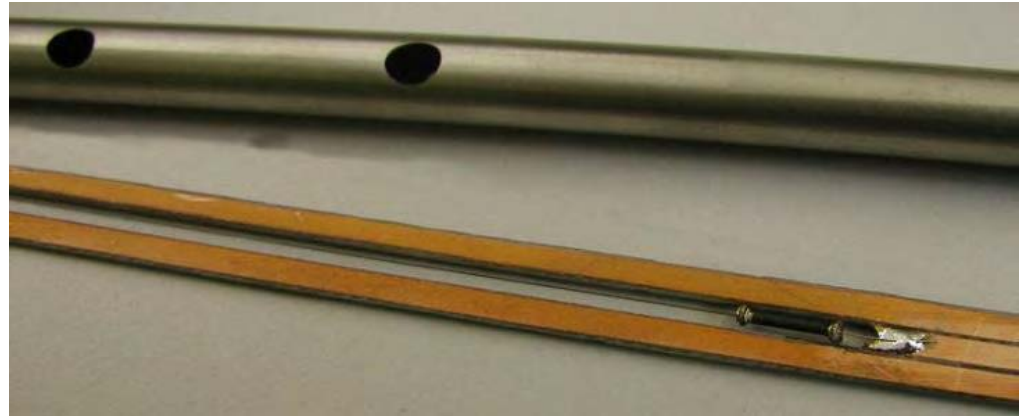


### Supraleitende LH<sub>2</sub> - Füllstandssonde

(Haberstroh, Zick, Dehn, Kirsten)

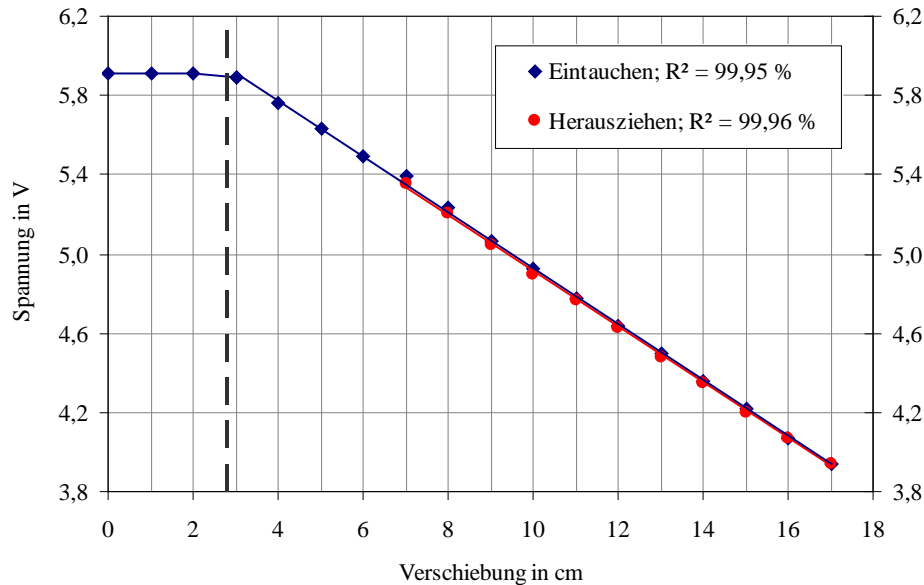
- einfacher Aufbau
- geringe Materialkosten
- extrem präzise ( $\pm 0,2$  mm)
- lineares Ausgangssignal
- hohe zeitliche Auflösung
- geringe Störanfälligkeit

von BMW unter realen Bedingungen  
2006 getestet,  
sehr positives Resultat





## Supraleitende LH<sub>2</sub> – Füllstandssonde (Patent TU Dresden)



Linearität, Auflösung

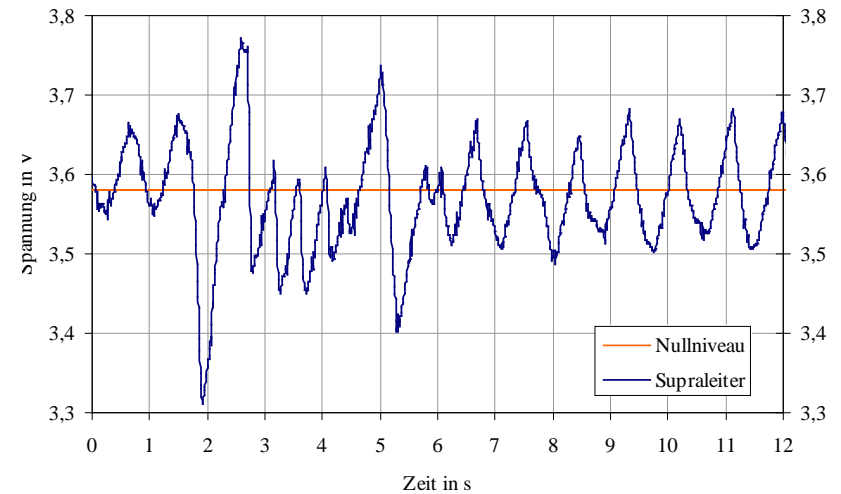
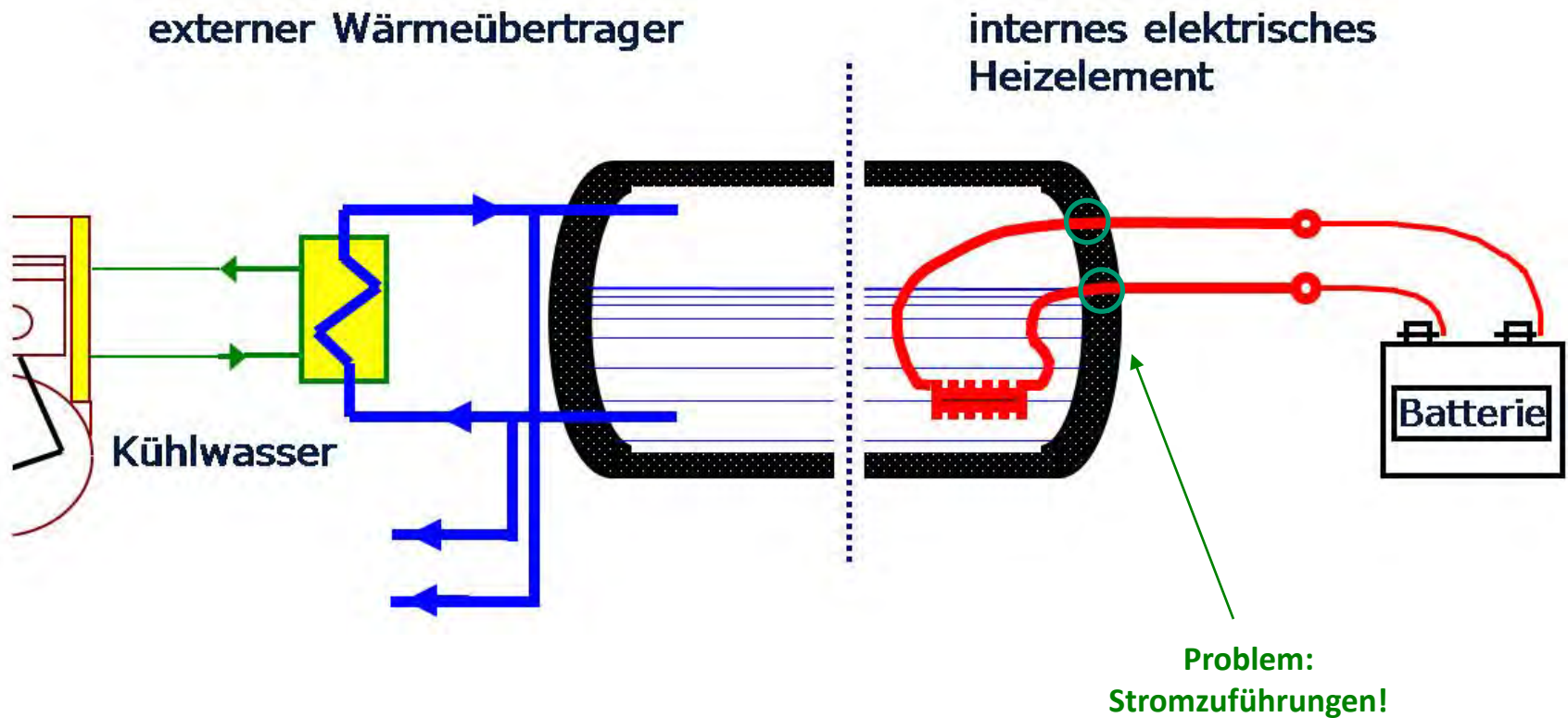


