

Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung



Austin A 49
6 kW
range 300 km
prototype, 1970



F600 Hygenius
PEM, 60 kW
range 400 km
prototype, 2005



BMW Hydrogen 7
ICE V 12
range > 200 km
13,3 l (gasoline equivalent)
small series, 2006

MAN "Lion's City" bus
ICE (internal combustion engine)
150 kW, 750 Nm (max)
range > 200 km
small series 2006/07

www.H2Mobility.org



BMW Hydrogen 7.

Technical Data.

Maximum speed v_{max} 230 km/h (cut off)

Acceleration from 0-100 km/h 9.5 sec

Range

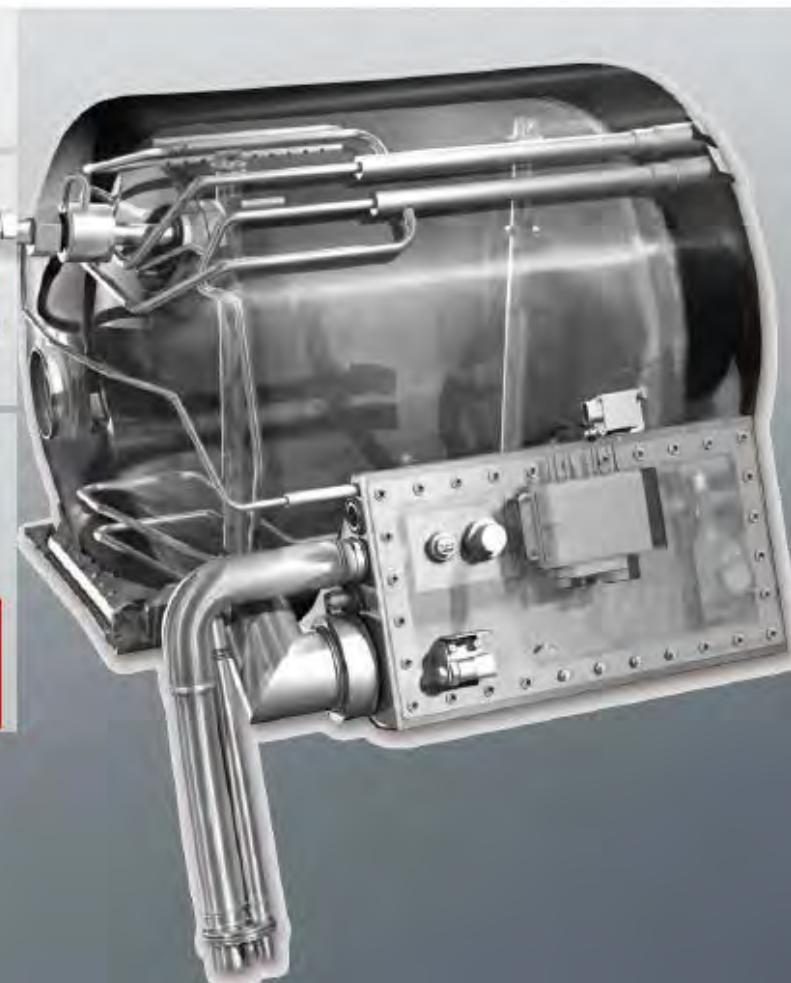
LH₂ > 200 km
Petrol > 500 km



BMW Hydrogen 7. Liquid Hydrogen Storage.

Type:	Cryogenic (LH_2) at approx. - 250 °C
Shape:	Double-walled
Insulation:	Vacuum super-insulation with Aluminium reflective foil multi-layer insulation
Fuel tank capacity:	~ 8 kg extractable H_2
Refuelling time:	< 8 minutes
Start Boil-off*:	17 h
Autonomy time*:	9 d

*Basis: half-full Tank



BMW Hydrogen 7. Refueling System and Catalytic Hydrogen Converter.



Refueling System:
Consortium
BMW AG, GM, Honda:
Development of a new
nozzle/receptacle
for a LH₂ refueling system.



**Boil-Off Management
System:**
development of a new
catalytic boil-off gas
converter system.

BMW Hydrogen 7.

Bifueled H₂ Combustion Engine.

Bifueled 12-cylinder engine
(LH₂ / petrol)

Capacity 6.0 litres

Maximum output 191 kW (260 bhp)
at 5100 rpm

Maximum torque 390 Nm at
4300 rpm

H₂: External fuel-
mixture generation

Petrol: Direct injection



Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung



LH₂ Powered ICE



Advancements in Cryogenic and Direct injection



PEM-APU



First LH₂-Test Bench



Hydrogen Storage



LH₂-Refueling



LH₂ Refueling Station

1979



First LH₂-ICE Vehicle



CleanEnergy World Tour



6 Generations



H₂R



Hydrogen 7

2006

Entwicklungsarbeiten Fa. BMW zum Thema Wasserstoff

(Quelle: BMW)

BMW Hydrogen 7.

6th Generation, ~ 100 Vehicles, in Customer Hands.



Hydrogen Road Tour 2008.

On Tour with Mobile Refueling.

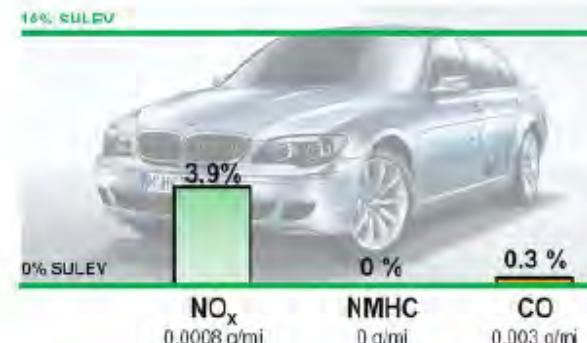


Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung

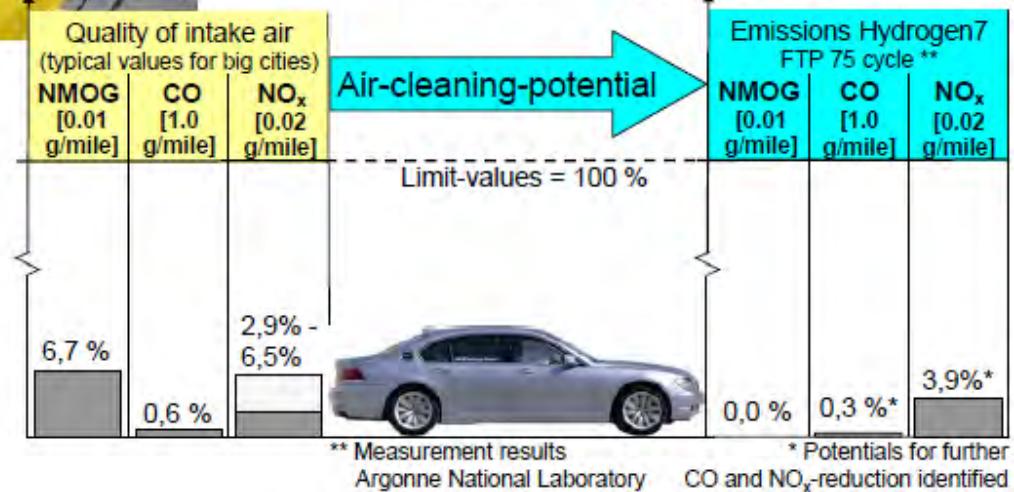


Emissions results*
BMW Hydrogen 7

Studie: Argonne Labs, USA



→ Exceeding the limits of emission detection:



Messung H2-Verbrennungsmotor: Luft am Auspuff sauberer als Großstadt-Umgebung

**Gesetzgebung USA: „Zero Emission“ ⇒ BMW H2-Verbrennungsmotor aufgegeben,
auf Brennstoffzellen-Pkw umgestellt**

Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung



Type:
Horse Front Drive

Specifications:

bio-propulsion	15 ccm
displacement	0 l
fuel economy:	1 hp
horsepower:	20 mph
V _{max} :	20 miles
cruising range:	

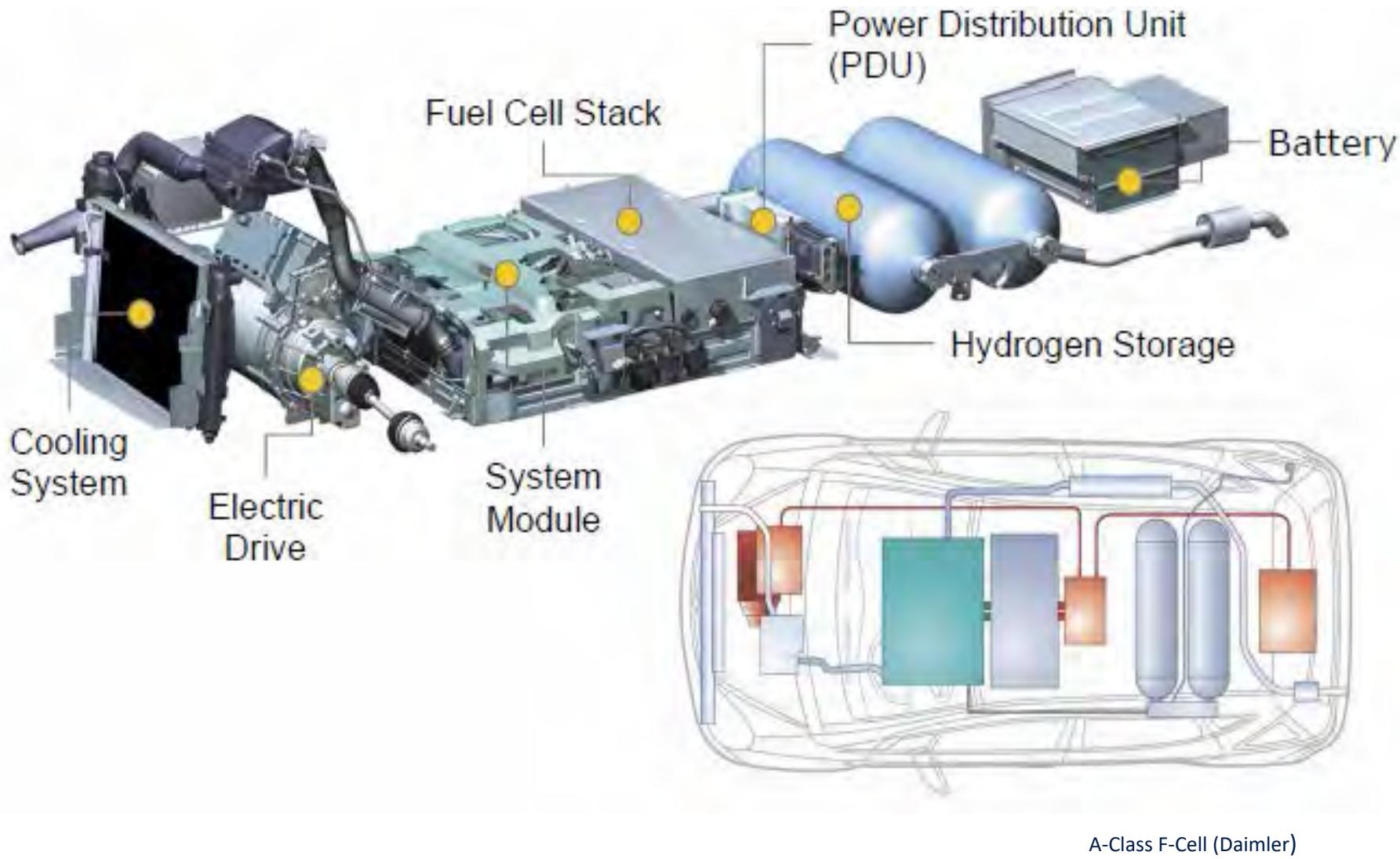
Options:

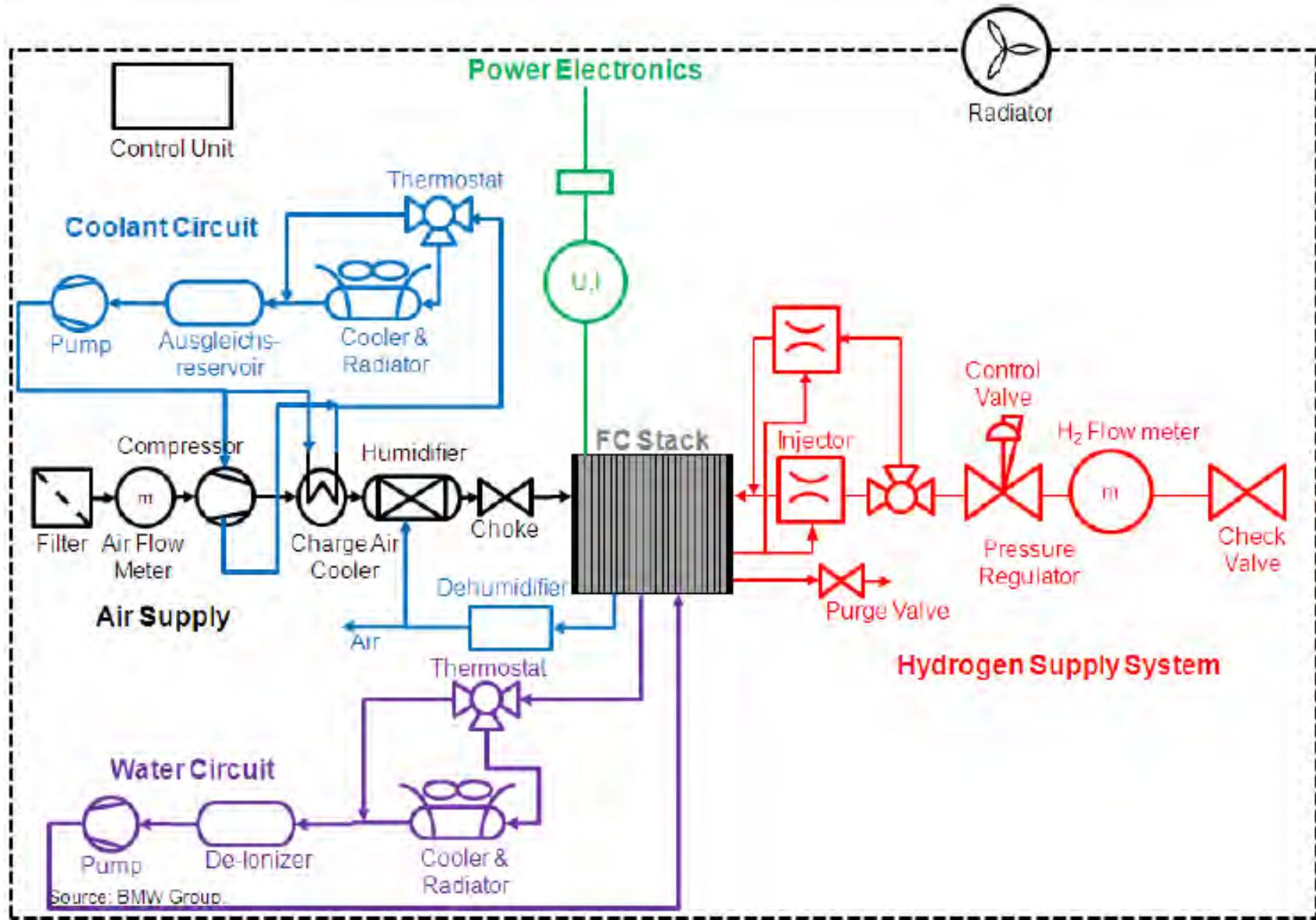
- navigation system
- full air conditioning

