

Julian Will, Christoph Haberstroh, Thomas Just
Fakultät Maschinenwesen // Institut für Energietechnik
Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik

Kryogener Wasserstoff als Option für die Luftfahrt

Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress // Dresden am 27. September 2022

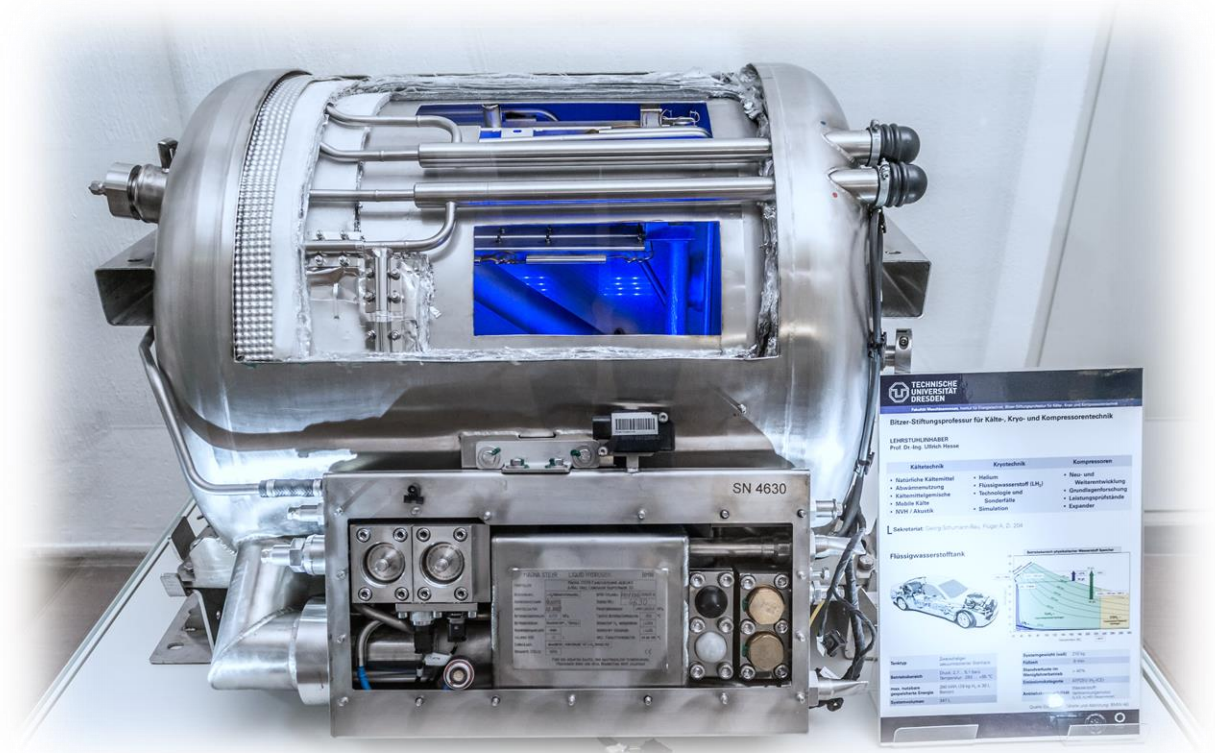
Kryogener Wasserstoff als Option für die Luftfahrt

Vorteile des tiefkalt-flüssigen H₂ gegenüber gasförmigen H₂:

- Hohe (Netto-)Speicherdichte
- Potential für niedrige Systemdichten
- Vorteile in der Logistik (zügige Betankung, effektiver Transport, keine Umwandlung)

Nachteile des tiefkalt-flüssigen H₂ gegenüber gasförmigen H₂:

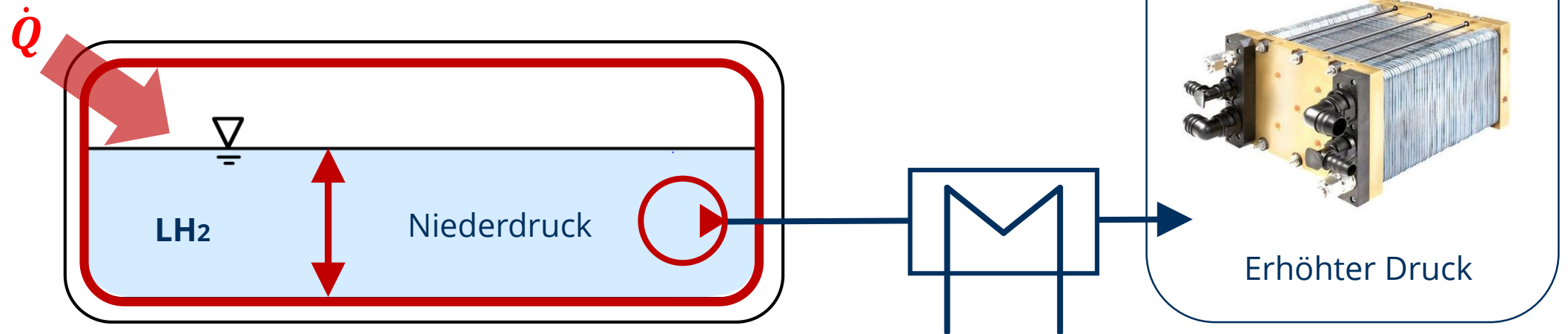
- Arbeitsbereich zwischen RT und -250°C
- Technologie nur teilweise angepasst, bzw. mit niedrigem TRL
- Zwangsläufiger Wärmeeintrag