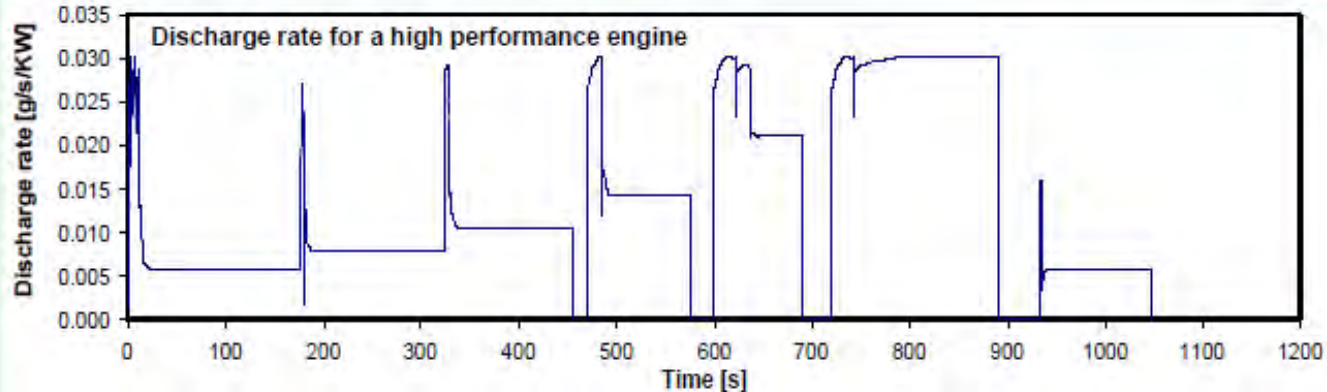
Abbildung schwappende Phasengrenze;  
korrekter Mittelwert

### Optionen zur Druckhaltung bei LH<sub>2</sub>-Entnahme

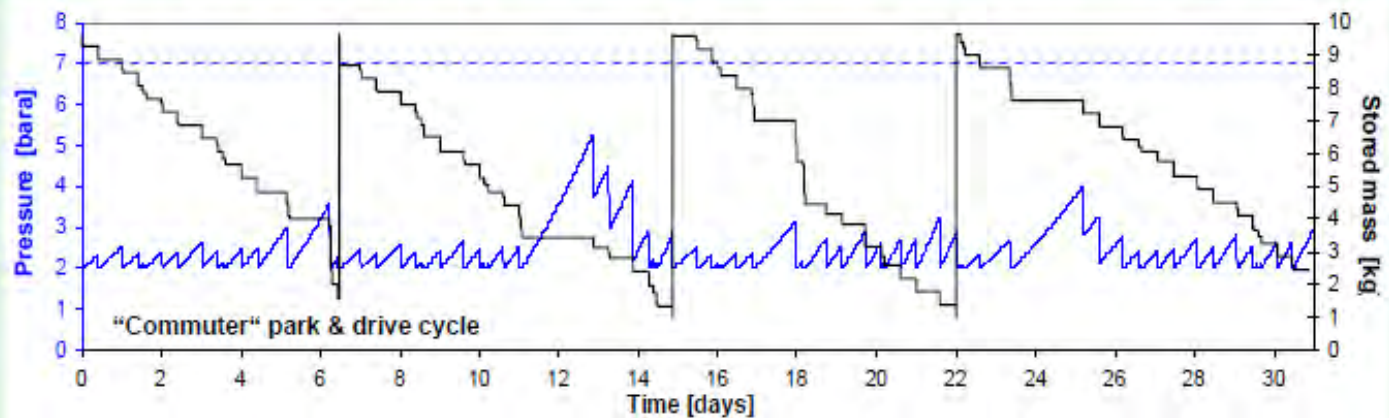
(Wärmeeintrag im kW-Bereich erforderlich!)



Storage layout is based on full load requirements.



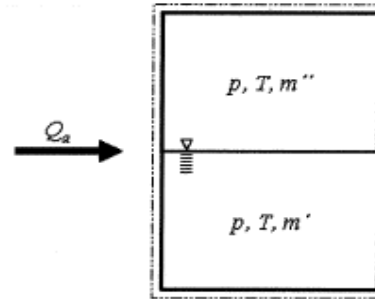
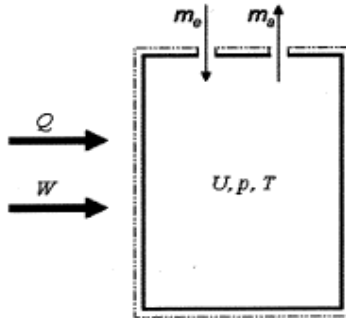
Customer park & drive cycles decide about vent loss-free operation.





# Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks

## LH<sub>2</sub>- Dewartank: thermodyn. Beschr.



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

Dampfziffer  $x$

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

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

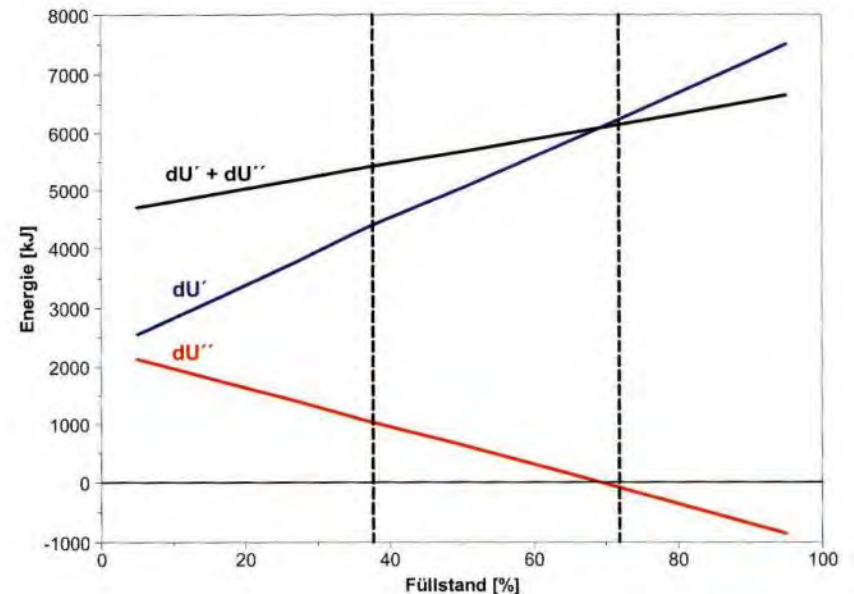
$$dQ_a = m' du' + m'' du'' + dm''(u'' - u')$$

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

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

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{\rho V \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_p} \cdot \left\{ Q_{1,2} + A_{1,2} + m_e \cdot \left[ h_e - h - \rho \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial \rho} \right)_p \right] \right\} -$$

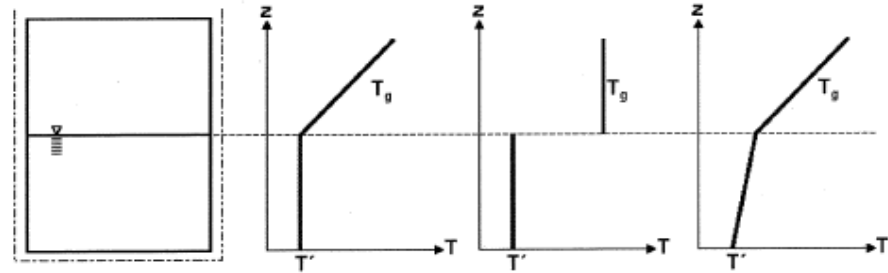
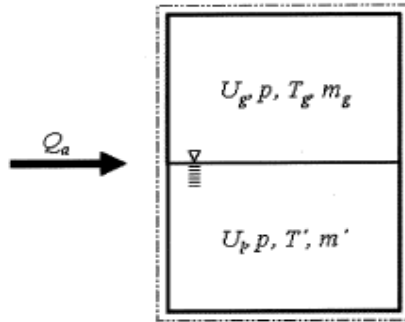
$$- \frac{1}{\rho V \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_p} \cdot \left\{ m_a \cdot \left[ h_a - h - \rho \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial \rho} \right)_p \right] + \rho^2 \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial \rho} \right)_p \cdot \left( \frac{dV}{dt} \right) \right\}$$



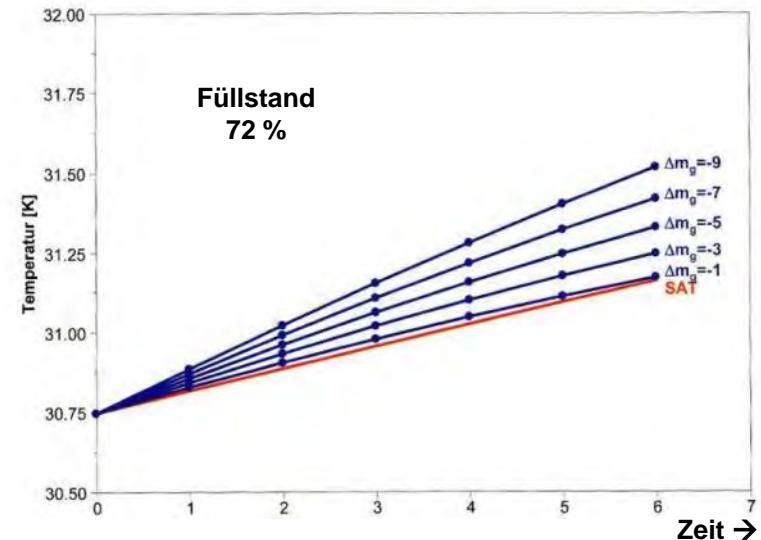
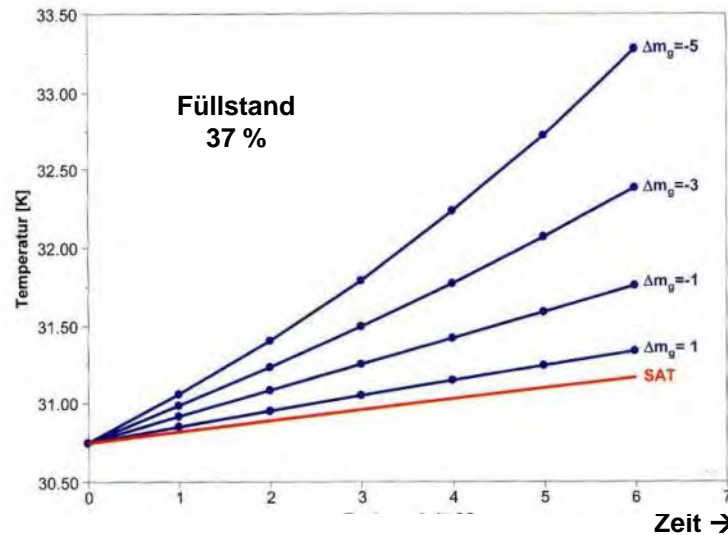
[Eichseder/Klell, Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Vieweg + Teubner 2008]

# Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks

## LH<sub>2</sub>- Dewartank: thermodyn. Beschr.



Temperaturverläufe (unterschiedliche Stratifikation)

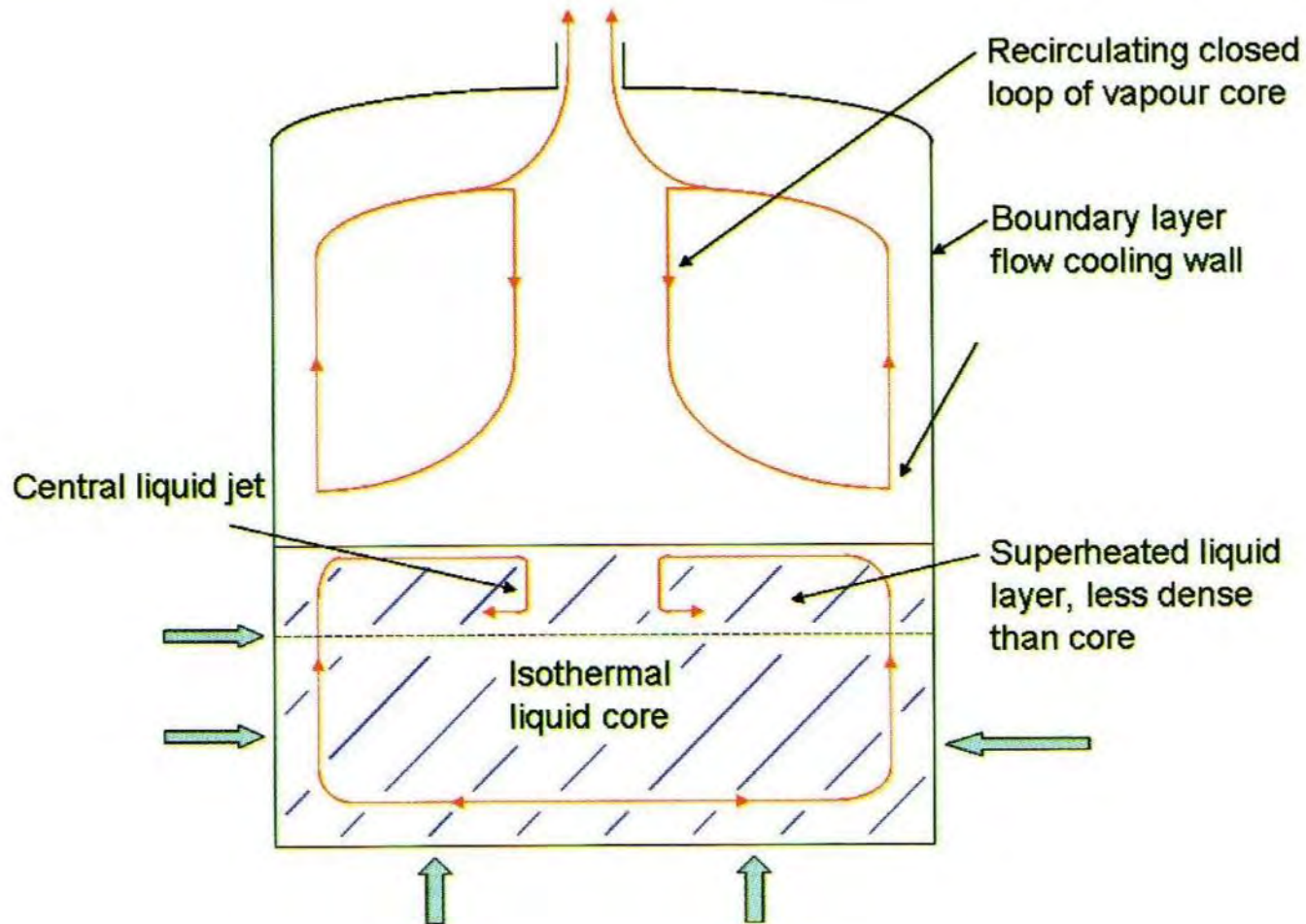


Temperaturanstieg überhitzter Dampf bzw. Phasengrenze (SAT);  $\Delta m_g$ : verdampfte Menge

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

# Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks

## LH<sub>2</sub>- Dewartank: thermodyn. Beschr.

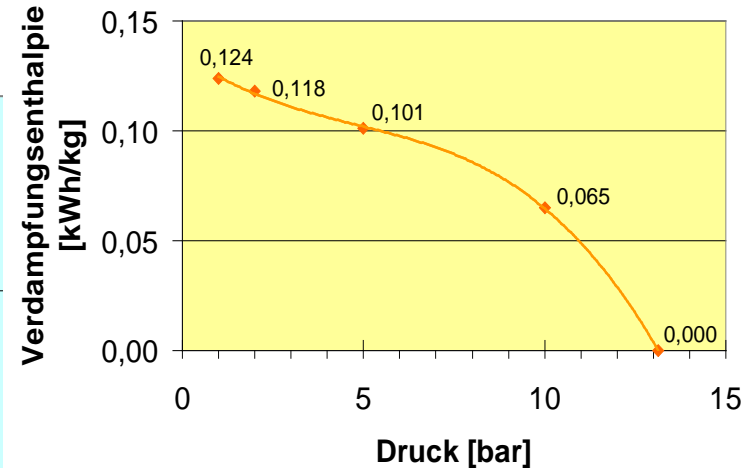
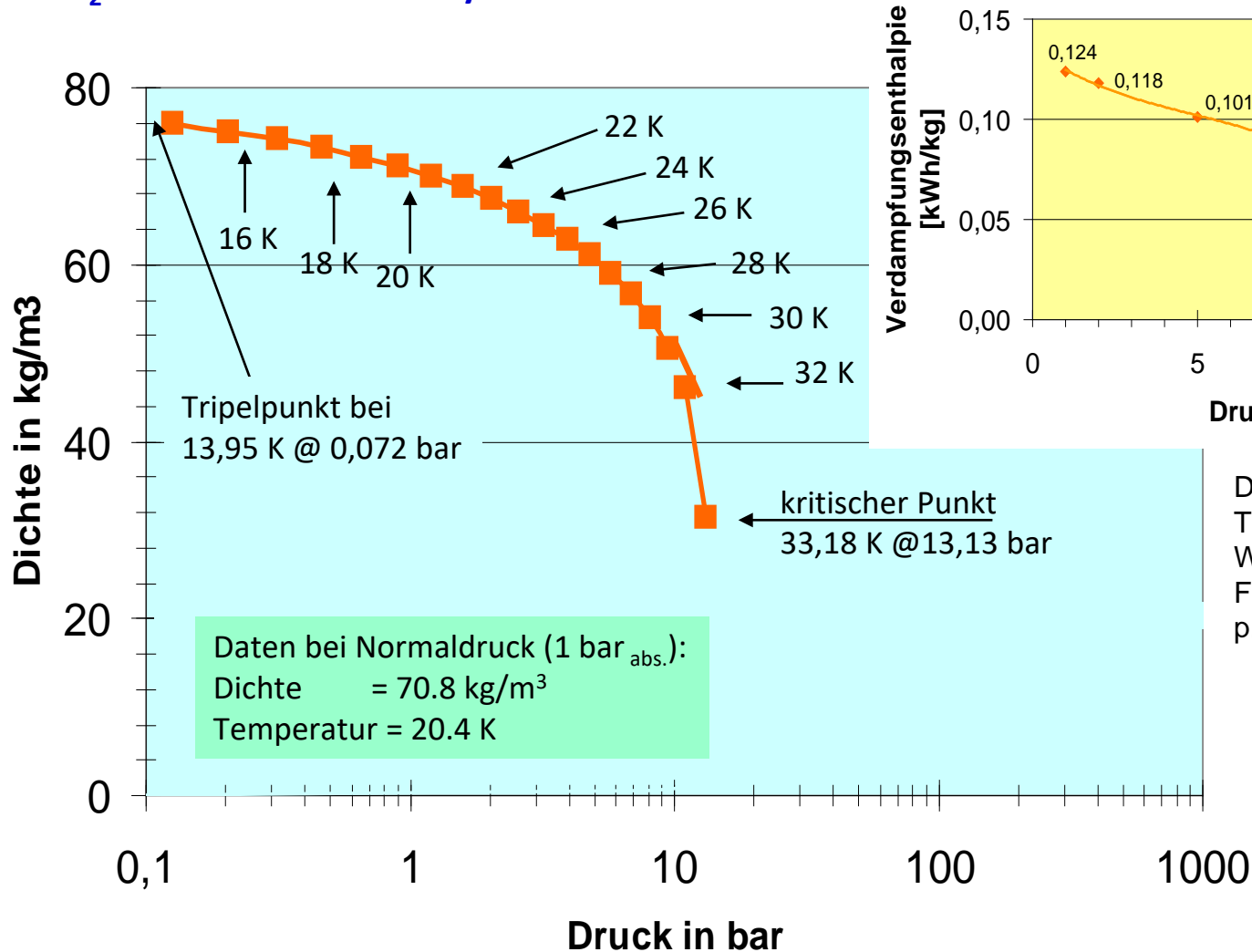