Emissions:

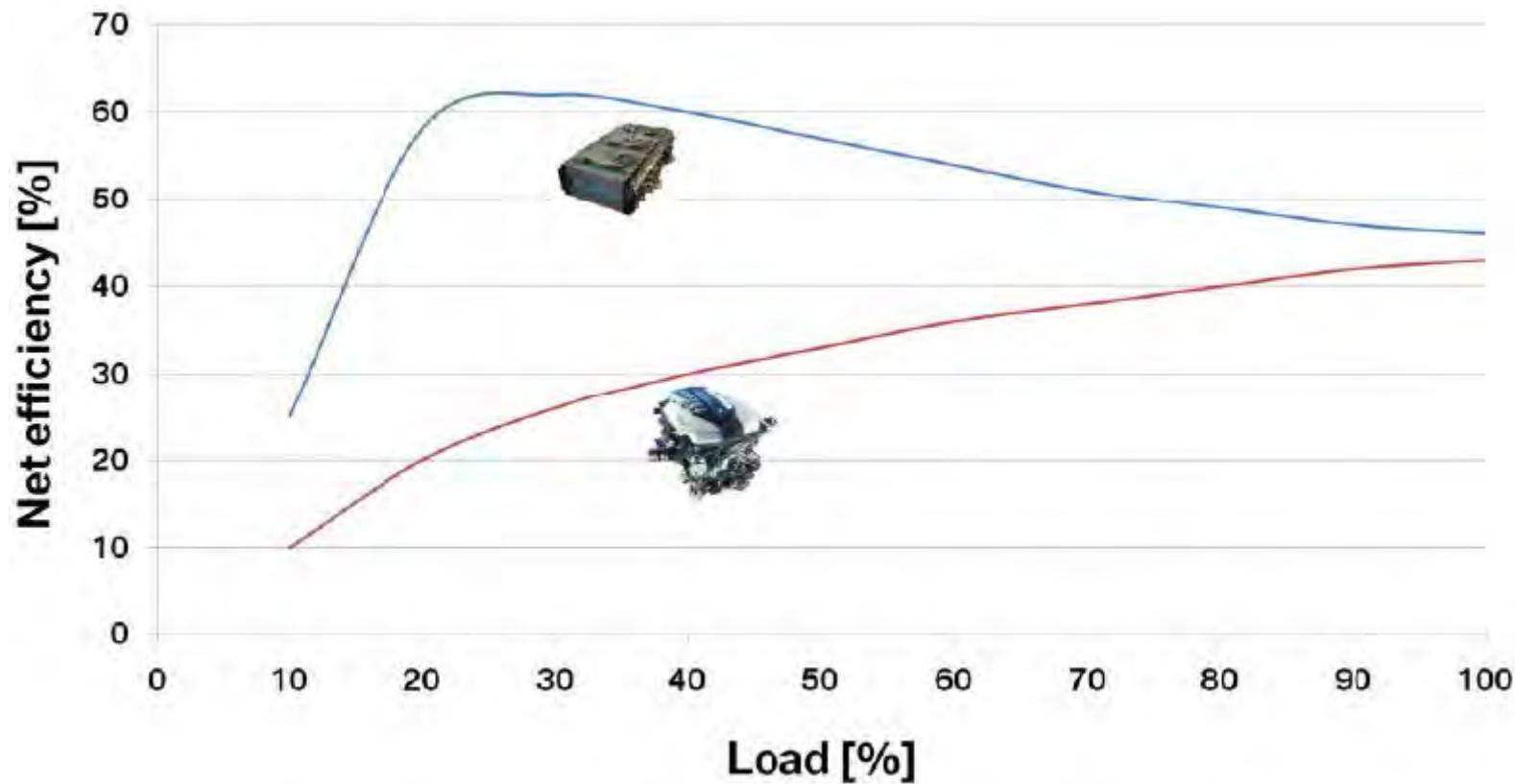
CO ₂	= 380 g/mile
CH ₄	= 1,6 g/mile
particles	= 800 g/mile
low-emission	

Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung

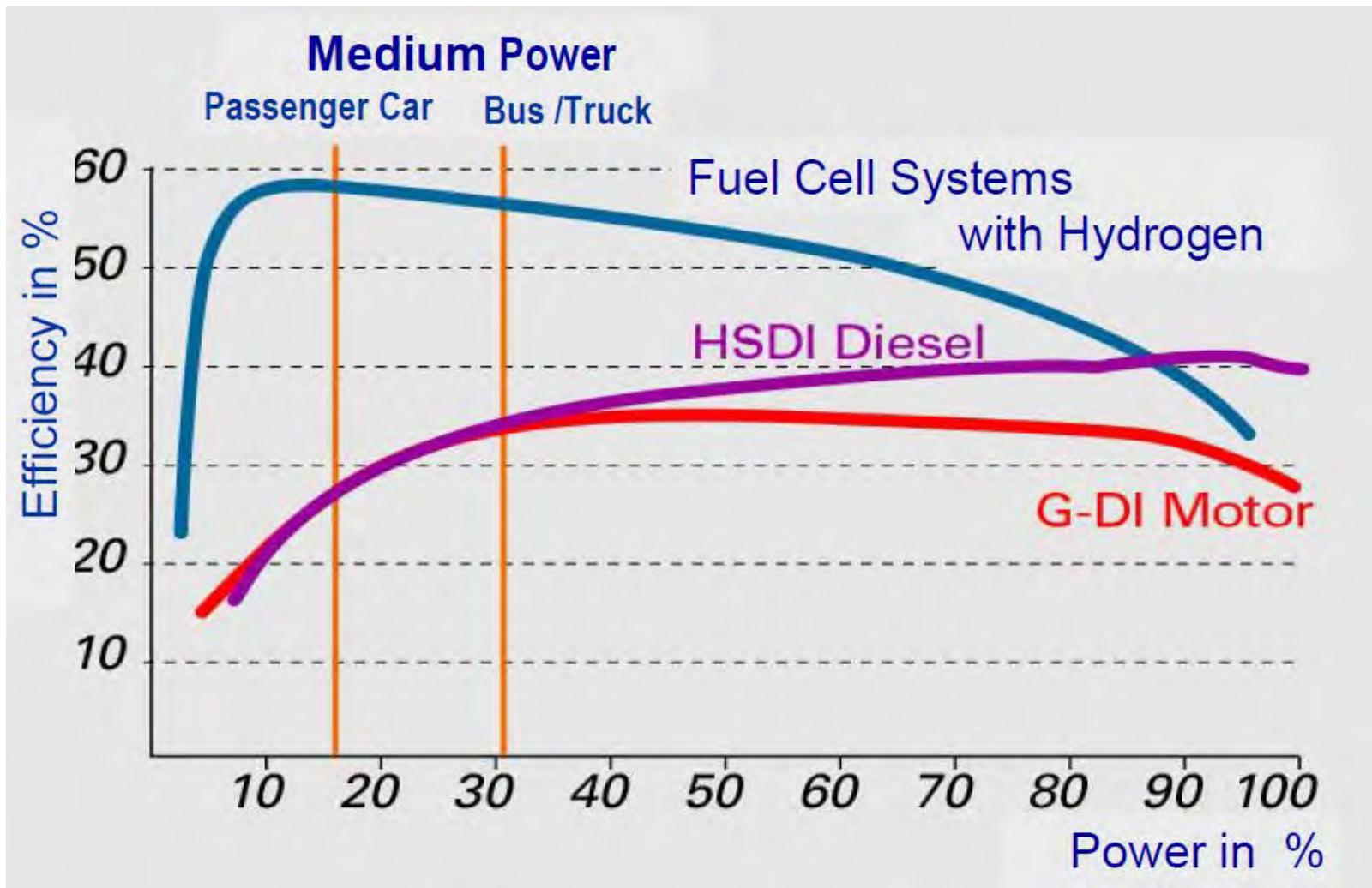




Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung



Vergleich Teillast-Wirkungsgrade Brennstoffzelle vs. H₂-Verbrennungsmotor (Quelle: BMW)



(Quelle: Töpler/DWV)

Vergleich Teillast-Wirkungsgrade Brennstoffzelle vs. Verbrennungsmotor

Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung

DAIMLER



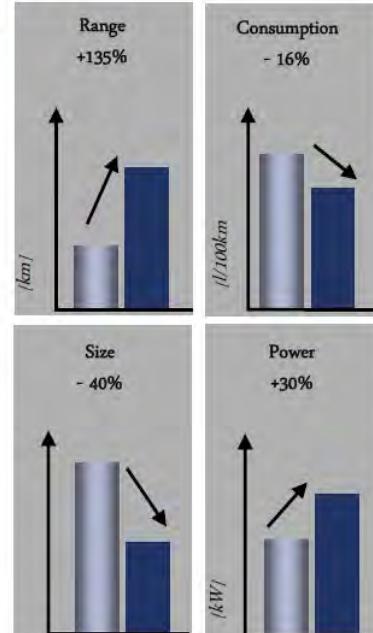
A-Class F-Cell

Technical Data	
Vehicle Type	Mercedes-Benz A-Class (Long)
Fuel Cell System	PEM, 72 kW (97 hp)
Engine	Engine Output (Continuous / Peak): 45 kW / 65 kW (87hp) Max. Torque: 210 Nm
Fuel	Hydrogen (35 MPa / 5,000 psi)
Range	105 miles (170 km / NEDC)
Top Speed	88 mph (140 km/h)
Battery	NiMh, Output (Continuous / Peak): 15 kW / 20 kW (27hp); Capacity: 6 Ah, 1.2 kWh

- Next generation of the fuel cell-power train:
- Higher stack lifetime (>2000h)
 - Increased power
 - Higher reliability
 - Freeze start ability
 - Li-Ion Battery



B-Class F-Cell



Technical Data	
Vehicle Type	Mercedes-Benz B-Class
Fuel Cell System	PEM, 90 kW (122 hp)
Engine	IPT Engine Output (Continuous/ Peak) 70kW / 100kW (136hp) Max. Torque: 290 Nm
Fuel	Compressed Hydrogen (70 MPa / 10,000 psi)
Range	ca. 250 miles (400 km)
Top Speed	106 mph (170 km/h)
Battery	Li-Ion, Output (Continuous/ Peak): 24 kW / 30 kW (40hp); Capacity 6.8 Ah, 1.4 kWh

Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung

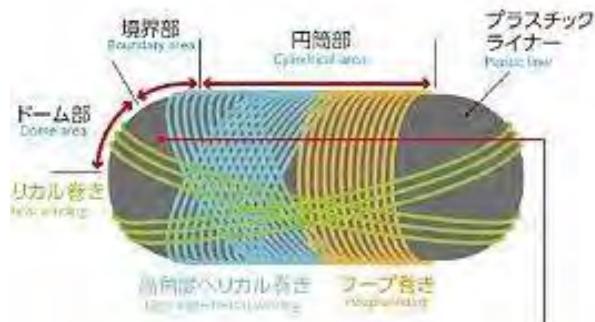
Honda, BZ-Fahrzeugkonzept



Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung

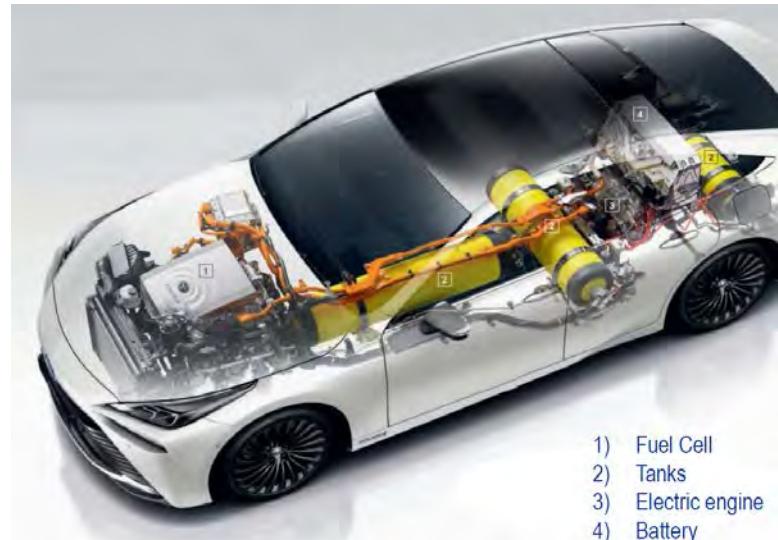
Toyota Mirai_1

Erstes Wasserstoff-Auto in Serienproduktion
PEM-FC 114 kW + NiMH-Batterie
CH2-Tanks 60 l + 62,4 l / 700 bar
Reichweite ca. 500 km
Japan 2014 – 2020; gesamt 10 000 Exemplare
In Europa seit Sept. 2015 (78 540 €/ Leasing nur)