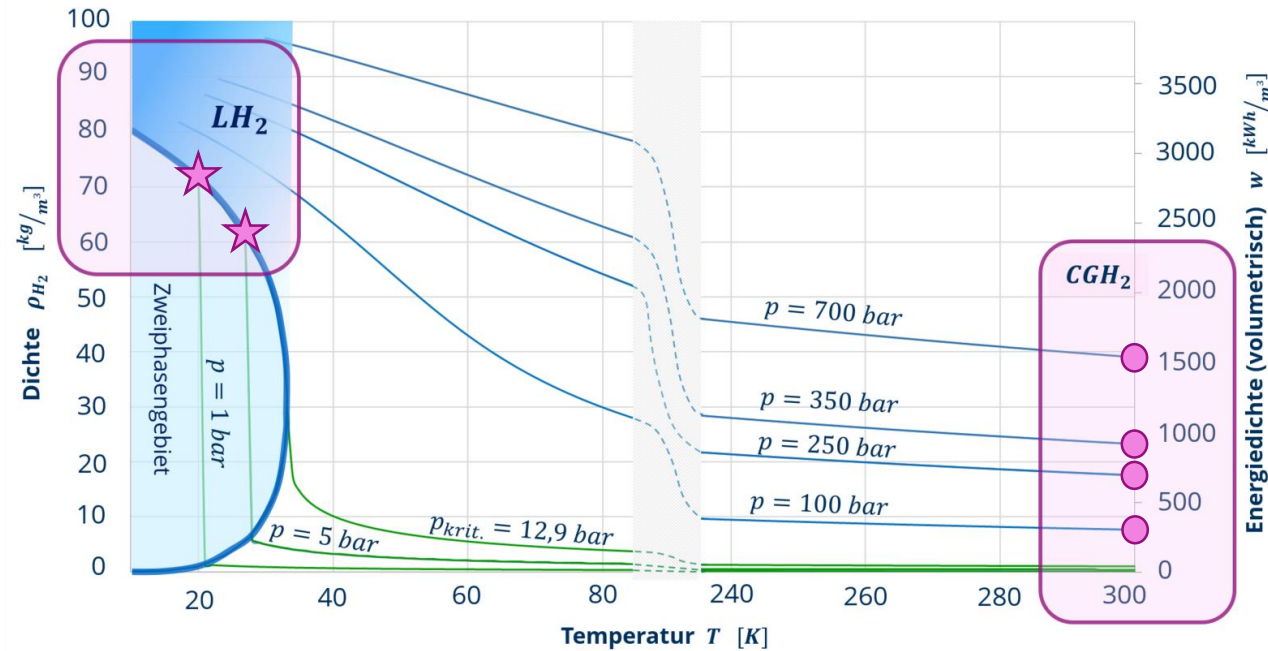
Prototyp Flüssigwasserstofftank für die automobiler Anwendung (BMW E68, 2006). Ausstellungsstück an der TU Dresden.

Kryogener Wasserstoff als Option für die Luftfahrt

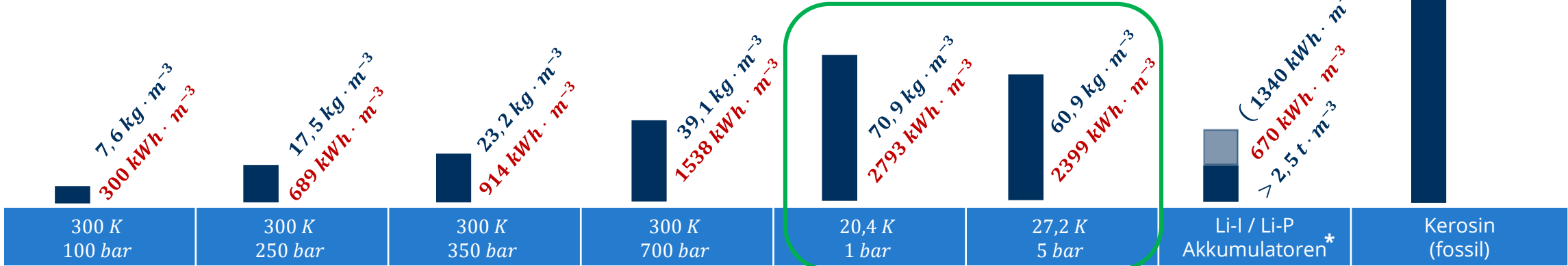
1. Speicherdichten/Energiedichten
2. Isolationstechnologie
3. Pumpentechnologie
4. Füllstandbestimmung



Nettospeicherdichte in unterschiedlichen Zuständen



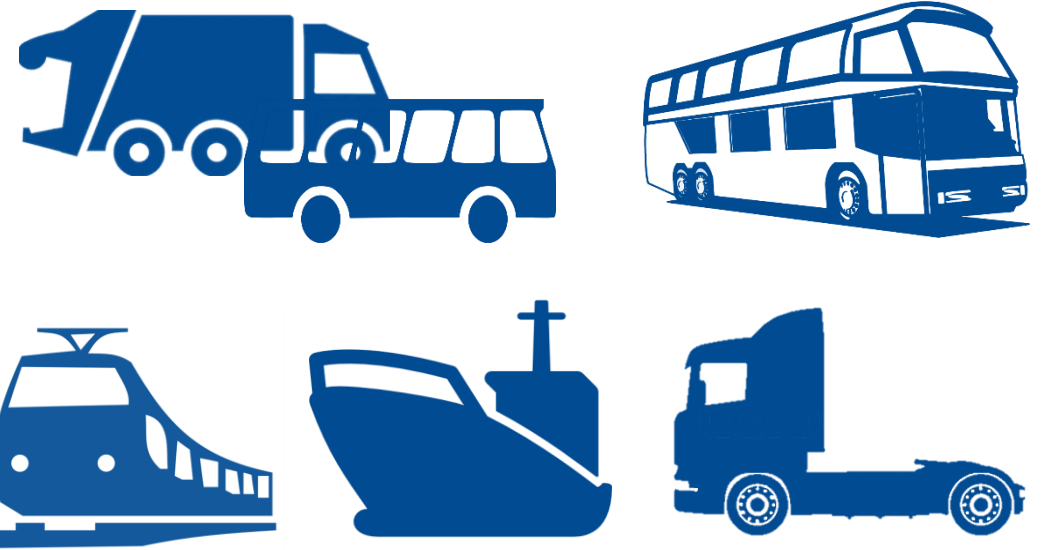
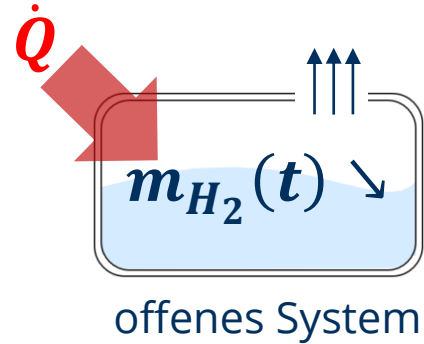
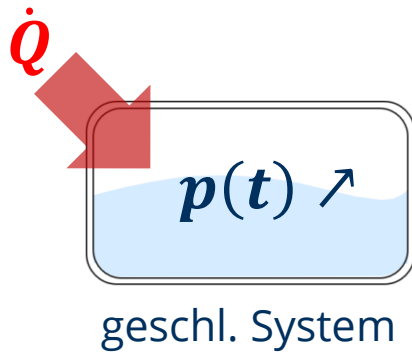
Nettodichte LH₂
1,8 x
höher als
CGH₂ (700 bar)



