

# 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](http://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	
-------	--

LH <sub>2</sub>	> 200 km
-----------------	----------

Petrol	> 500 km
--------	----------



# BMW Hydrogen 7. Liquid Hydrogen Storage.

Type:	Cryogenic (LH <sub>2</sub> ) 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 <sub>2</sub>
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  $LH_2$  refueling system.



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

# BMW Hydrogen 7. Bifueled H<sub>2</sub> Combustion Engine.

Bifueled 12-cylinder engine  
(LH<sub>2</sub> / petrol)

Capacity	6.0 litres
Maximum output	191 kW (260 bhp) at 5100 rpm
Maximum torque	390 Nm at 4300 rpm
H <sub>2</sub> :	External fuel- mixture generation
Petrol:	Direct injection





# Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung



LH<sub>2</sub> Powered ICE



Advancements in Cryogenic and Direct injection



PEM-APU



First LH<sub>2</sub>-Test Bench



Hydrogen Storage



LH<sub>2</sub>-Refueling



LH<sub>2</sub> Refueling Station



First LH<sub>2</sub>-ICE Vehicle



CleanEnergy World Tour



6 Generations



H<sub>2</sub>R



Hydrogen 7

**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.

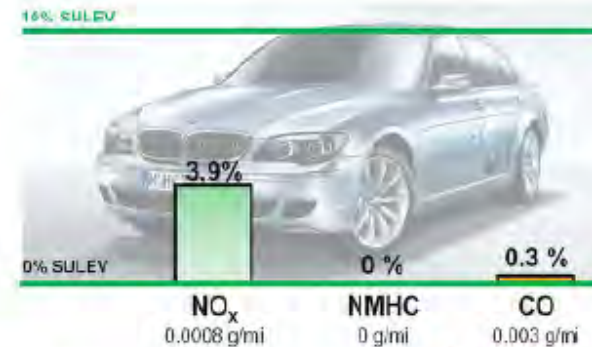




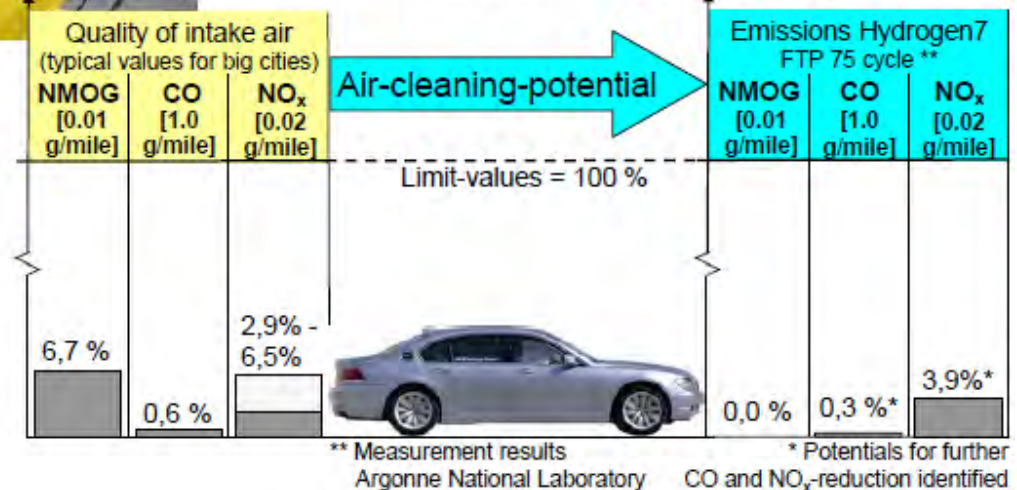


Emissions results\*  
BMW Hydrogen 7

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	
displacement:	15 ccm
fuel economy:	0 l
horsepower:	1 hp
$V_{max}$ :	20 mph
cruising range:	20 miles

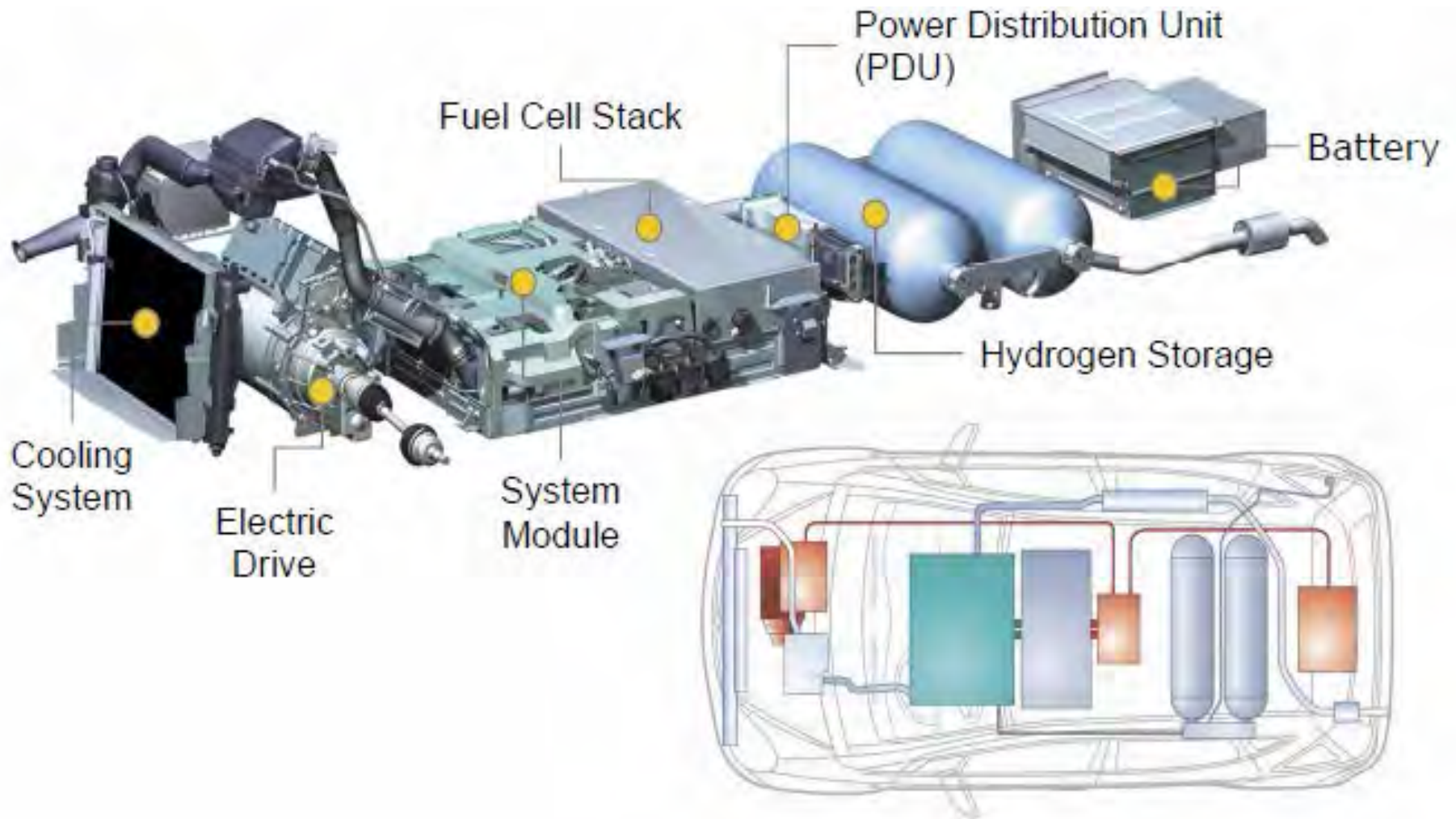
Options:

- navigation system
- full air conditioning

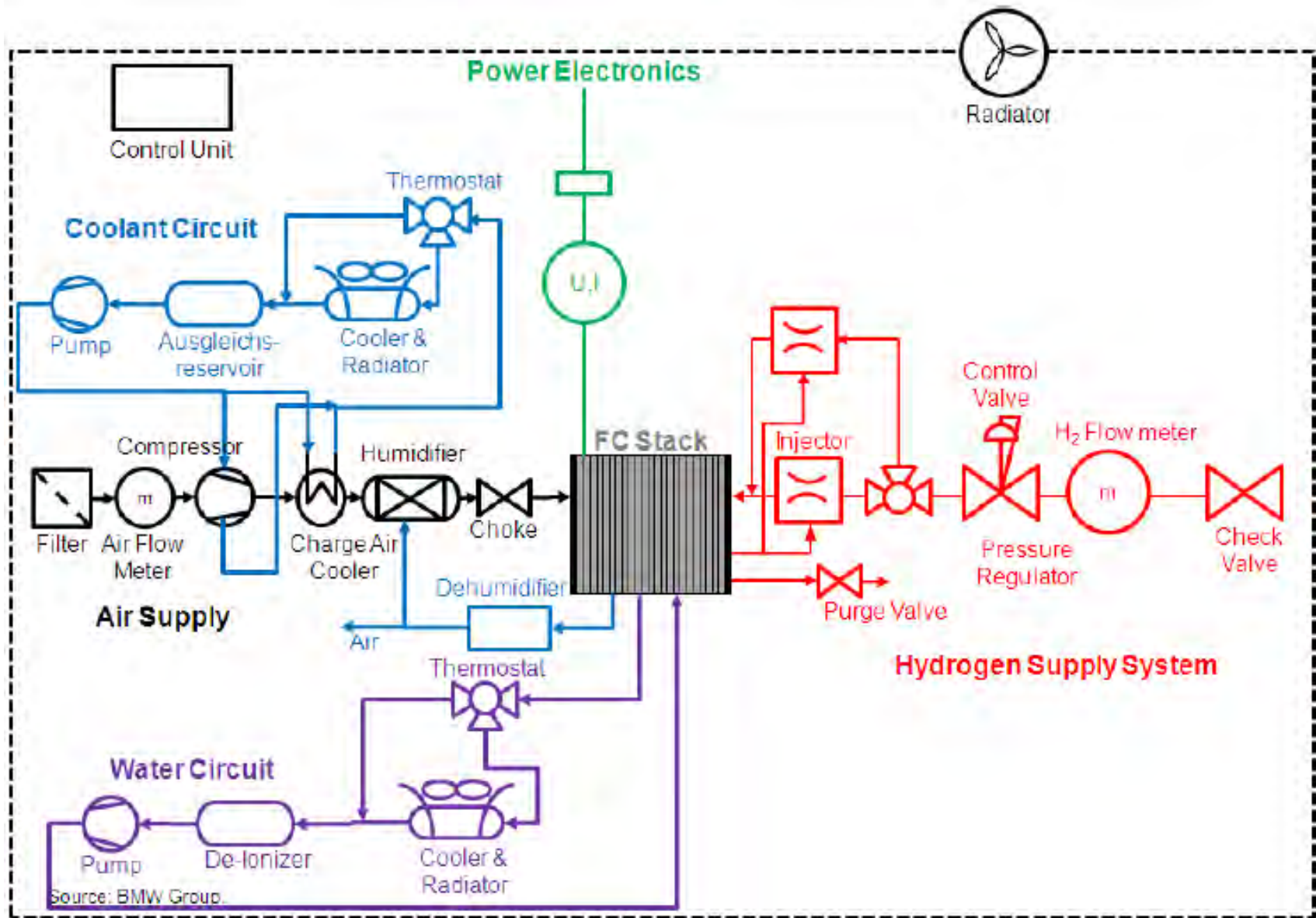
Emissions:

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

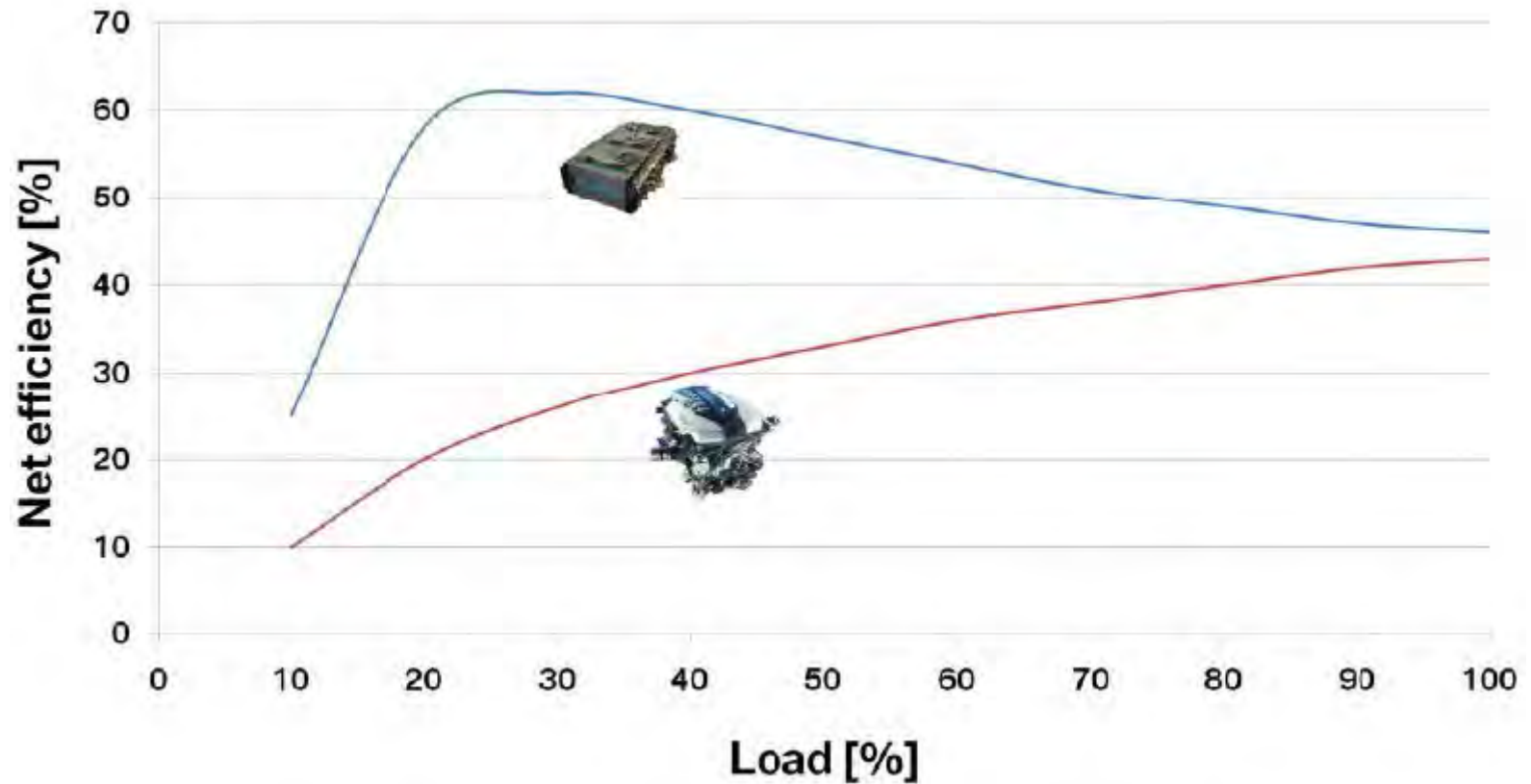




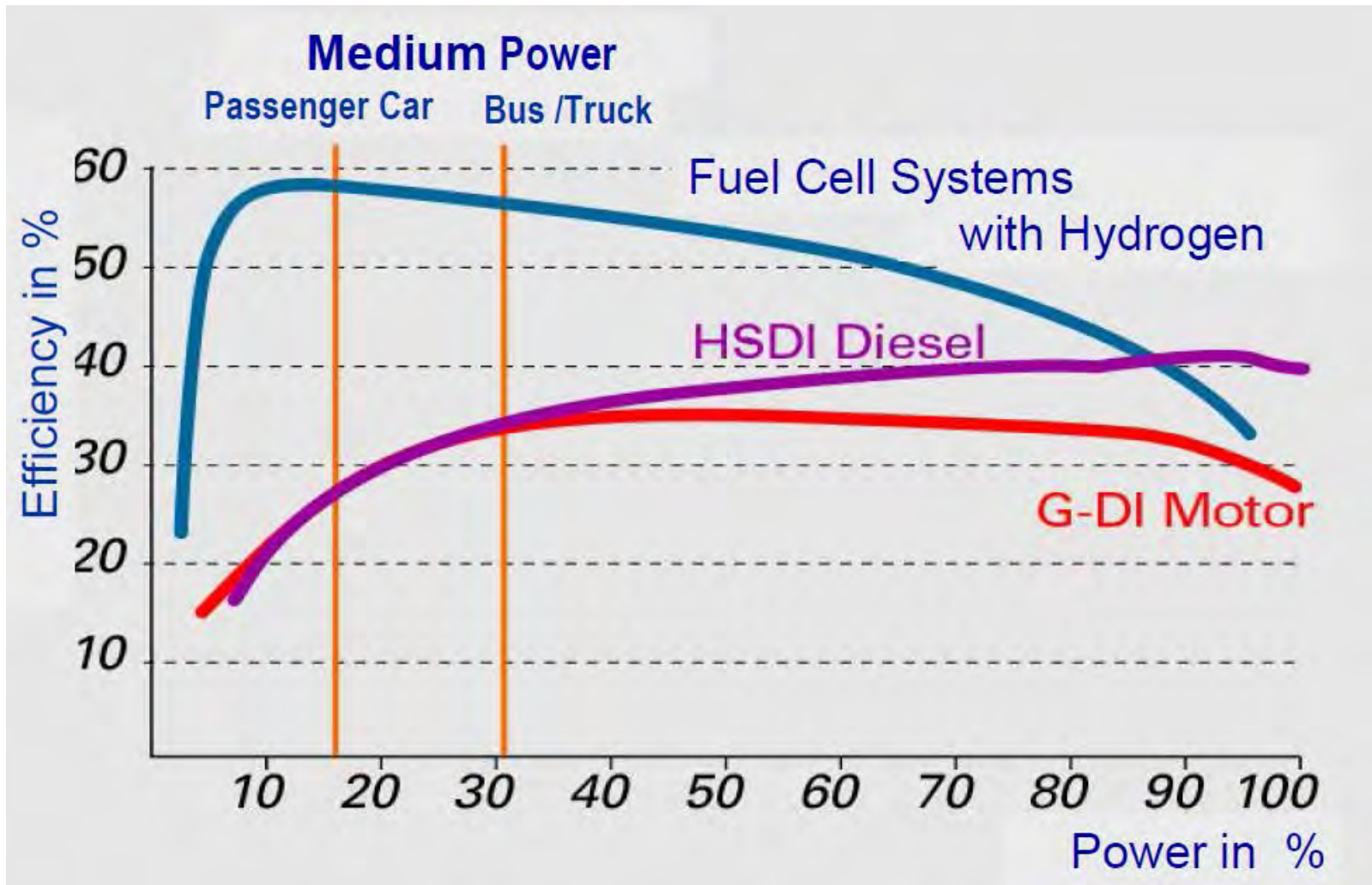
A-Class F-Cell (Daimler)







Vergleich Teillast-Wirkungsgrade Brennstoffzelle vs. H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor (Quelle: BMW)



(Quelle: Töpler/DWV)

### Vergleich Teillast-Wirkungsgrade Brennstoffzelle vs. Verbrennungsmotor



## DAIMLER



A-Class F-Cell

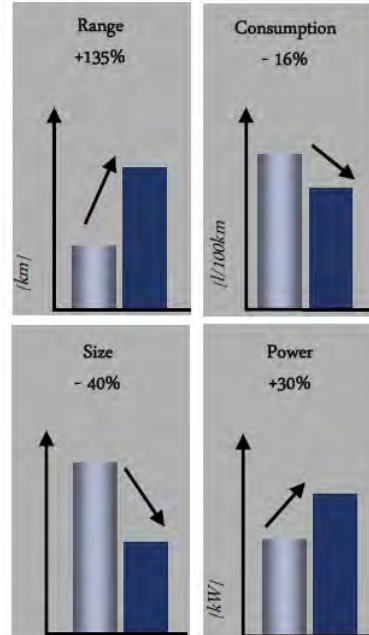
Next generation of the  
fuel cell-power train:

- Higher stack lifetime (>2000h)
- Increased power
- Higher reliability
- Freeze start ability
- Li-Ion Battery



B-Class F-Cell

Technical Data	
Vehicle Type	Mercedes-Benz 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