*nach R. Scurlock*

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



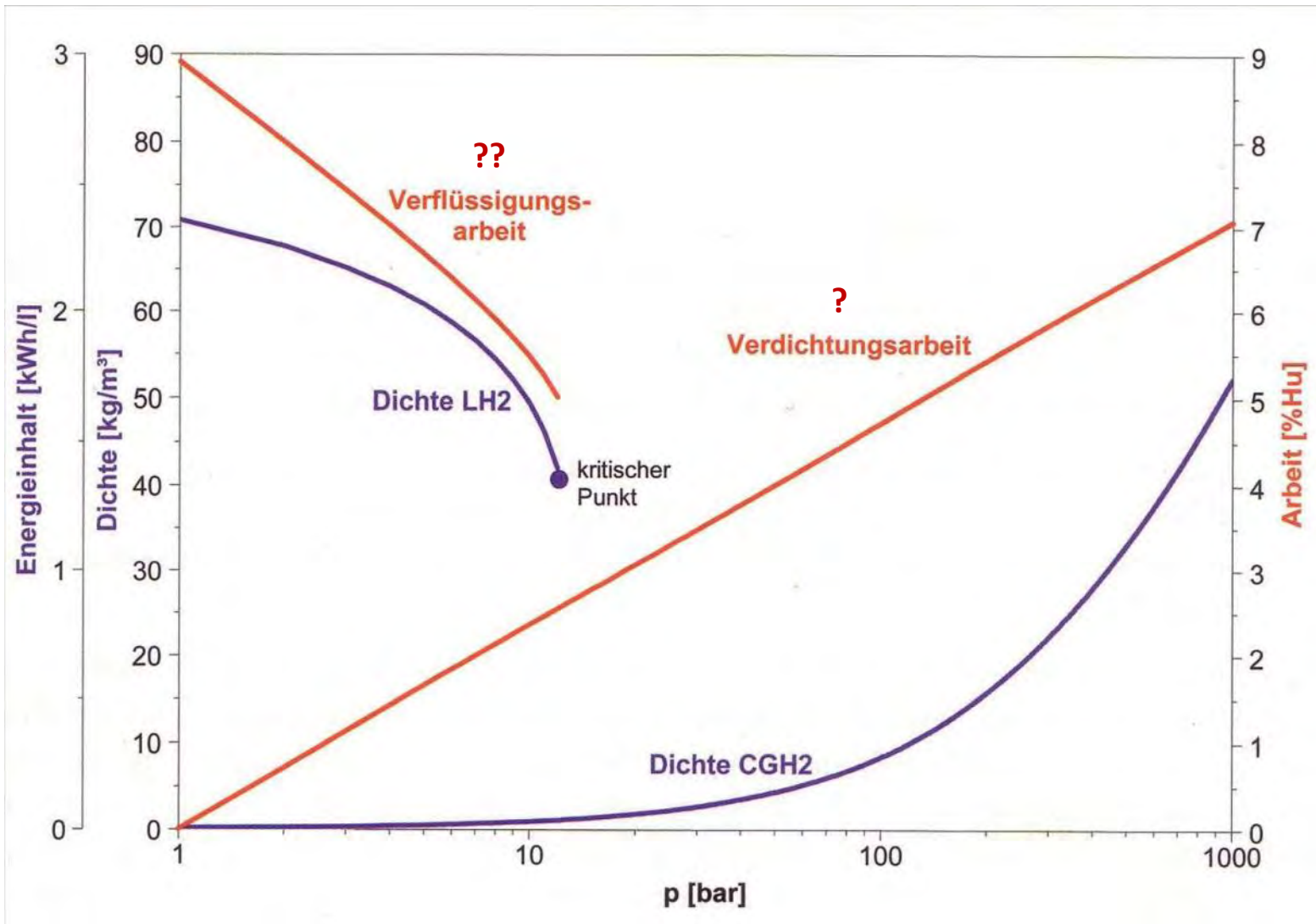
## LH<sub>2</sub>- Dewartank: thermodyn. Beschr.



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

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

## Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks



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

# Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks

**LH<sub>2</sub>- Dewartank:  
Herstellung aufwändige  
Manufaktur-Arbeit**

**Testen**

**Sicherheitsuntersuchungen**

## Multi-Layer Insulation

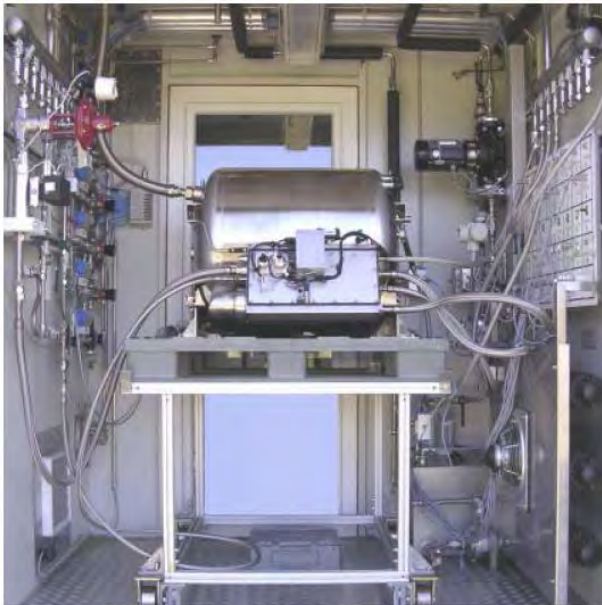
- Installation of layers of high reflecting aluminum foils and spacer of glass fiber in a clean-room
- Sewing process for fixing the foils and spacer on the inner tank



Source: MAGNA STEYR



Source: MAGNA STEYR



Source: HyCentA



Source: BMW Group



## Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks



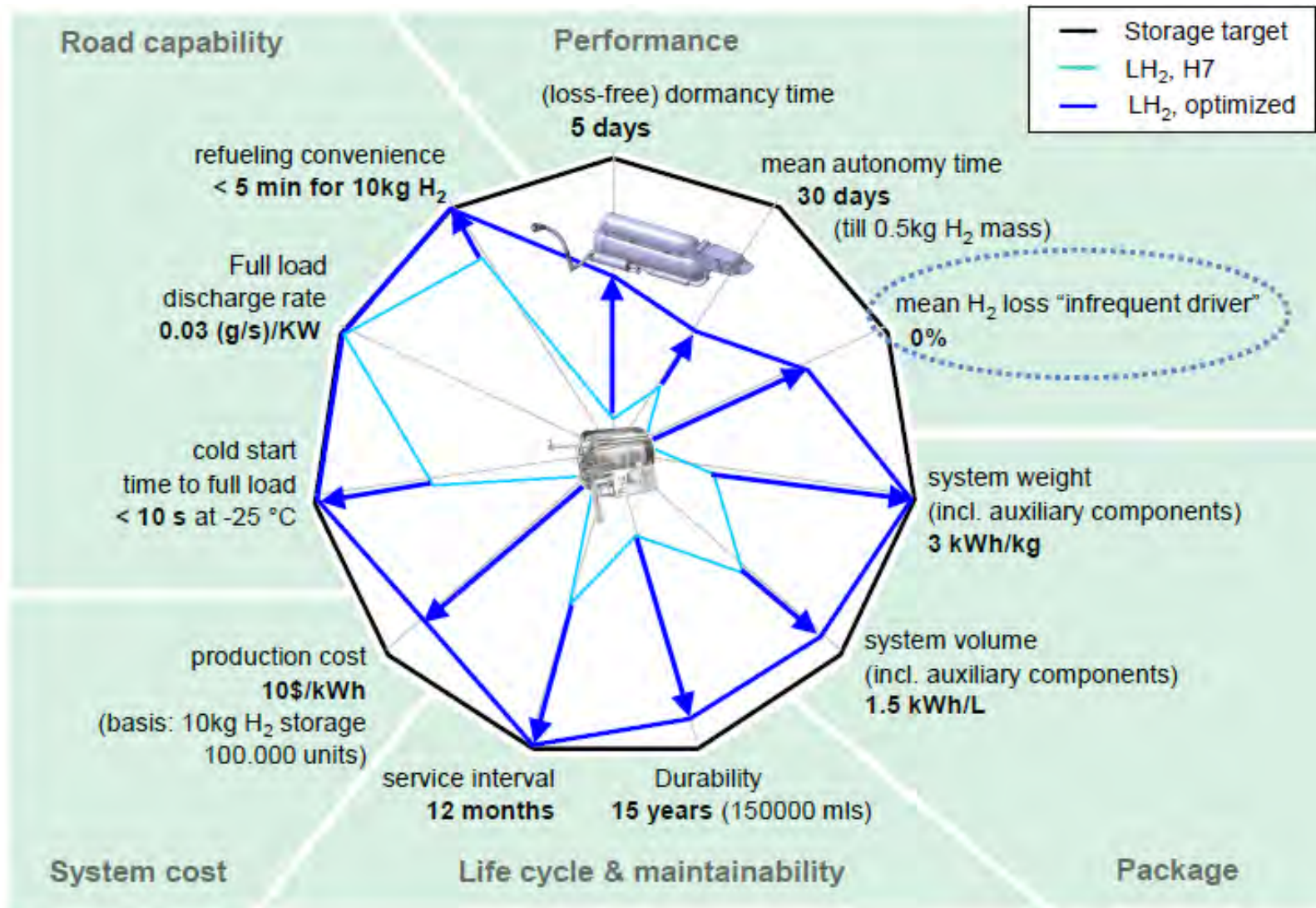
LH<sub>2</sub>-Tanks Fa. Air Liquide (ex-MesserGriesheim)

mit/für **Verbrennungsmotor!**

> 300 km/h mit LH<sub>2</sub>



## Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks



LH<sub>2</sub>- Fahrzeugtank: Anforderungen vs. Realisierung (Quelle: BMW)

# Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks

## Anforderungen:

- kompakt
- robust
- horizontale Anordnung
- Vakuum-Superisolation
- LH<sub>2</sub>-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<sub>liq</sub> pro Tag)**

Langzeitvakuumenschutz: Getter-Material

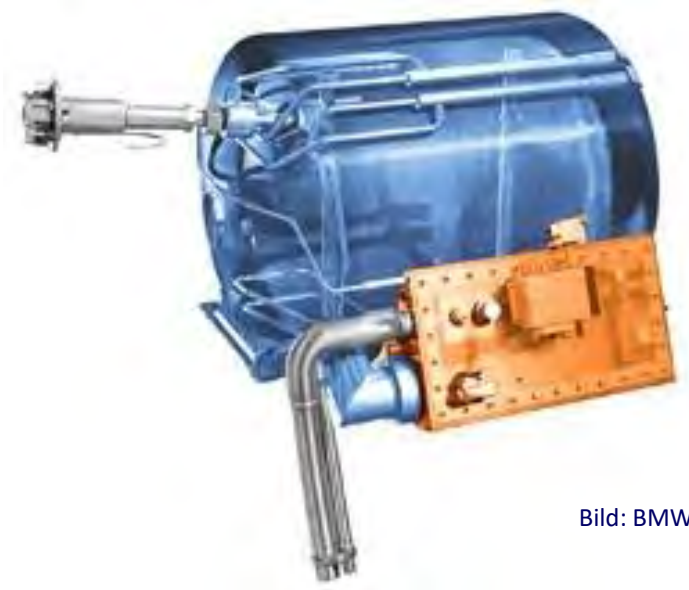


Bild: BMW

**⇒ LH<sub>2</sub>-Tanks (Wasserstoff zweiphasig)  
für Pkw  
nicht mehr weiterverfolgt**

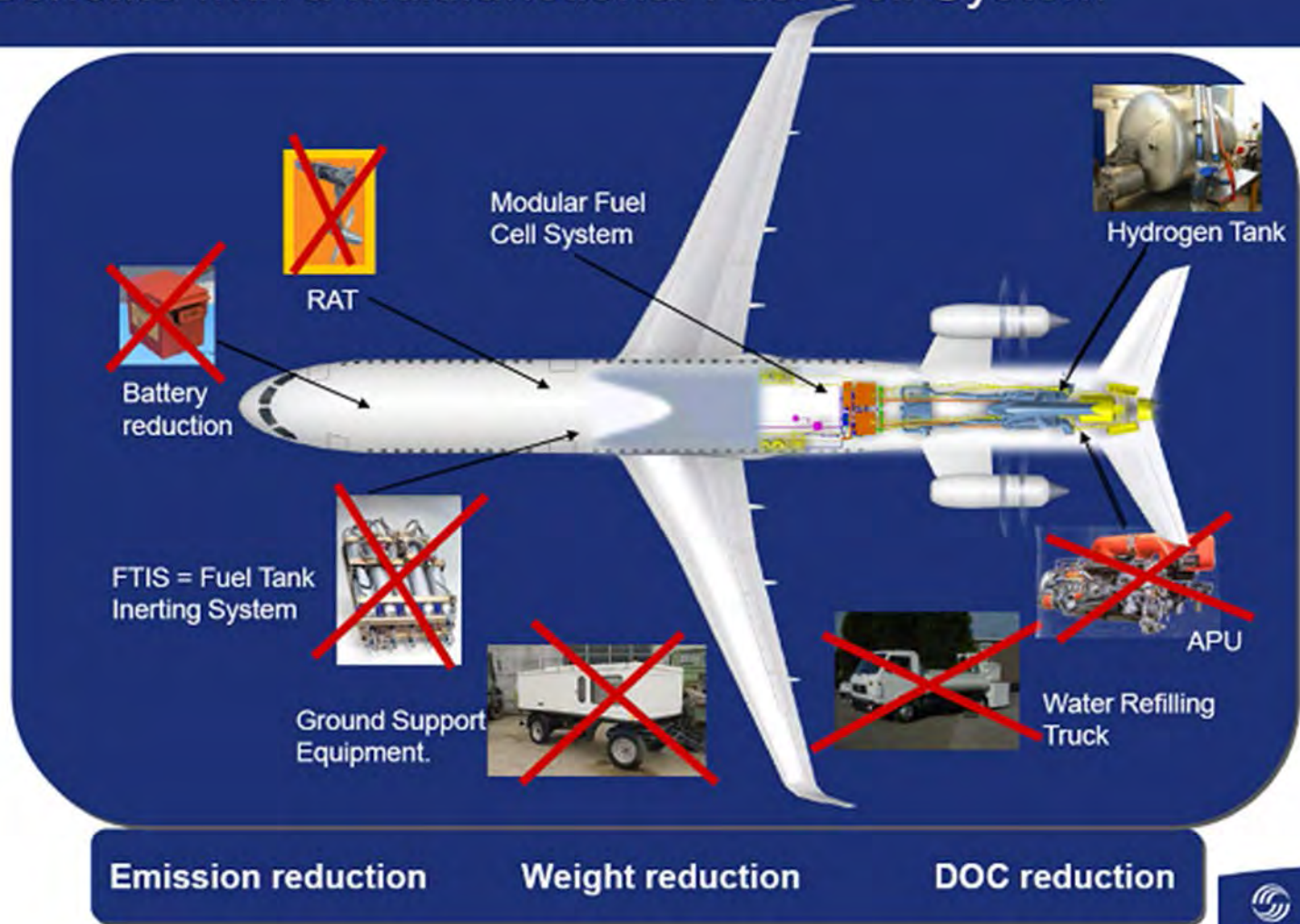


## Wasserstoff: LH<sub>2</sub>-Fahrzeugtanks

## Luftfahrt als neue Anwendung LH<sub>2</sub>- Tank !?

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

### Benefits with a Multifunctional Fuel Cell System





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

LH<sub>2</sub>-Tanks im Rumpf!? in Tragflächen!? in Gondeln!?

LH<sub>2</sub> → H<sub>2</sub> → Brennstoffzellen → elektr. Antrieb

LH<sub>2</sub> → H<sub>2</sub> → konvent. Turbinentriebwerk

# Introducing Airbus ZEROe

Turboprop



**<100**  
Passengers



Hydrogen  
Hybrid Turboprop  
Engines (x 2)

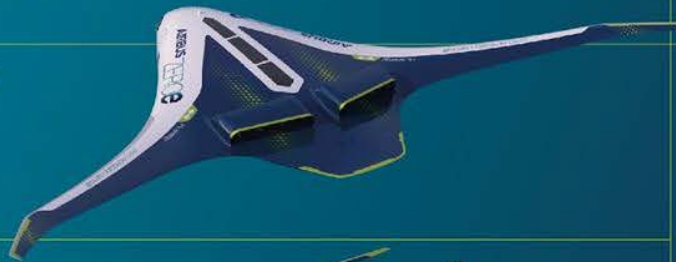


**1,000+nm**  
Range



Liquid Hydrogen  
Storage & Distribution  
System

Blended-Wing Body



**<200**  
Passengers



Hydrogen  
Hybrid Turboprop  
Engines (x 2)



**2,000+nm**  
Range



Liquid Hydrogen  
Storage & Distribution  
System

Turbofan



**<200**  
Passengers



Hydrogen  
Hybrid Turboprop  
Engines (x 2)



**2,000+nm**  
Range



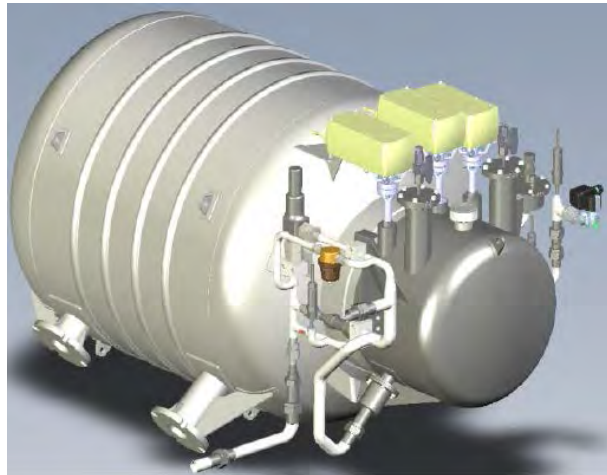
Liquid Hydrogen  
Storage & Distribution  
System