LH₂ ist geeignet für große Fahrzeugkategorien

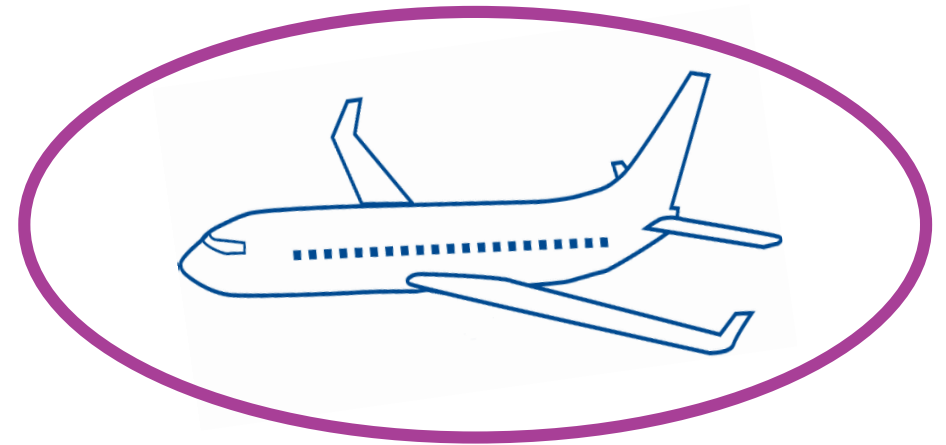
Hohe Speicherdichte, aber ...

... zwangsläufig Wärmeeintrag → Zustandsänderungen



→ günstig für Fahrzeuge mit:

- festem Einsatzplan
- maximierten Betriebszeiten
- Stützpunkten (LH₂-Tankstelle)



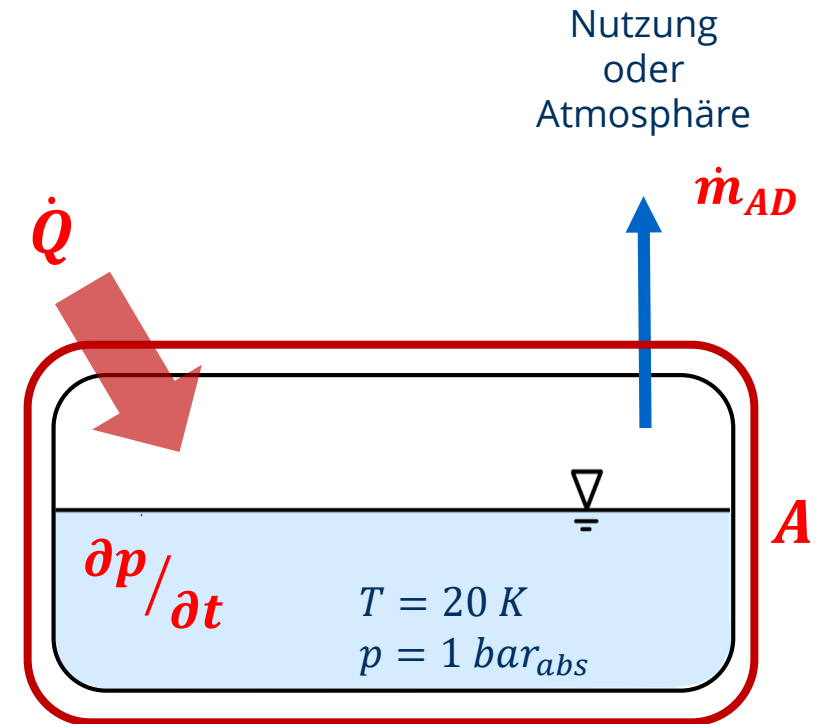
Hohe Speicherdichten, aber

... zwangsläufig Wärmeeintrag

Welcher Wärmeeintrag ist akzeptabel?

- Abdampftrate, bzw. Druckaufbaurrate skaliert mit dem Wärmeeintrag
- Wärmeeintrag skaliert mit der Oberfläche des Tanksystems

→ I.d.R. überaus hohe Isolationsgüten im Bereich von $\lambda_{eff} \sim 10^{-5} \frac{W}{mK}$ für LH₂ - Systeme notwendig.

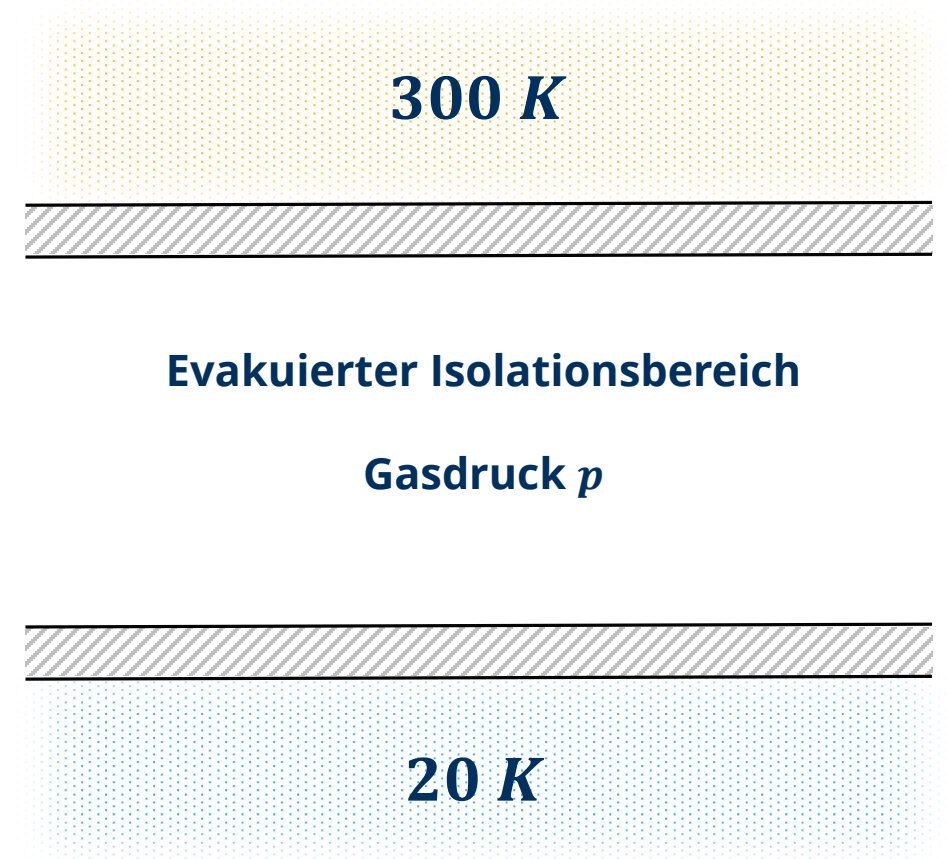
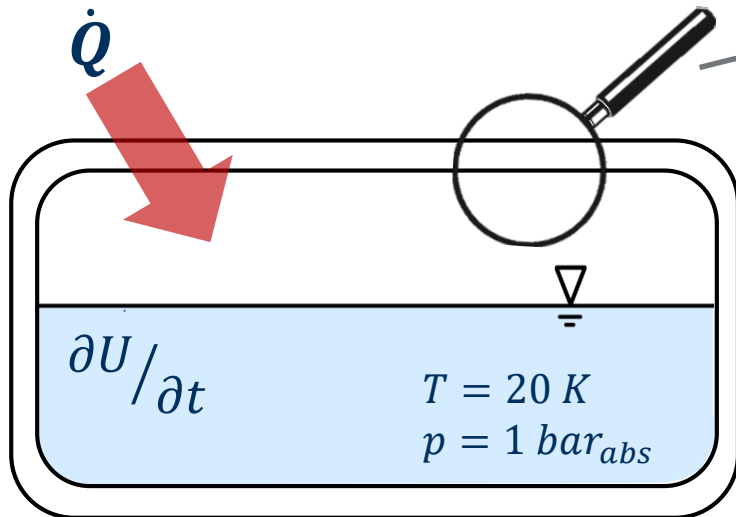