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

Quelle: J. Toepler, DWV

## Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung

Honda, BZ-Fahrzeugkonzept





# Wasserstoff: Fahrzeugentwicklung

## Toyota Mirai\_1

Erstes Wasserstoff-Auto in Serienproduktion

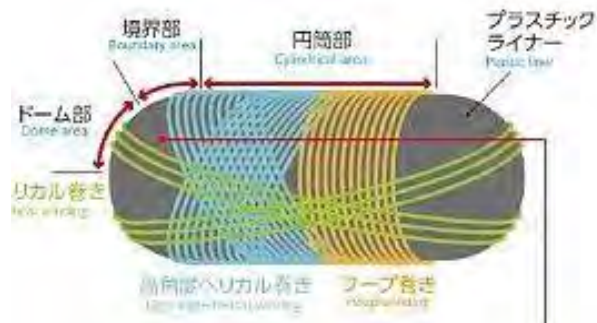
PEM-FC 114 kW + NiMH-Batterie

CH<sub>2</sub>-Tanks 60 l + 62,4 l / 700 bar

Reichweite ca. 500 km

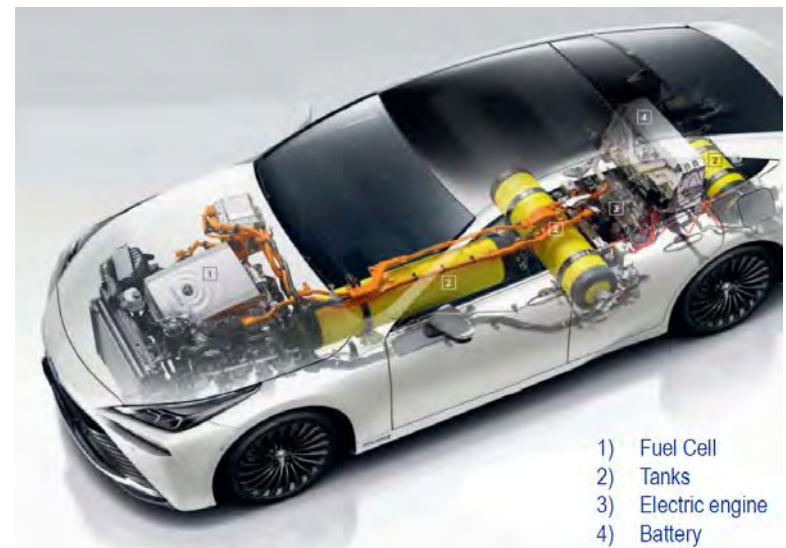
Japan 2014 – 2020; gesamt 10 000 Exemplare

In Europa seit Sept. 2015 (78 540 €/ Leasing nur)