**AIRBUS**

# H<sub>2</sub> / LH<sub>2</sub> als Energieträger: erwartete Anwendungen Mobilitätssektor

1 kg H<sub>2</sub> entspricht 4 kg Kerosin

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



## LH<sub>2</sub> Tank for Aviation

228 l / 6.3 bara  
25 W heat inleak

### erwartet:

CGH<sub>2</sub>-Tanks  
~ 30 kg/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>

LH<sub>2</sub>-Tanks  
3...5 kg/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>

derzeit: 12 kg/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>

es  
ay

Cruise ships  
10 T/day LH<sub>2</sub>

Material  
handling  
vehicles  
100 kg/day  
per site

Buses  
20 kg/day  
per bus

Drones

Bicycles  
& scooters

Individual cars  
100-200 kg/day  
per station

 Air Liquide



## LH<sub>2</sub> als Energieträger: Anwendungen maritim

### MF Hydra

worldwide first H<sub>2</sub> ferry

Hjelmeland - Nesvik

start of operation: March 31, 2023



however:




LH<sub>2</sub> supply

(by diesel trailer)

from Linde Leuna



## Wasserstoff: CcH<sub>2</sub>-Fahrzeugtank (Wasserstoff tiefkalt-überkritisch)

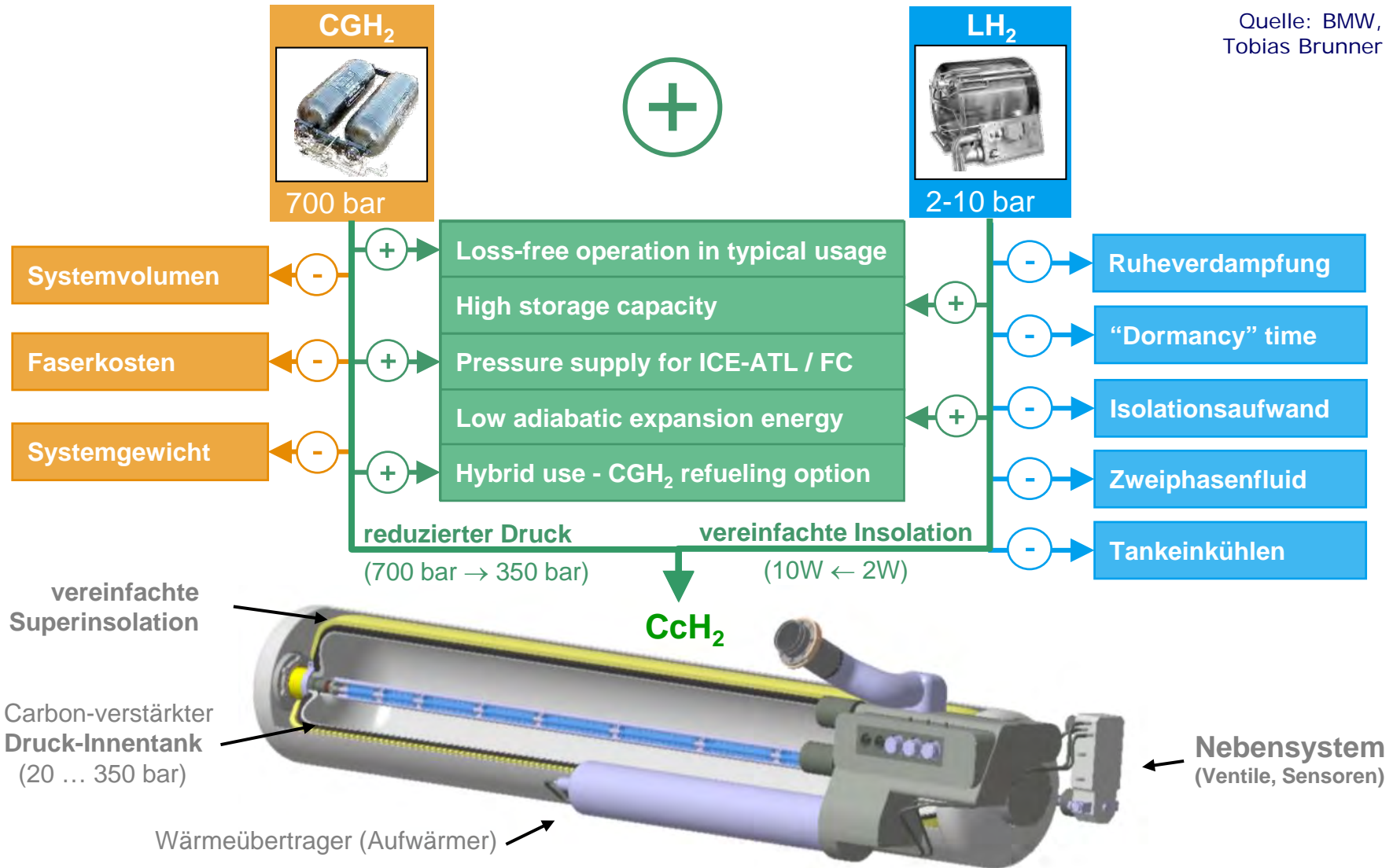
Druckgas, warm (CGH <sub>2</sub> )	Cryocompressed (CcH <sub>2</sub> )	flüssig (LH <sub>2</sub> )	Festbettspeicher
 <p>Bild: Dynetek</p>	 <p>Bild: BMW</p>	 <p>Bild: BMW</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Physisorption</li> <li>• Metalhydride</li> <li>• komplexe Hydride</li> <li>• chem. Bindung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



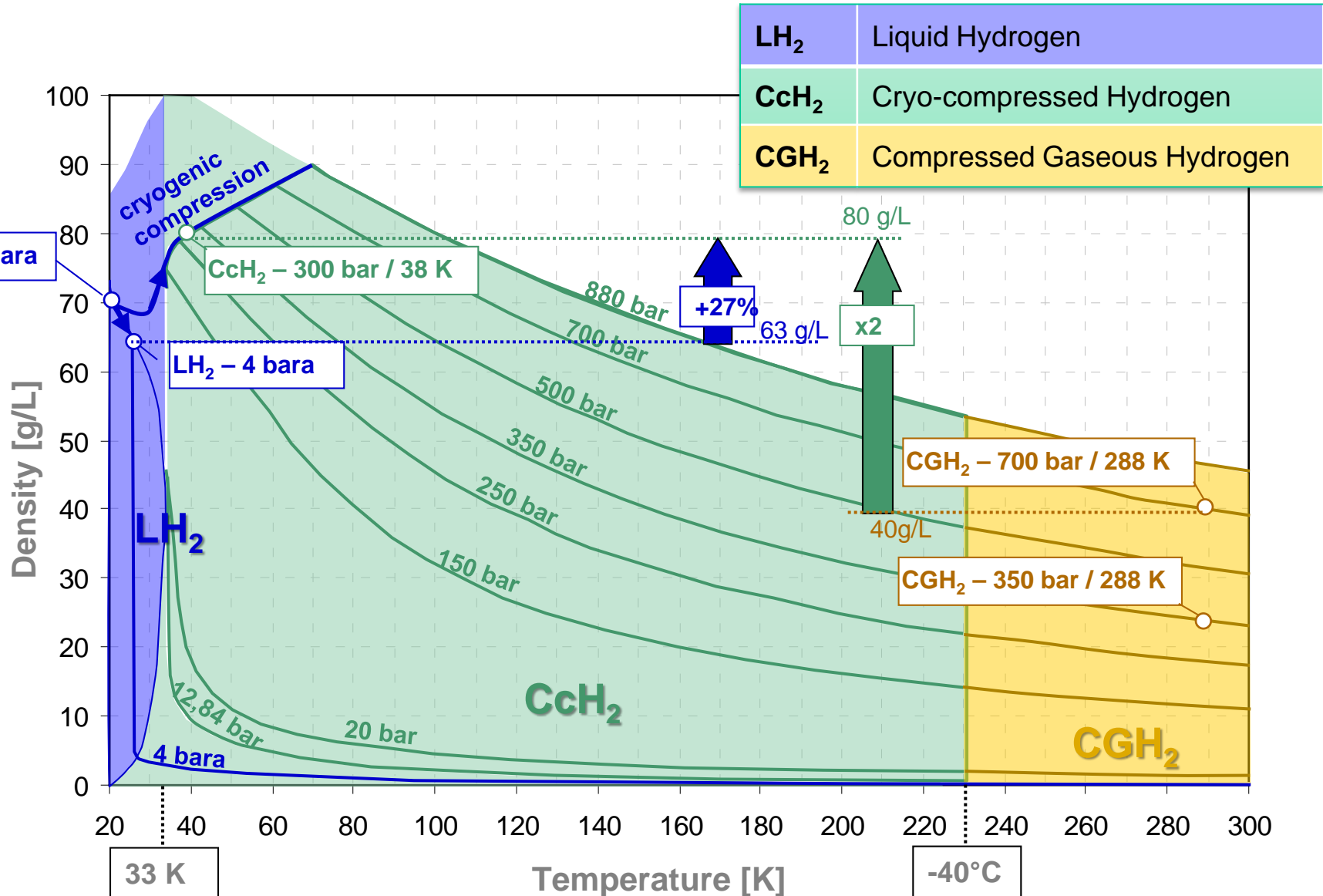
# Wasserstoff: CcH<sub>2</sub>-Fahrzeugtank (Wasserstoff tiefkalt-überkritisch)