Thermische Isolation

Hohe Speicherdichte, aber ...

... zwangsläufig Wärmeeintrag

→ Eine extrem hohe Isolationsgüte wird benötigt.

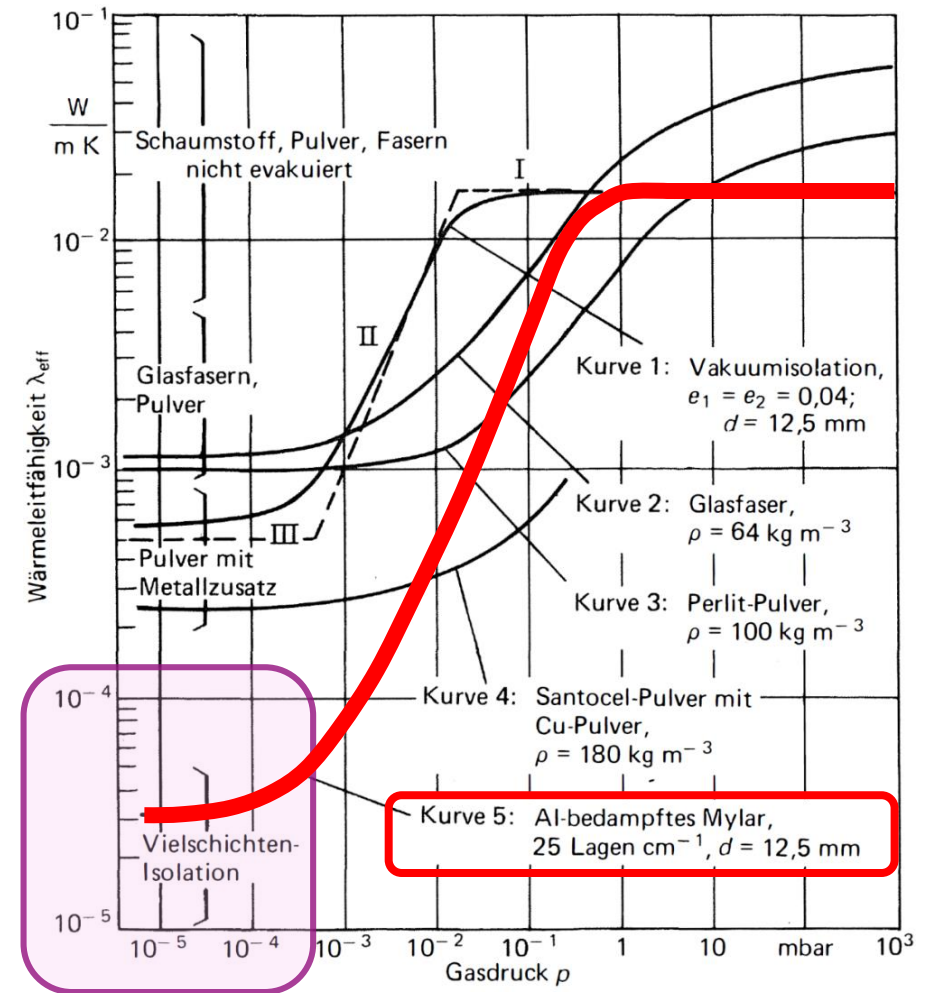
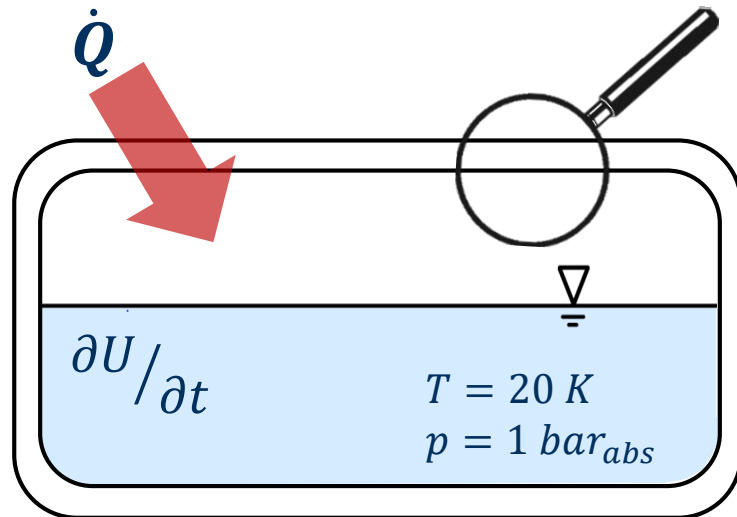


Thermische Isolation

Hohe Speicherdichte, aber ...