verbesserte Tanktechnologie

⇒ 5,7 Gewichts-% H<sub>2</sub>



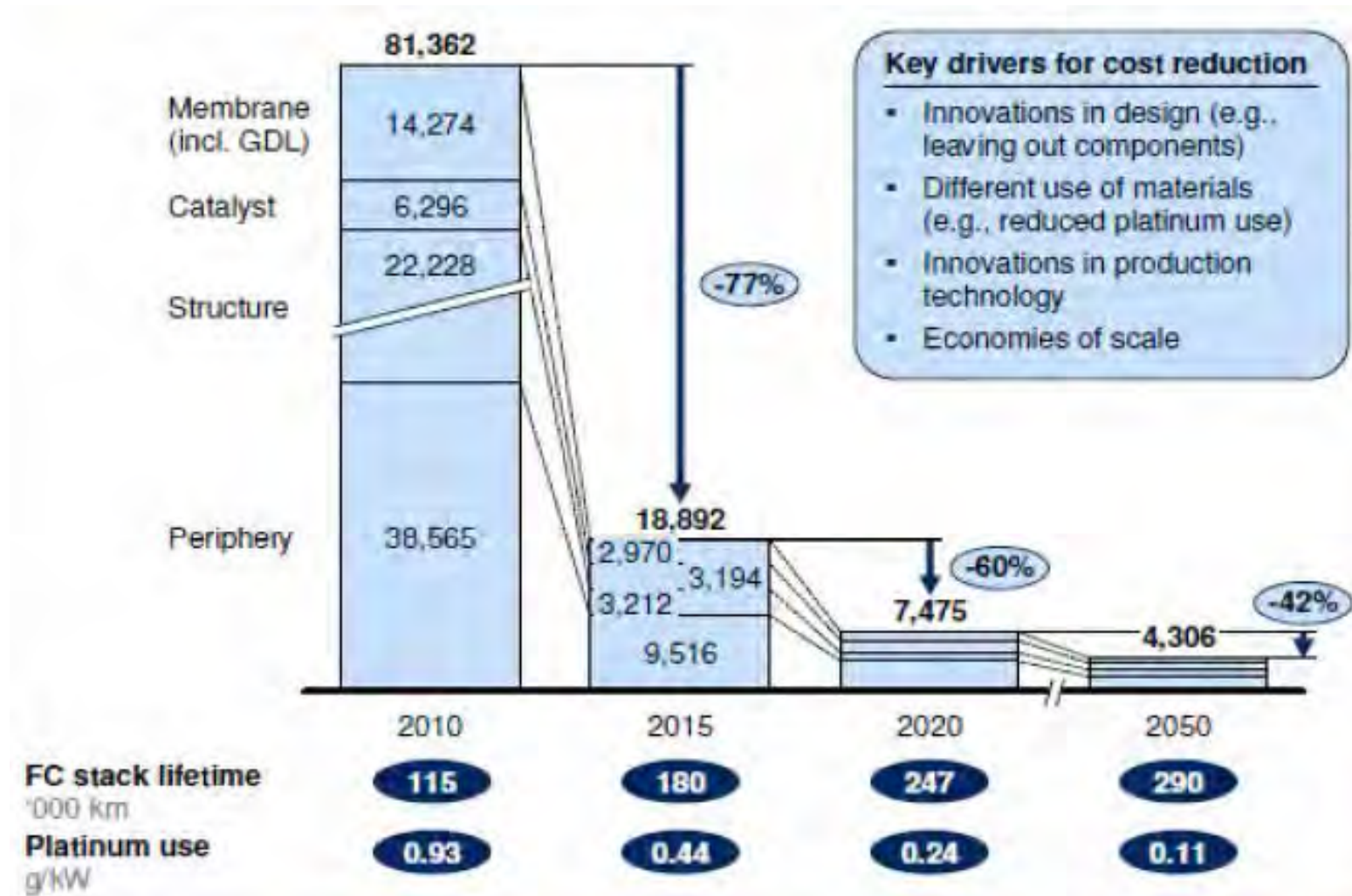
## seit 2020: Toyota Mirai\_2

3. CGH<sub>2</sub>-Tank, ges. 5,6 kg H<sub>2</sub>; Reichweite 650 km

PEM-BZ + Batterie 1,24 kWh, Motor 134 kW

Basispreis in Dt.: 63 900 €; bislang in Dt. 1000 zugelassen

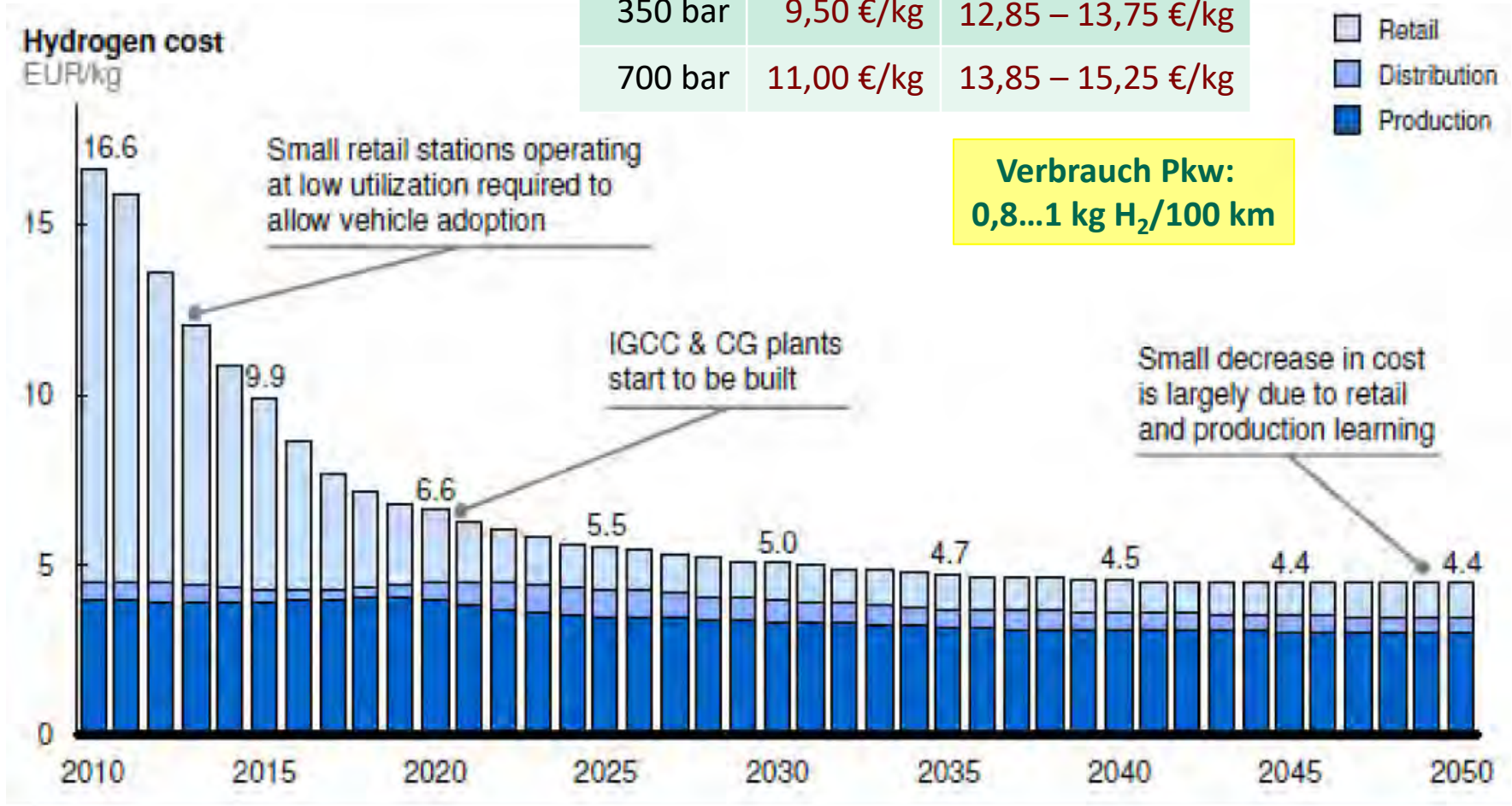




Kosten Brennstoffzellen-System [in €]

## Abgabepreis an H<sub>2</sub>-Tankstelle Dt.:

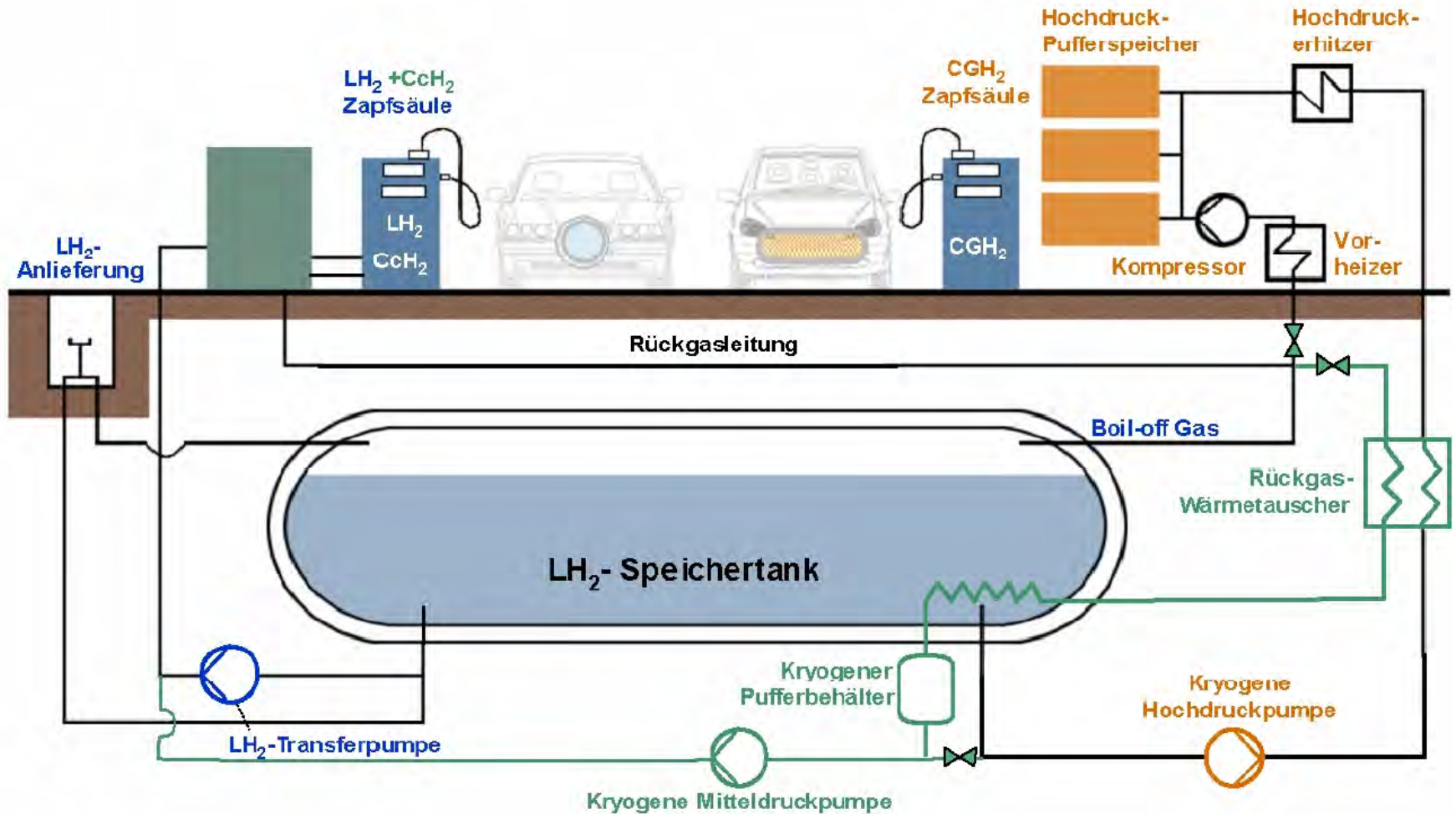
	H2 grün	H2 grau
350 bar	9,50 €/kg	12,85 – 13,75 €/kg
700 bar	11,00 €/kg	13,85 – 15,25 €/kg