geschickte Kombination der jeweiligen Vorteile

Quelle: BMW,  
Tobias Brunner



# Wasserstoff: CcH<sub>2</sub>-Fahrzeugtank (Wasserstoff tiefkalt-überkritisch)



Quelle: Tobias Brunner, BMW

Fertigstellung Testfahrzeug BMW: 2015/2016

# Wasserstoff: Anwendung in der Grundlagenforschung

## H<sub>2</sub> - Neutronenmoderator für ESS Lund / Schweden

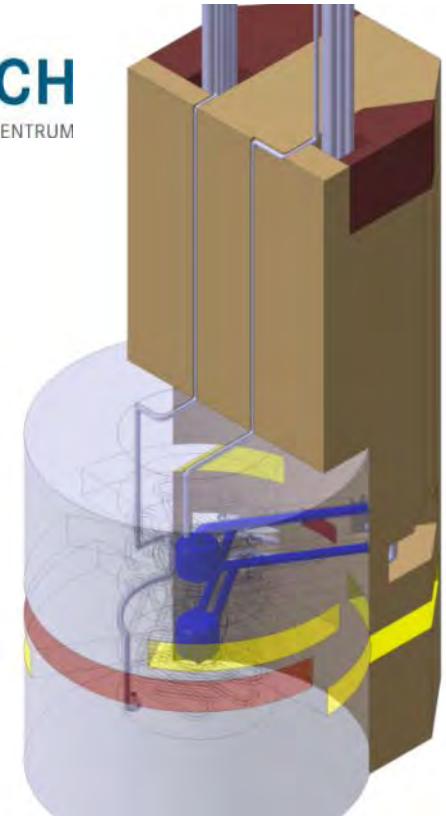


European Spallation Source ESS:  
2 GeV Protonenbeschleuniger + Target;  
22 Neutronstreu-Messplätze; 2019 fertig (?)

⇒ H<sub>2</sub> 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
- LH<sub>2</sub> - Umwälzpumpe



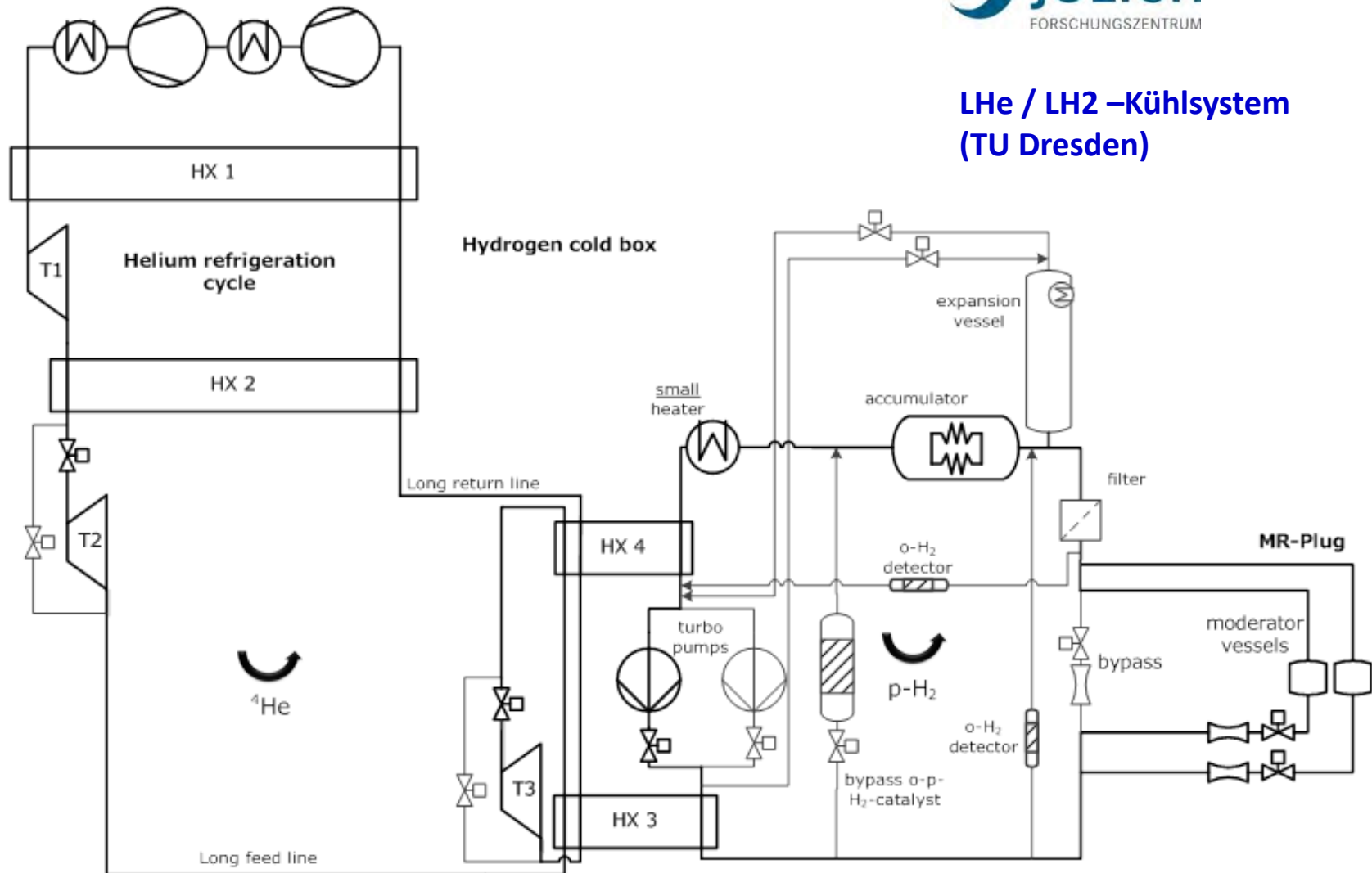
ESS Targetblock mit kaltem Moderator (blau)

# Wasserstoff: Anwendung in der Grundlagenforschung

## LH<sub>2</sub> - Neutronenmoderator für ESS Lund / Schweden



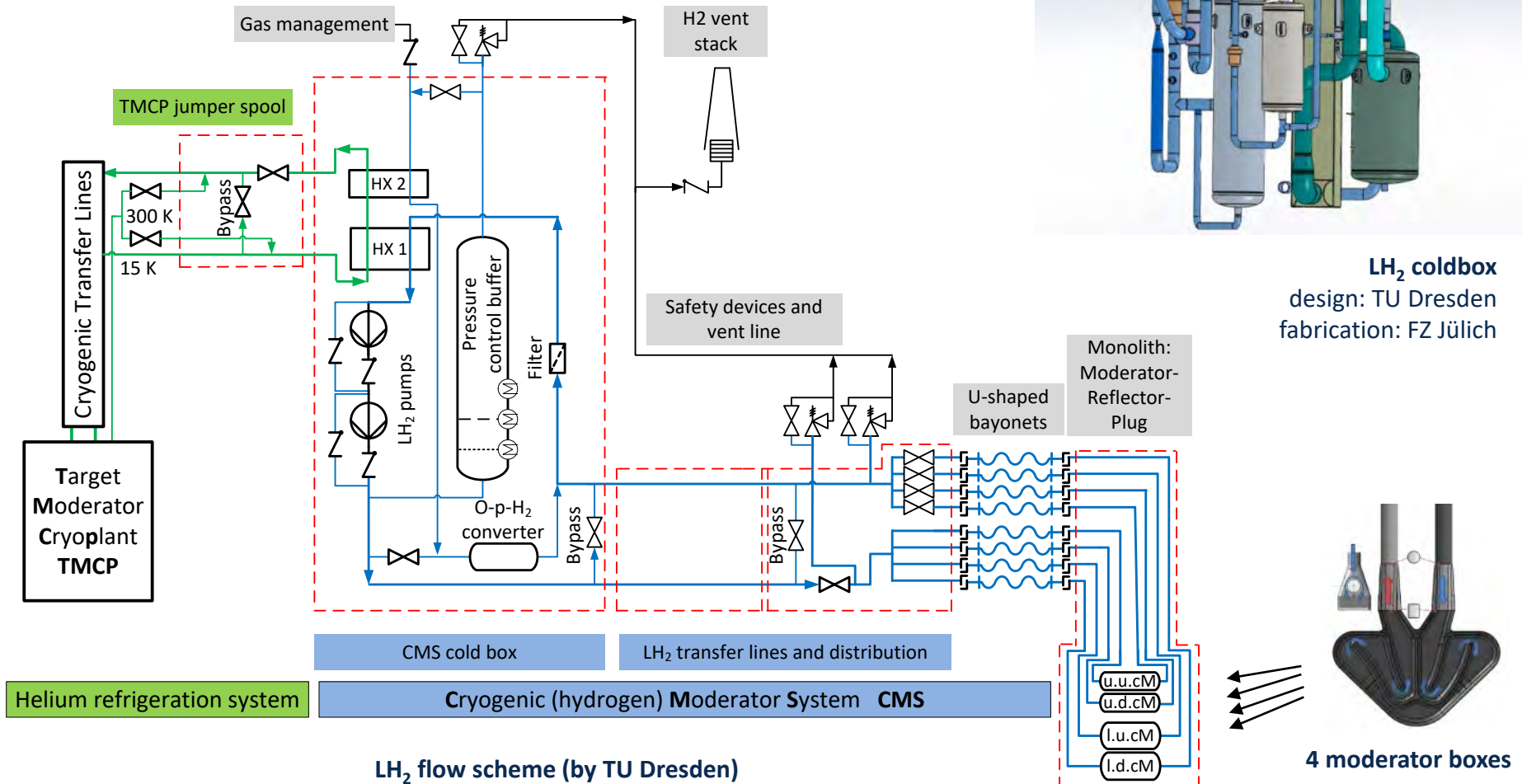
### LHe / LH<sub>2</sub> –Kühlsystem (TU Dresden)