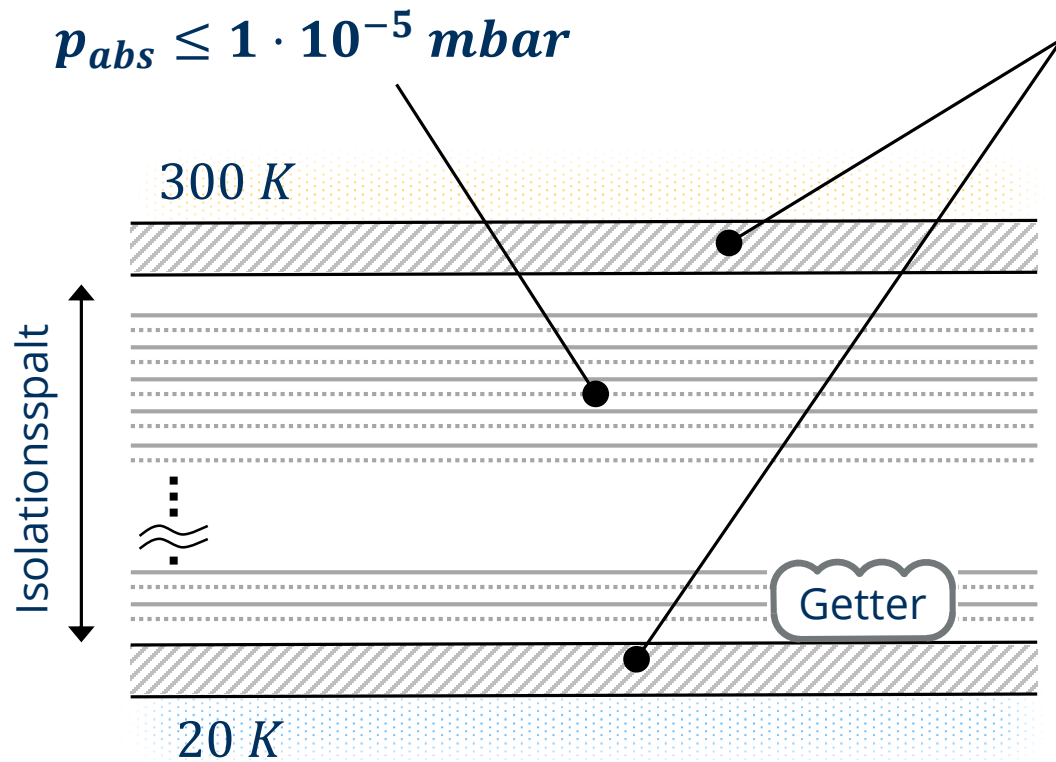
... zwangsläufig Wärmeeintrag \rightarrow Zustandsänderungen

\rightarrow Eine extrem hohe Isolationsgüte wird benötigt.



Effektive Wärmeleitfähigkeiten als Funktion des Vakuumdruks im Isolationspalt [1]

Superisolation mit Multi-Lagen-Isolation



Status Quo: Edelstahl- oder Aluminiumwände
→ stabile Vakua über Jahre/Jahrzehnte,
aber hohe Systemdichten



Multilagenisolation*

*Aluminium-Folie + Glasfasergewebe (Beyond Gravity, CH, ehemals RUAG Space)

Superisolation mit Multi-Lagen-Isolation

Anwendungsbeispiele

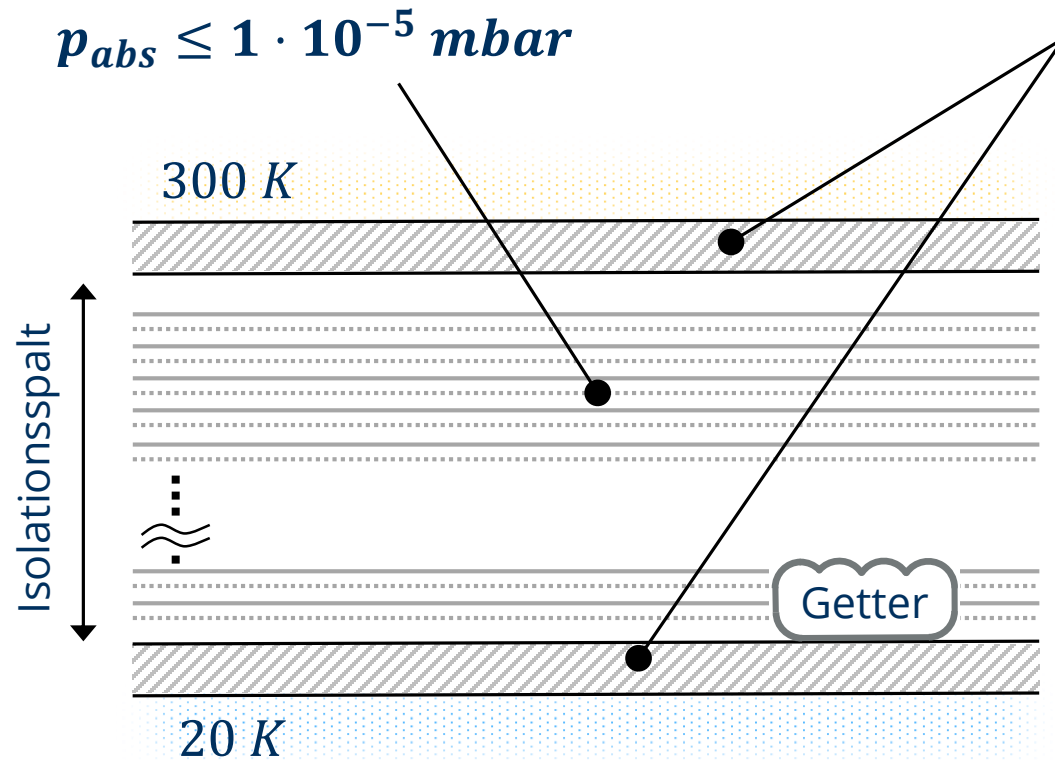


Mit MLI umwickelter Flüssiggastank ohne Außenhülle. Chart-Ferox [2]



Kryogene Transferleitung mit Isolationsspalt und MLI, Fa. Cryotherm [3]