verbesserte Tanktechnologie

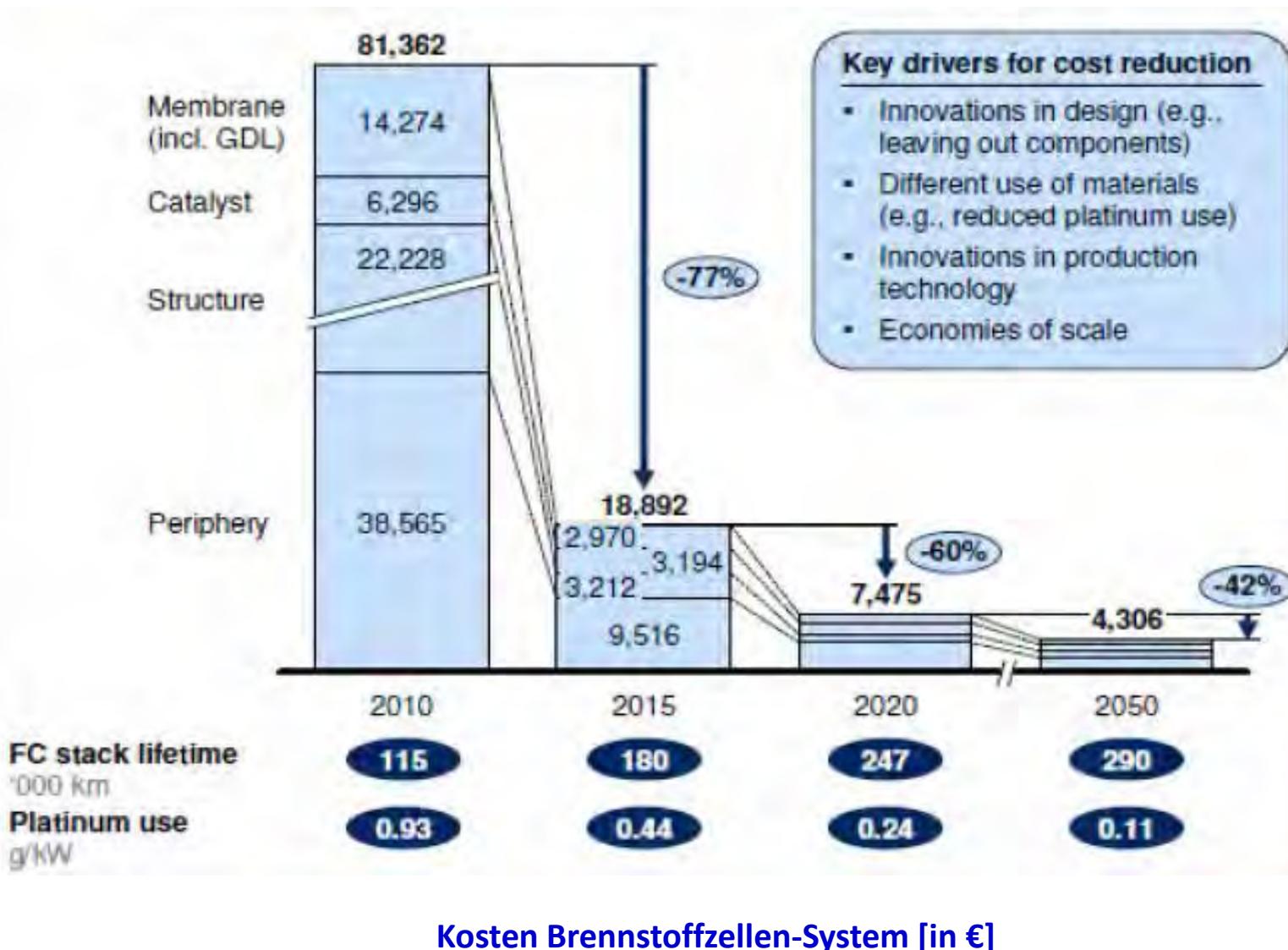
⇒ 5,7 Gewichts-% H₂



seit 2020: Toyota Mirai_2

3. CGH2-Tank, ges. 5,6 kg H2; Reichweite 650 km
PEM-BZ + Batterie 1,24 kWh, Motor 134 kW
Basispreis in Dt.: 63 900 €; bislang in Dt. 1000 zugelassen

Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung



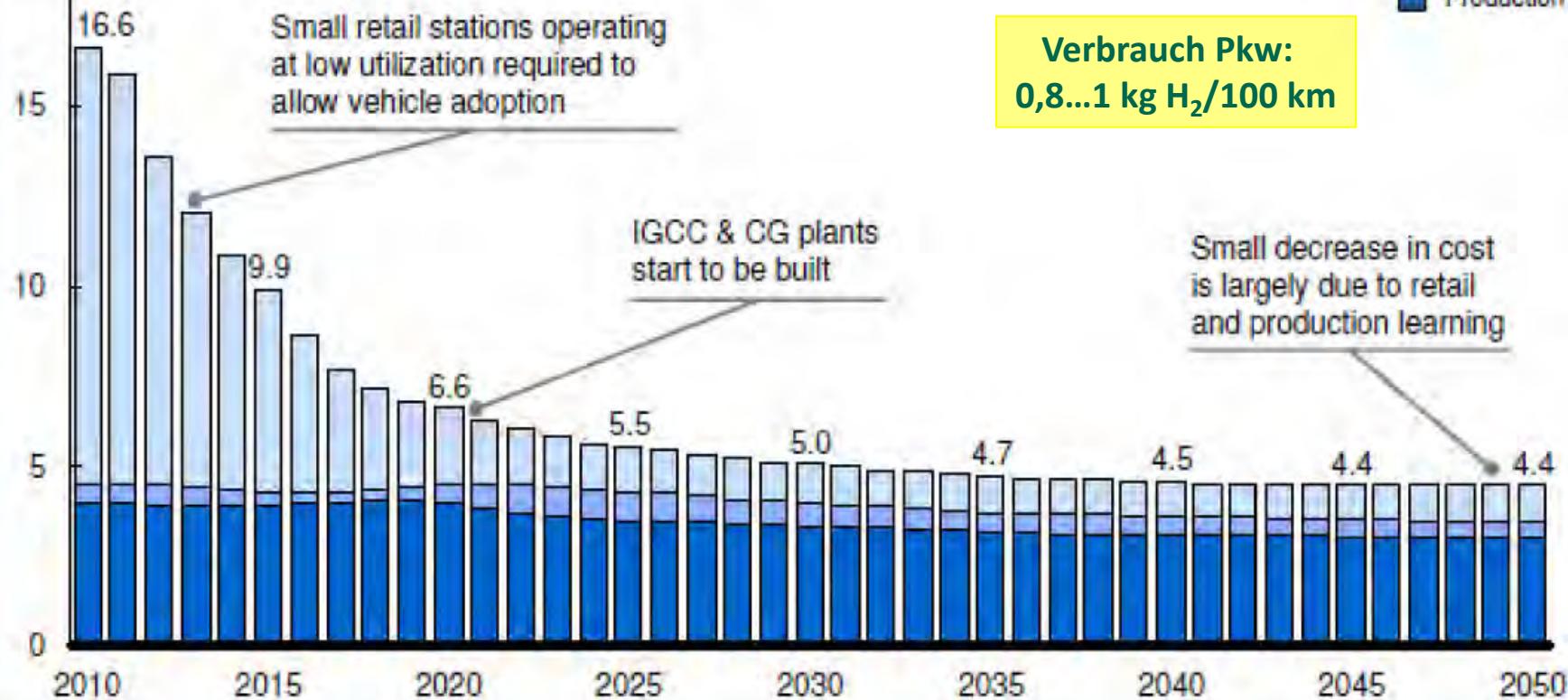
Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung

Abgabepreis an H₂-Tankstelle Dt.:

	H2 grün	H2 grau
350 bar	9,50 €/kg	12,85 – 13,75 €/kg
700 bar	11,00 €/kg	13,85 – 15,25 €/kg