# Wasserstoff: Anwendung in der Grundlagenforschung

## LH<sub>2</sub> - Neutronenmoderator für ESS Lund / Schweden



# Wasserstoff: Anwendung in der Grundlagenforschung

Parallelprojekt  $\text{LH}_2$  Neutronenmoderator (mit FZ Jülich und TU Dresden,  
Professur f. Kernenergietechnik):



## High Brilliant neutron Source – HBS

experiments with a low neutron flux

$\text{D}_2\text{O}$  warm moderator + 17 K cryogenic moderator volume ( $280 \text{ cm}^3$ )

moderator properties to be compared:  $\text{CH}_4$  (solid), Mesithylene  $\text{C}_9\text{H}_{12}$  (solid),  $\text{LH}_2$  (liquid)

neutron spectrum analysis, scattering angle distribution



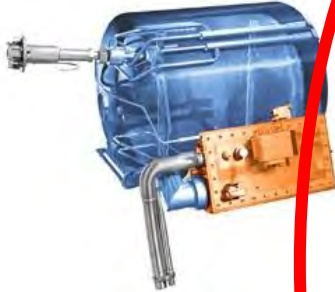


⇒ nur 30 m  
von uns entfernt

Nuclear experimental reactor  
for research and education

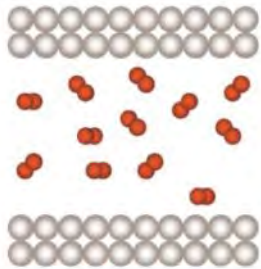
built 1978, up-dated  
uranium oxide (20 % U-235 = 794 g)  
max. 2 Watt thermal power  
neutron flux max.  $2.5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

# Wasserstoff: Festbett-Speicher

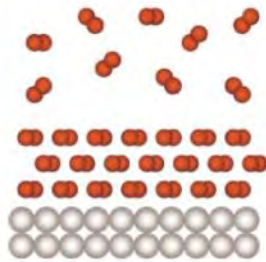
Druckgas, warm (CGH2)	Cryocompressed (CcH2)	flüssig (LH2)	Festbettspeicher
 <p>Bild: Dynetek</p>	 <p>Bild: BMW</p>	 <p>Bild: BMW</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Physisorption</li> <li>• Metalhydride</li> <li>• komplexe Hydride</li> <li>• chem. Bindung</li> </ul>
1 kg - 6 kg ein bzw. mehrere Einzelbehälter	4 kg - 12 kg therm. isolierter Drucktank	7 kg - 12 kg therm. isolierter Dewarbehälter	

# Wasserstoff: Festbett-Speicher

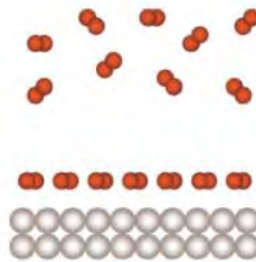
## HYDROGEN STORAGE



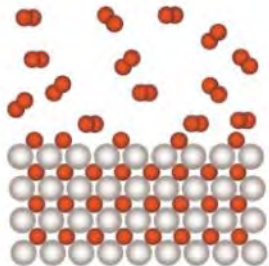
Hydrogen gas



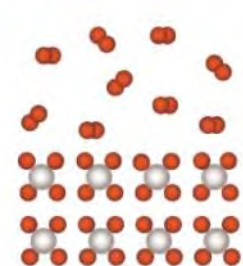
Liquid hydrogen



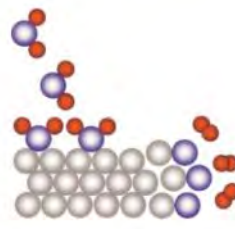
Physisorption



Metalhydride



Complex hydrides



Chemical hydrides

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

## Wasserstoff in Festkörper-Matrix:

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

Metalle: **Palladium, Ni**

Metall-Hydride: **Mg, Na**

Komplexe Hydride:  **$\text{NaAlH}_4$ ,  $\text{Mg}(\text{AlH}_4)_2$**

Laden:  $p \uparrow$  und/oder  $T \downarrow$  (exotherm)

Entladen:  $p \downarrow$  bzw.  $T \uparrow$  (endotherm)



## Wasserstoff: Festbett-Speicher

Mean distance between  
hydrogen molecules

CGH<sub>2</sub>  
1 bar  
300 K

3.3 nm

$5.6 \times 10^{19}$   
atoms cm<sup>-3</sup>



CGH<sub>2</sub>  
350 bars  
300 K

0.54 nm

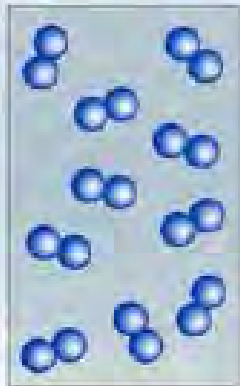
$1.3 \times 10^{22}$   
atoms cm<sup>-3</sup>



CGH<sub>2</sub>  
700 bars  
300 K

0.45 nm

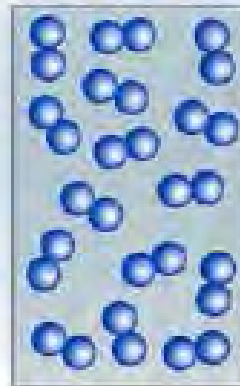
$2.3 \times 10^{22}$   
atoms cm<sup>-3</sup>



LH<sub>2</sub>  
1 bar  
20 K

0.36 nm

$4.2 \times 10^{22}$   
atoms cm<sup>-3</sup>

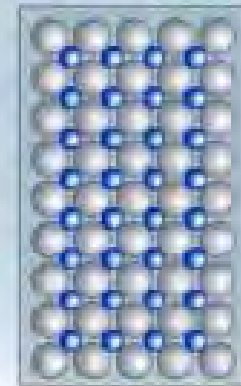


Mean distance between  
hydrogen atoms

Conventional  
metal hydrides

0.21 nm Westlake Criterion

$10.7 \times 10^{23}$   
atoms cm<sup>-3</sup>



**H<sub>2</sub>-Atome auf Zwischengitterplätzen dichter gepackt als in reinem LH<sub>2</sub> !**

# Wasserstoff: Festbett-Speicher

## Probleme Festmatrixspeicher:

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

einzigste Anwendung bisher:

### **H<sub>2</sub>-Speicher U-Boote**

Hydralloy: 1,5 Gew.-% H<sub>2</sub>

Ti Zr (Mn V Fe X)<sub>2</sub> - Legierung

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

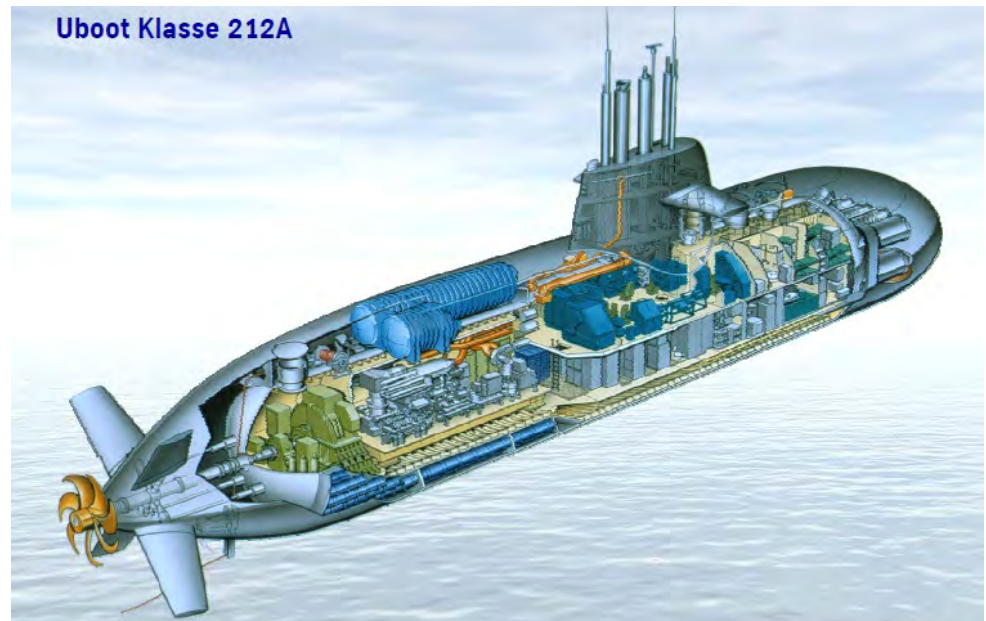


Bild: Howaldtswerke Dt. Werft