Superisolation mit Multi-Lagen-Isolation



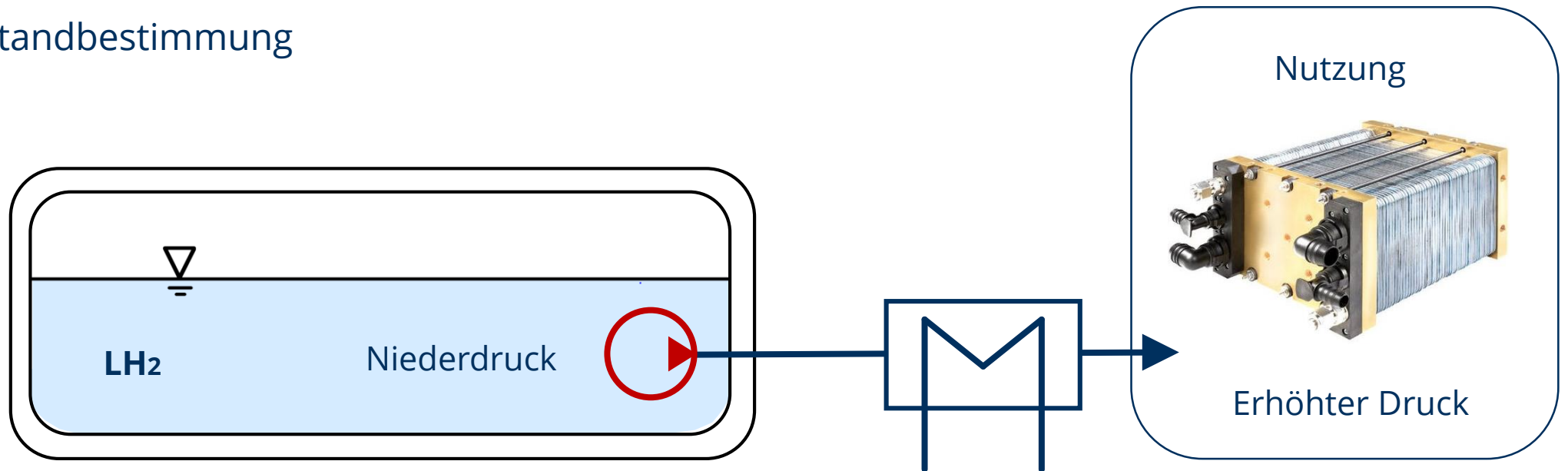
In Zukunft: Leichtbaumaterialien

Herausforderungen:

- Permeation, insbesondere Wasserstoffpermeation
- Wasserstoffversprödung
- Leckagen, insbesondere an Verbindungen
- Ausgasung
- Trapped gas
- Gasabgabe Oberflächen
- Temperaturzyklen
 - Kallecks
 - Risse → Leckagen
 - Mikrorisse, Mikrorissnetzwerke → Effusion

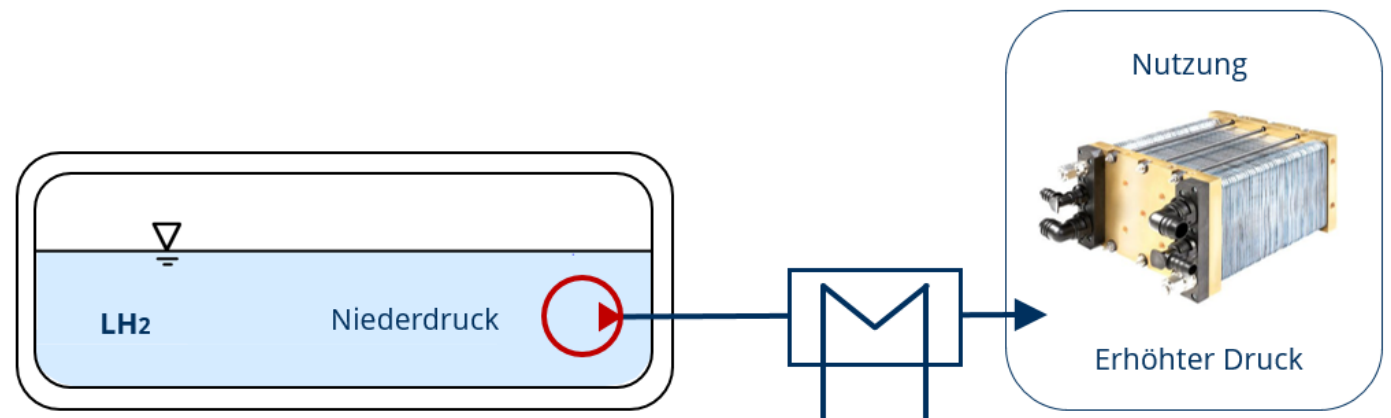
Kryogener Wasserstoff als Option für die Luftfahrt

1. Speicherdichten/Energiedichten
2. Isolationstechnologie
- 3. Pumpentechnologie**
4. Füllstandbestimmung

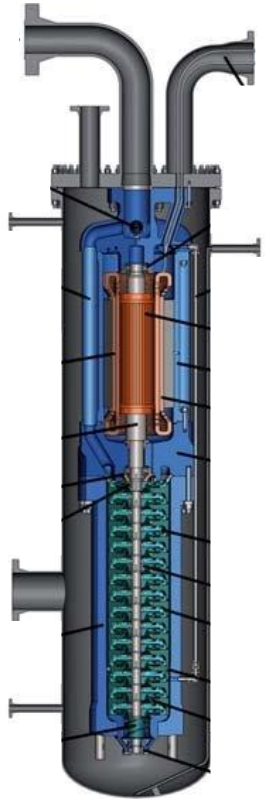


Allgemeine Betrachtung zu LH₂-Pumpen

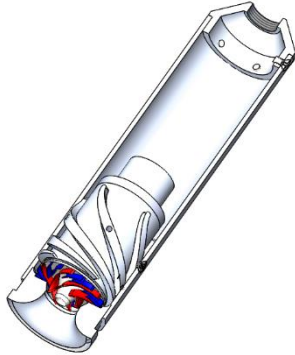
- **Dichtung und Reibung bei $T \approx 20$ K:**
 - Festkörperschmierung, da jegliche Fette, Öle etc. im festen Zustand.
 - (MoS₂, Pb, Au, PTFE)
- **H₂ als äußerst kleines Molekül:**
 - niedrige Viskosität
 - innere Leckagen kritisch
 - geringe Schmierfähigkeit
- **Gesättigter LH₂:**
 - Kavitation



Kryogene Pumpen (Auswahl)



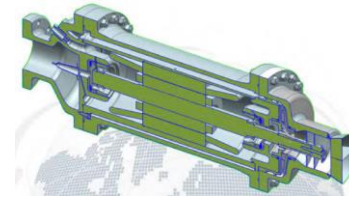
Großtechnische LNG-Tauchpumpe, Fa. Ebara [4]