- Retail
- Distribution
- Production

Hydrogen cost
EUR/kg

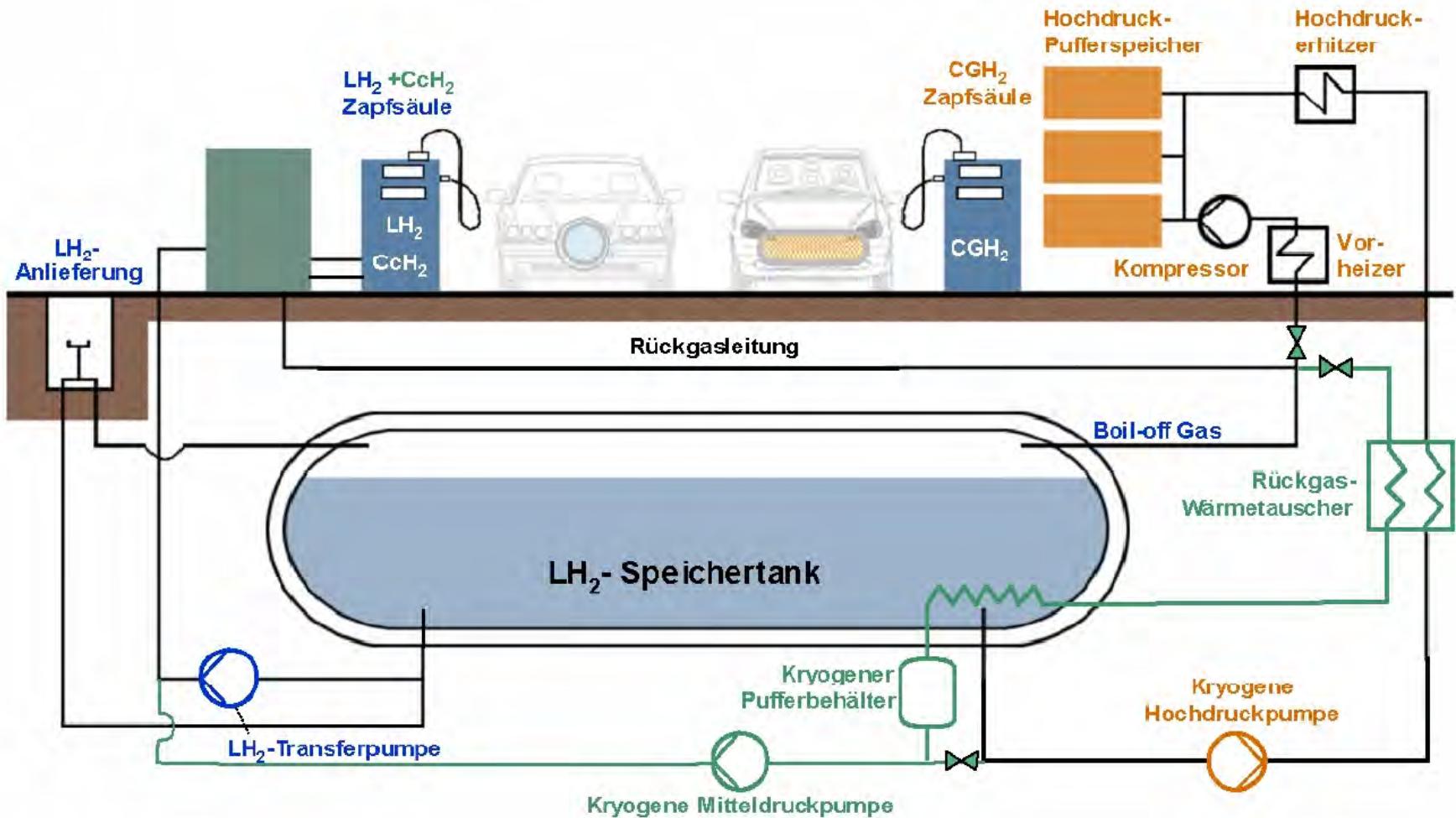


IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle – GuD-Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung)

CG: Coal Gasification

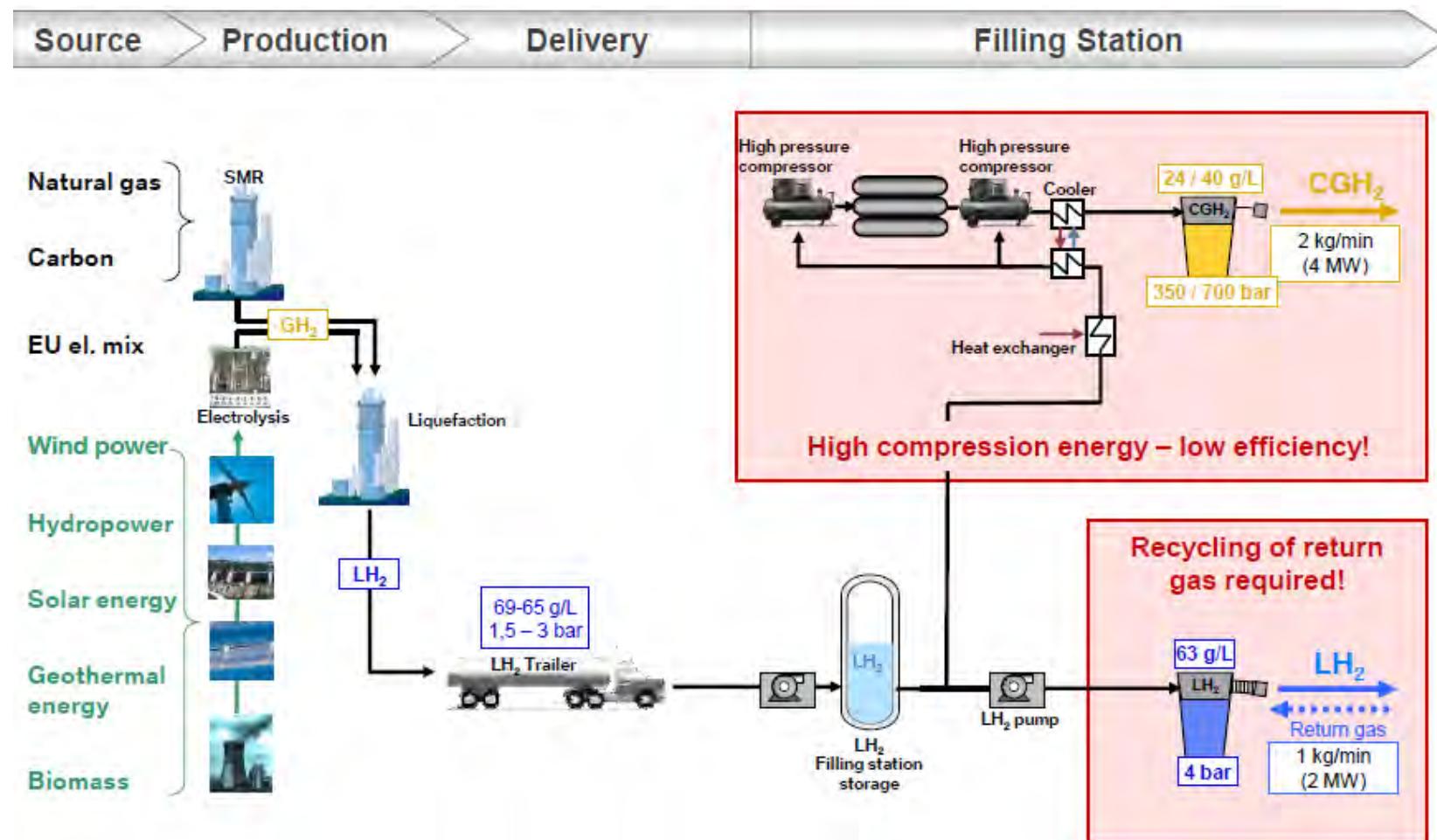
Erwartete Preisentwicklung Wasserstoff (ohne Steuern und Abgaben) Quelle: EU Hydrogen FCV Coalition