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

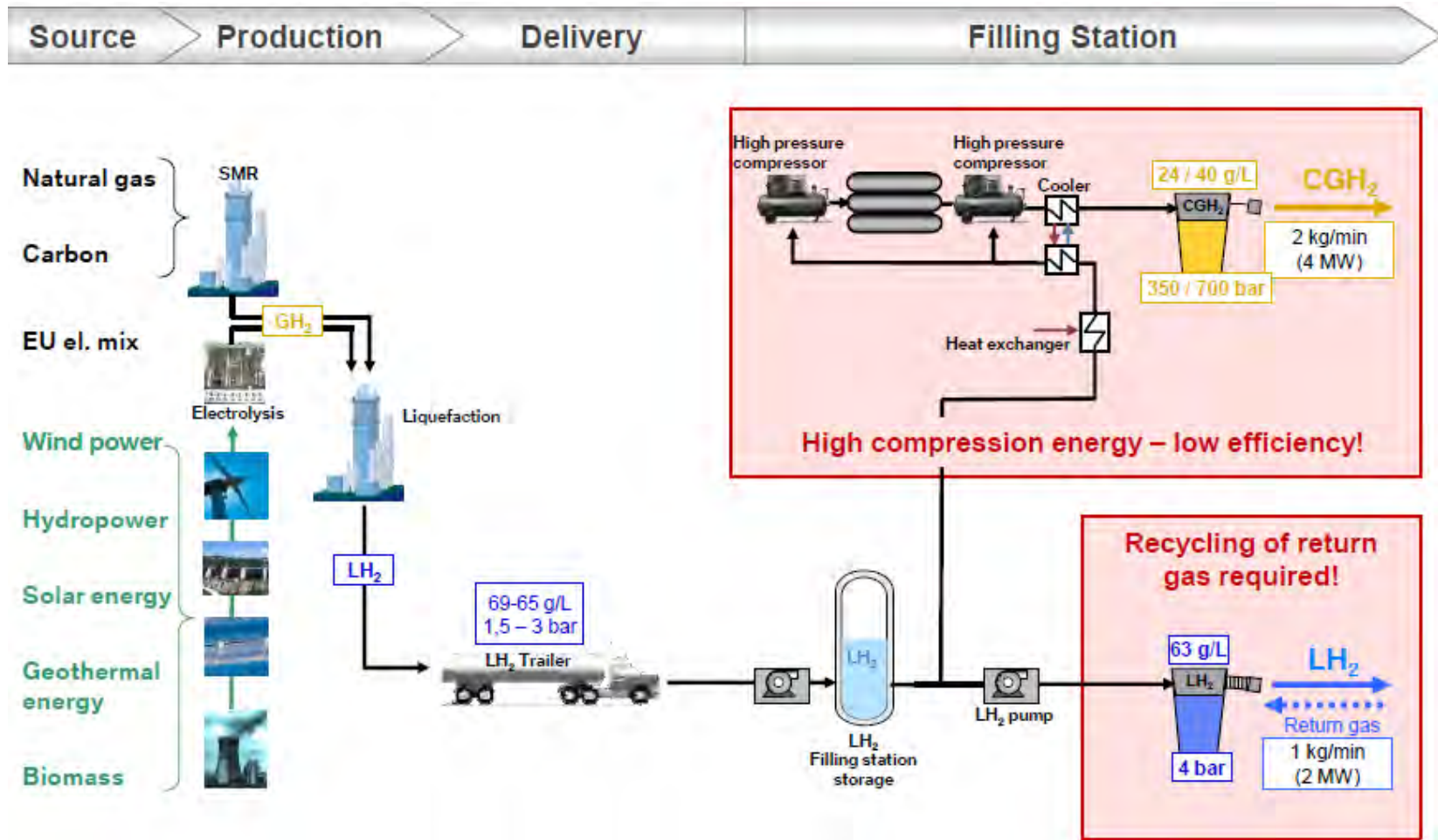
## Wasserstoff: Tankstellen



Picture: [www.H2Mobility.org](http://www.H2Mobility.org)



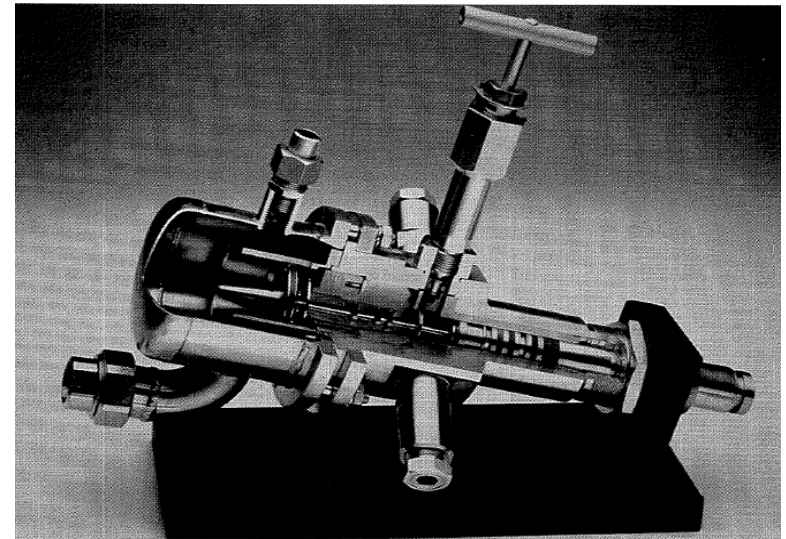
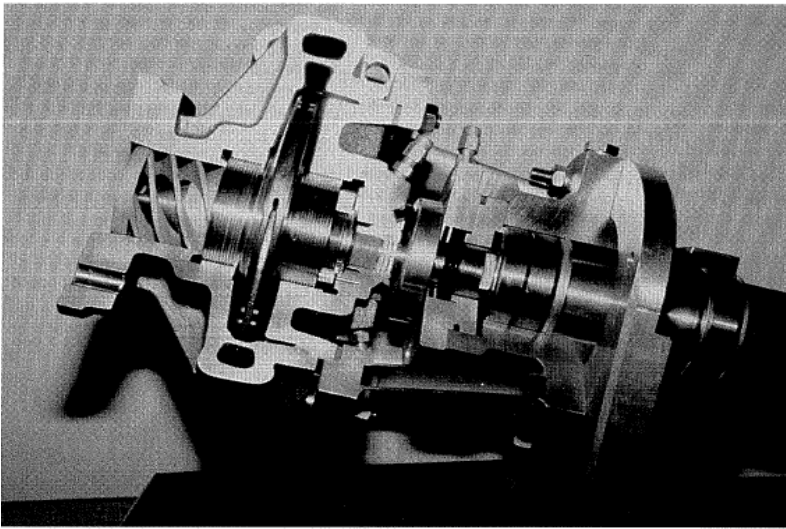
# Wasserstoff: Tankstellen



## Versorgungskonzept Wasserstoff-Tankstellen ( $\text{LH}_2$ für Transport und Speicherung)

Quelle: BMW

## LH<sub>2</sub>- Pumpen / Verdichter



***LH<sub>2</sub>-Zentrifugalturbopumpe CRYOMEC, 1989 (links) und***

***LH<sub>2</sub>-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 <sub>1</sub> [bar]	T <sub>1</sub> [K]	p <sub>2</sub> [bar]	T <sub>2</sub> [K]	h <sub>1</sub> [kJ/kg]	h <sub>2</sub> [kJ/kg]	a <sub>s</sub> [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