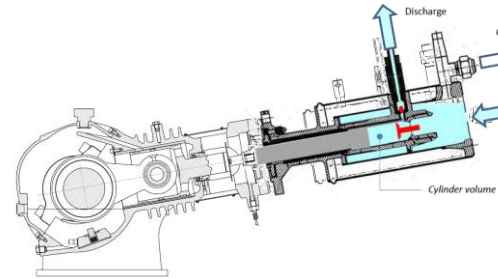
Prototyp LHe-Tauchpumpe, TU Dresden



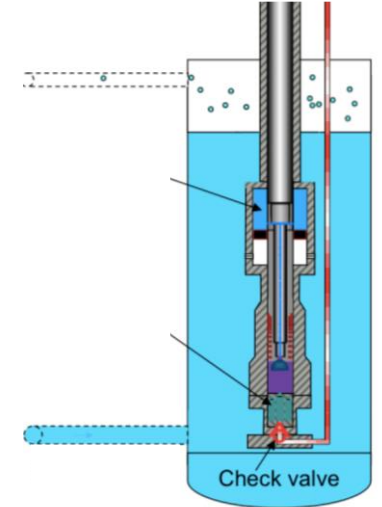
Automobile LNG-Tauchpumpe, Fa. Westport [5]



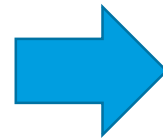
LH2-Transferpumpe, Fa. Cryostar [6]



Externe LH2-Pumpe, Fa. Cryostar [6]



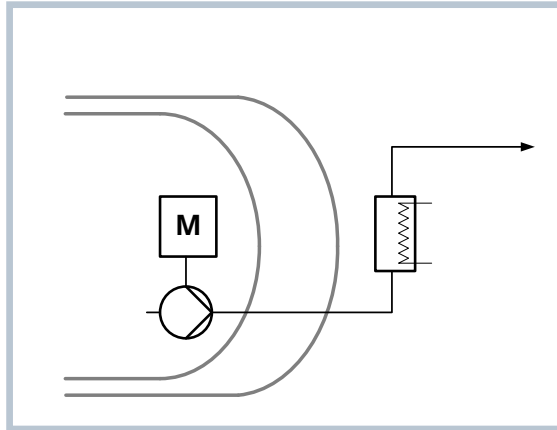
900 bar LH2 cryo compressed pump, Fa. Linde [7]



Prinzip und Technologieauswahl ist sehr eingehend zu betrachten, kein Produkt von der Stange.

Pumpenintegration

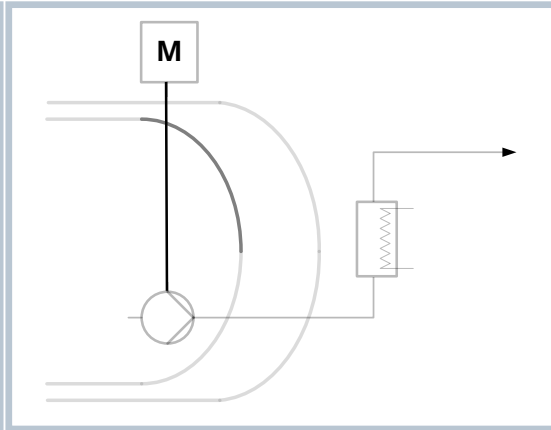
Tauchpumpe



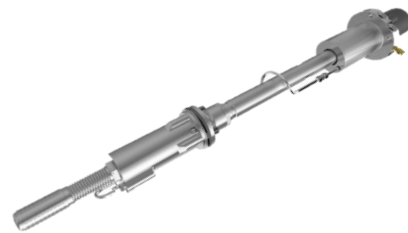
- tiefkalter Antrieb
- Wartung schwierig
- geringer Wärmeeintrag