Wasserstoff: Tankstellen



Picture: www.H2Mobility.org

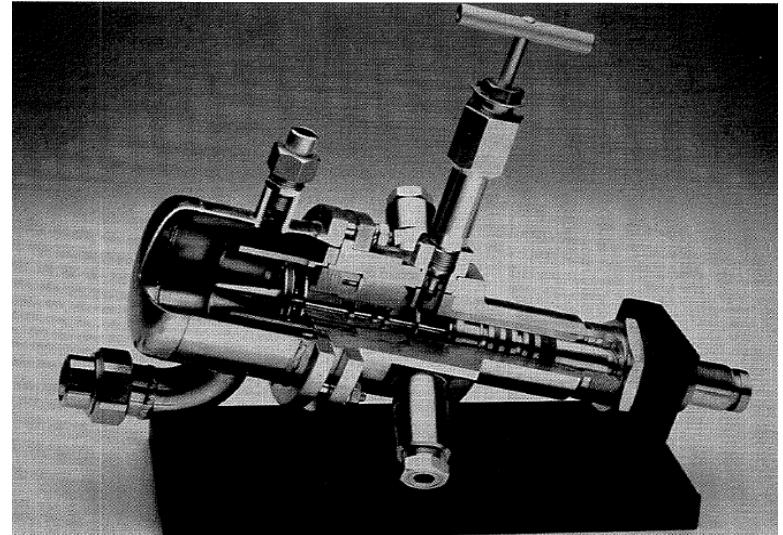
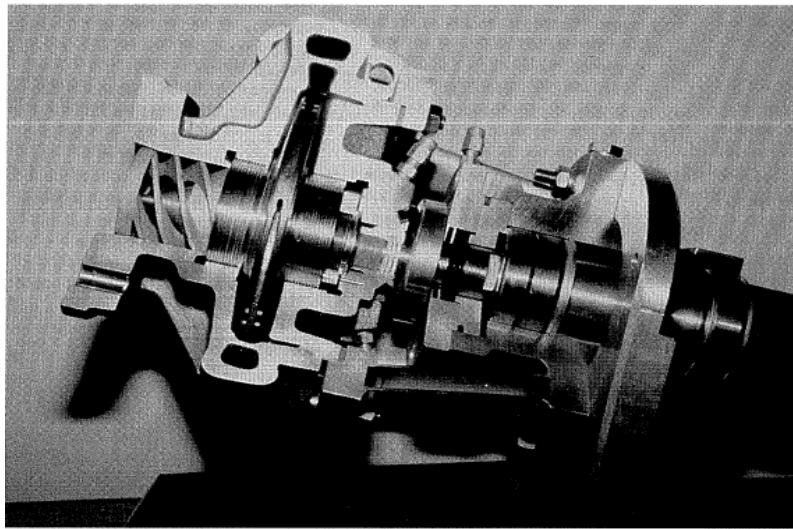
Wasserstoff: Tankstellen



Versorgungskonzept Wasserstoff-Tankstellen (LH₂ für Transport und Speicherung)

Quelle: BMW

LH₂- Pumpen / Verdichter



LH₂-Zentrifugalturbopumpe CRYOMEC, 1989 (links) und

LH₂-Hochdruckkolbenpumpe 800 bar CRYOMEC (rechts)

[W. Peschka, Liquid Hydrogen]

Wasserstoff: Tankstellen

Bereitstellen von Hochdruck-Wasserstoff:

Verdichtung in tiefkalt-flüssigem Zustand wesentlich weniger energieaufwändig:

flüssig, einstufig

p ₁ [bar]	T ₁ [K]	p ₂ [bar]	T ₂ [K]	h ₁ [kJ/kg]	h ₂ [kJ/kg]	a _s [kJ/kg]
1.1	20.54	150	26.13	273.4	471.3	197.9
1.1	20.54	300	30.1	273.4	654.2	380.8

gasförmig, einstufig

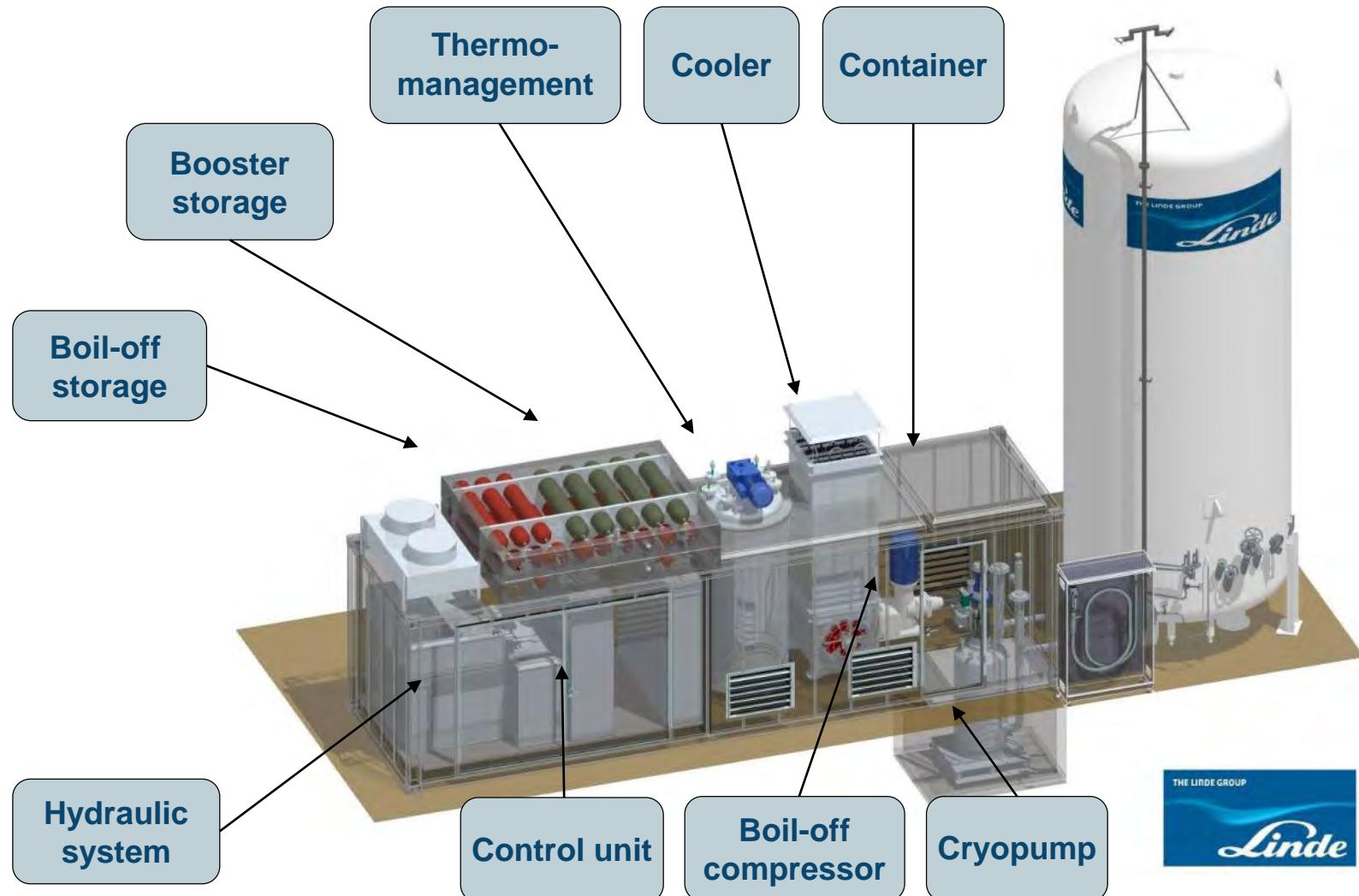
1.1	20.56	150	139.1	717.8	1993.0	1275.2
1.1	20.56	300	173.6	717.8	2531.0	1813.2

Arbeitsaufwand beim Verdichten (isentrope Verdichtung, H₂ als reales Fluid)
[Eichlseder/Klell, Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Vieweg + Teubner 2008]

Probleme:

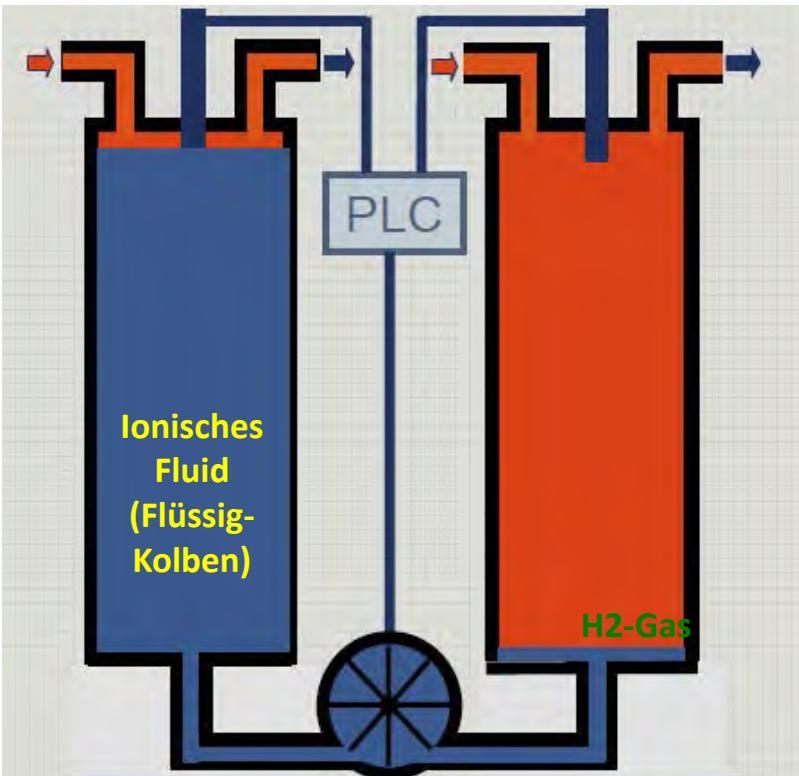
- Pumpe anfangs warm: anfangs Zweiphasenverdichter (Gasförderung, geringe Schadräume etc.)
- trockene Dichtung (selbstschmierende Dichtringe (PE), mittlere Kolbengeschw. 0,5 m/s)
- bei Förderung an der Siedelinie **NPSH (net positive suction head) = 0**
sonst starke Unterkühlung notwendig, um Verdampfung beim Ansaugen zu vermeiden

Wasserstoff: Tankstellen



Quelle: Prof. Belloni,
Linde / TUD

Wasserstoff: Tankstellen



Quelle: Linde

"Ionischer Verdichter":

(Linde Österreich, seit ~ 2005)

ionische Flüssigkeit (viele Varianten organisch / anorganisch)

- stabil / unbrennbar
- Dampfdruck praktisch null
- gute Schmiereigenschaften
- hohe Wärmekapazität
- keine Gaslöslichkeit

⇒ Flüssigkolben, verschleißfrei;
kontaminationsfrei;
nahezu isoterme Verdichtung realisierbar

Reference projects ATZ, Agip Frankfurt



Accessibility: Public

Start of operation: 2006

Dispensing lines: 1 x 700 bar
1 x 350 bar
1 x LH₂

Technology: Ionic Compression

H₂ source: LH₂ storage tank
900 bar pipeline

Customer:



Reference projects ATZ, Total Berlin



Accessibility: Public and BVG premises

Start of operation: 2006

Dispensing lines: 1 x 700 bar car
1 x 350 bar car
1 x 350 bar bus
2 x LH₂

Technology: Ionic Compression (2x)
Dry Runner (2x)

H₂ source: LH₂ storage tank
on-site H₂ reformer

Customer:



Wasserstoff: Tankstellen

Abgabepreis an H₂-Tankstelle Dt. (Stand Nov. 2023):

	H2 grün	H2 grau
350 bar	9,50 €/kg	12,85 – 13,75 €/kg
700 bar	11,00 €/kg	13,85 – 15,25 €/kg

Verbrauch Pkw: 0,8...1 kg H₂/100 km



Source: Prof. Belloni, Linde / TUD

Wasserstoff: Tankstellen

LH2-Kupplung



source pictures:
BMW, Linde



LH₂-Anwendung Nutzfahrzeuge

Mercedes-Benz GenH2 Truck

- Prototyp 2023
- Serie ab 2026

Beitrag TUD, Gruppe Haberstroh:

- ✓ Beratung Kryotechnik
- ✓ Konstruktionsdetails
- ✓ thermodynamische Berechnungen
- ✓ Konzept Komponenten, Tests
- ✓ Analyse Testdaten



Daimler Wörth, Okt. 2022



**EU-Vorgabe
Flottengrenzwerte
Schwerlastverkehr:**

- 15 % CO₂ bis 2025
- 30 % CO₂ bis 2030

2 x 42 kg LH₂



LH₂-Anwendung Nutzfahrzeuge

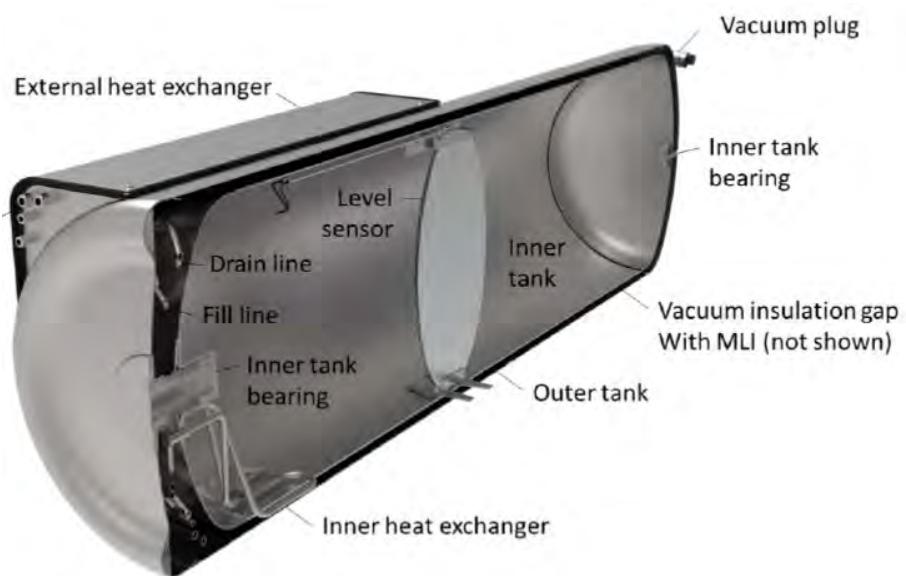


Material:	Stainless steel 1.4301,
Outer Diameter	711 mm
Overall Length	2500 mm
Operating Pressure	5 - 20 barg
MAWP	21 barg
Inner tank gross volume	760 l
Weight	430 kg wo H ₂
Hold time at 50 % SOC	4 d
Capacity approx.	42 kg LH ₂

SAG-Tank für LH₂-Truck Daimler

Okt. 2022:
1000 km Reichweite demonstriert

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



Wasserstoff: Vergleich Speicherdichte

Diesel



System
Fuel

43 kg
33 kg



46 L
37 L

Compressed Hydrogen 700 bar
 $6 \text{ kg H}_2 = 200 \text{ kWh}$ chemical energy



System
Fuel

125 kg
6 kg



260 L
170 L

Lithium Ion Battery
100 kWh electrical energy



System
Cell

830 kg
540 kg



670 L
360 L

Source: Toepler, DWV

Wasserstoff: Vergleich Speicherdichte