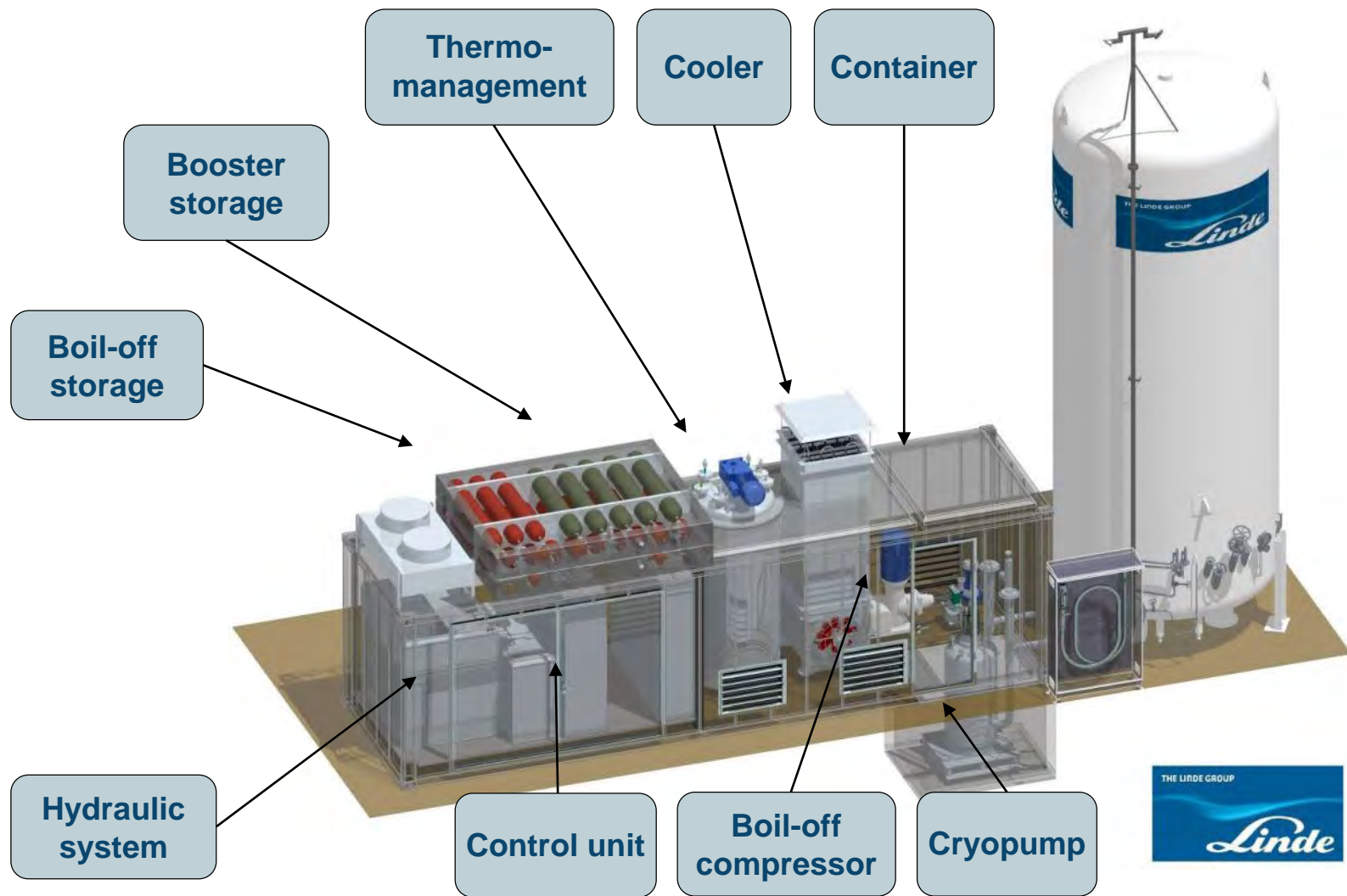
**Arbeitsaufwand beim Verdichten** (isentropie Verdichtung, H<sub>2</sub> als reales Fluid)  
[Eichlseder/Klell, Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Vieweg + Teubner 2008]

### Probleme:

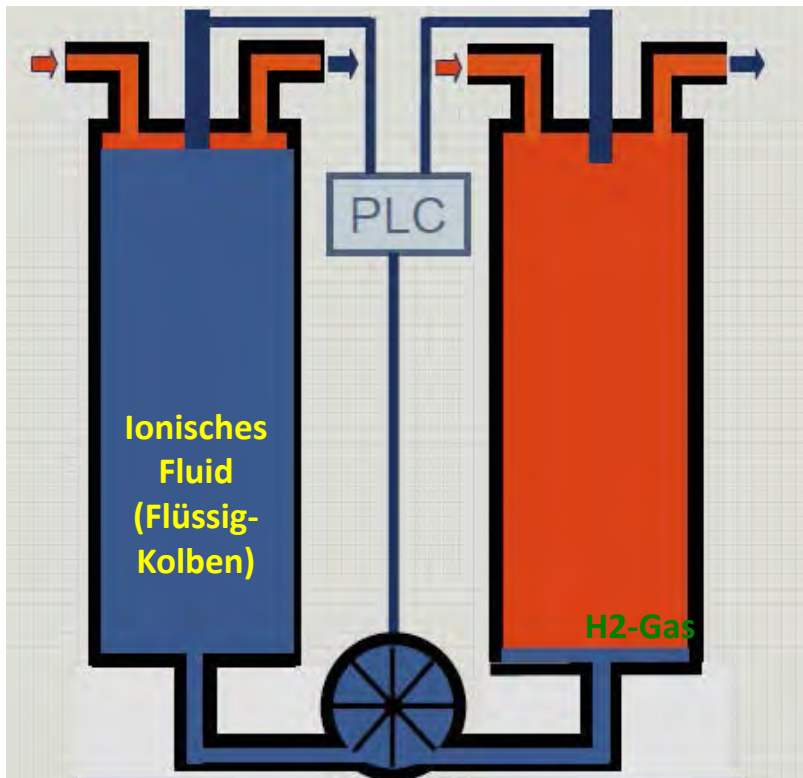
- Pumpe anfangs warm: anfangs Zweiphasenverdichter (Gasförderung, geringe Schadräume etc.)
- trockene Dichtung (selbtschmierende Dichtringe (PE), mittlere Kolbengeschw. 0,5 m/s)
- **bei Förderung an der Siedelinie NPSH (net positive suction head) = 0**  
sonst starke Unterkühlung notwendig, um Verdampfung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



## Wasserstoff: Tankstellen



Quelle: Prof. Belloni,  
Linde / TUD



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 isotherme 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 H<sub>2</sub>-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 H<sub>2</sub>/100 km



OMV, Stuttgart



Linde Hydrogen Center Munich



Shell/CEP, Sachsendamm



Vattenfall/Shell, Hamburg



AC Transit, San Francisco

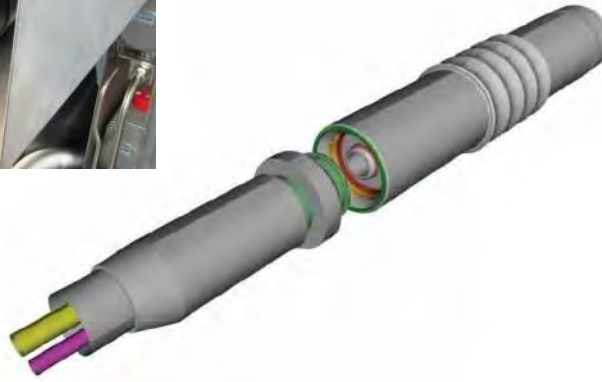
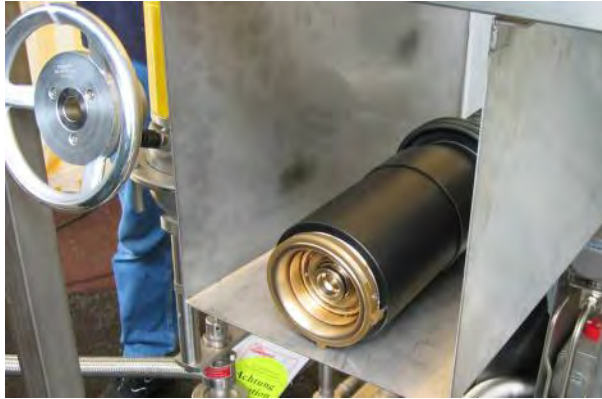


Shell/JHFC, Ariake/Tokyo

Source: Prof. Belloni, Linde / TUD



### LH2-Kupplung



source pictures:  
BMW, Linde





# LH<sub>2</sub>-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



EU-Vorgabe  
Flottengrenzwerte  
Schwerlastverkehr:

- 15 % CO<sub>2</sub> bis 2025
- 30 % CO<sub>2</sub> bis 2030

2 x 42 kg LH<sub>2</sub>

Daimler Wörth, Okt. 2022

# LH<sub>2</sub>-Anwendung Nutzfahrzeuge

Refueling process in Wörth (Daimler Truck)



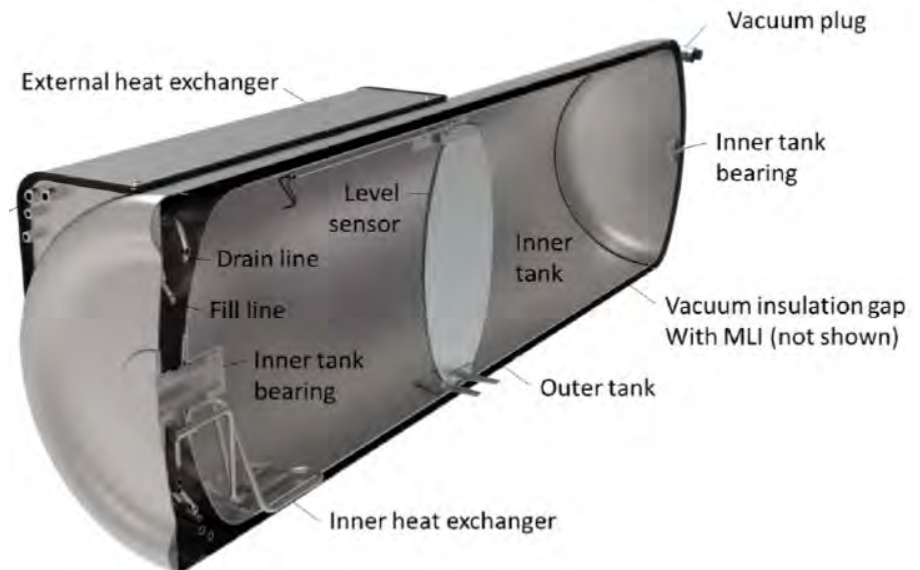
SAG LH2 on the truck on the IAA Transportation 2022

## SAG-Tank für LH<sub>2</sub>-Truck Daimler

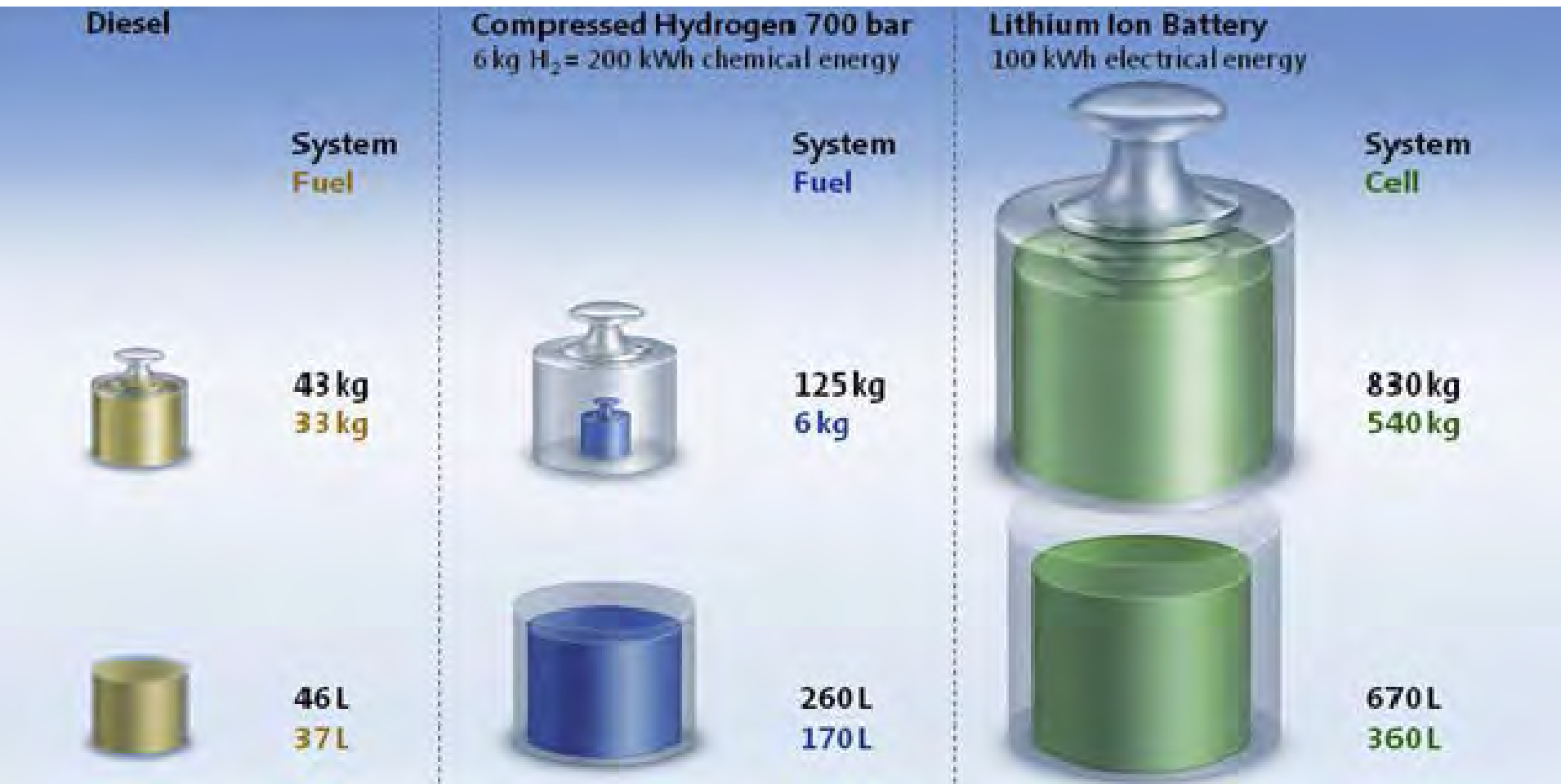
Okt. 2022:  
1000 km Reichweite demonstriert

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: Vergleich Speicherdichte



Source: Toepler, DWV



## Wasserstoff: Vergleich Speicherdichte