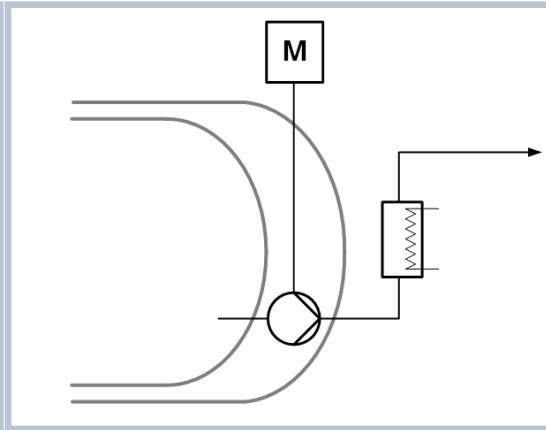
Tauchpumpe, warmer Antrieb



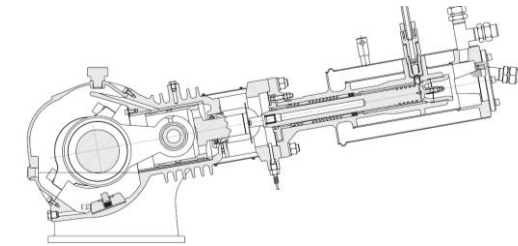
- hoher Wärmeeintrag



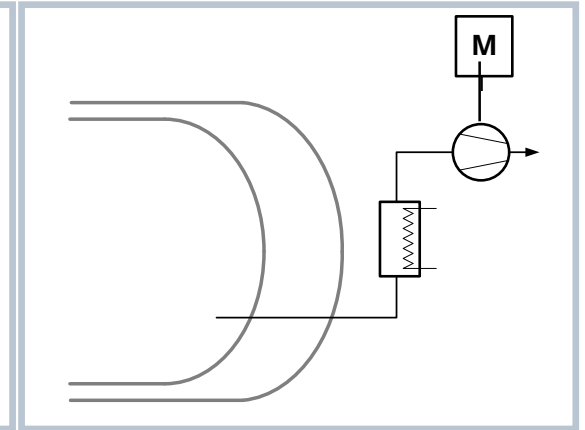
Pumpe isoliert, warmer Antrieb



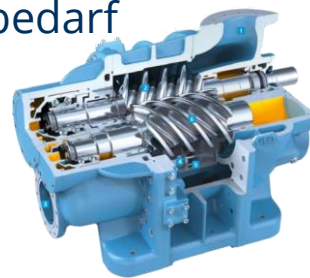
- Neueinkühlung bei Start



Warmer Verdichter



- Hohe Antriebsleistungen
- Hohes Gewicht
- Hoher Platzbedarf

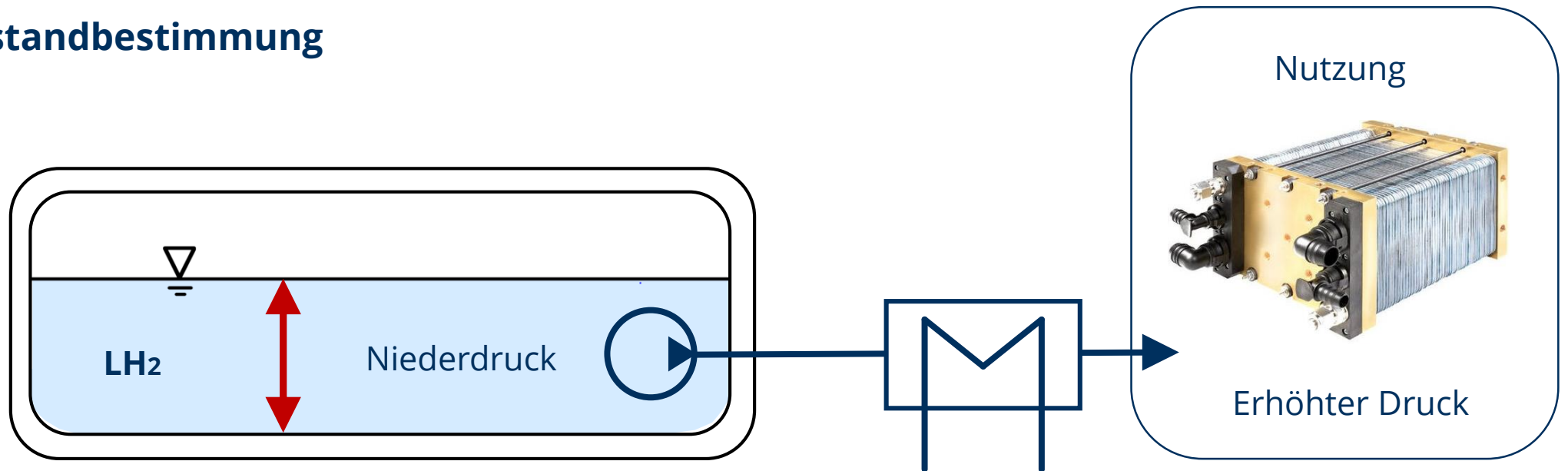


Scrollverdichter, Fa. GEA

Level of integration

Kryogener Wasserstoff als Option für die Luftfahrt

1. Speicherdichten/Energiedichten
2. Isolationstechnologie
3. Pumpentechnologie
- 4. Füllstandbestimmung**

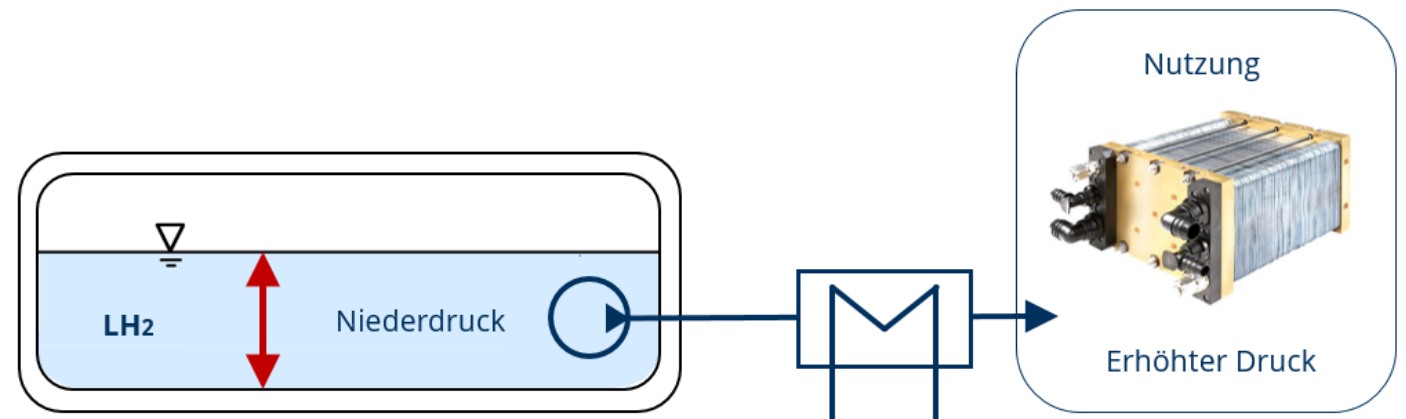


Füllstandsbestimmung

Eine Reihe von Lösungen stehen mit verschiedenen TRL zur Verfügung.
Inhaltsbestimmung mittels:

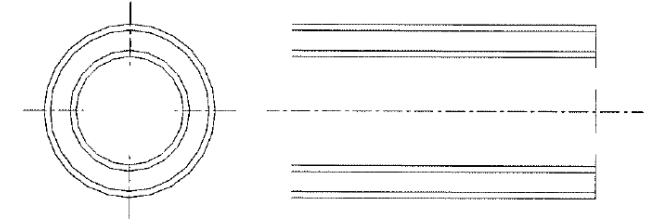
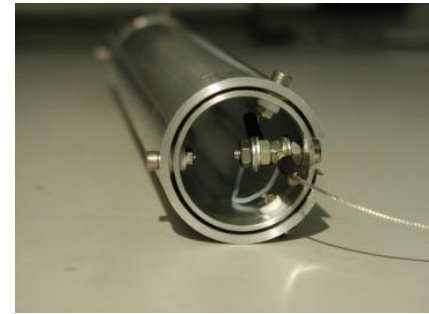
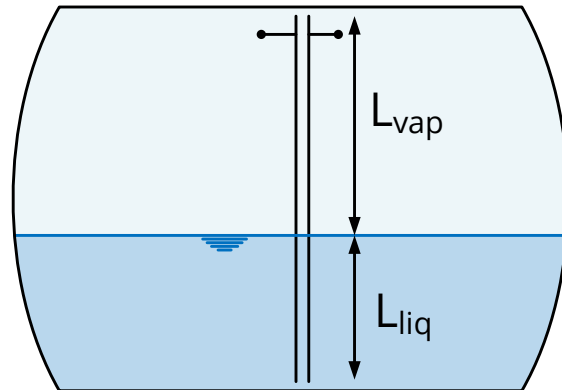
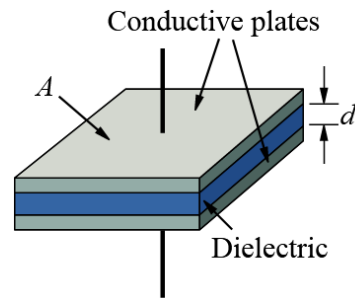
- Wägung
- hydrostatischen Druck
- überhitzter Temperatursensoren
- piezoelektrischer Resonatoren
- akustische Distanzbestimmung
- optische (refraktive) Distanzbestimmung

- **kapazitive Dichtebestimmung**
- **Levelbestimmung mittels supraleitender Sonde**



Kapazitive Dichtebestimmung

Messgröße: Permittivität ϵ des H₂

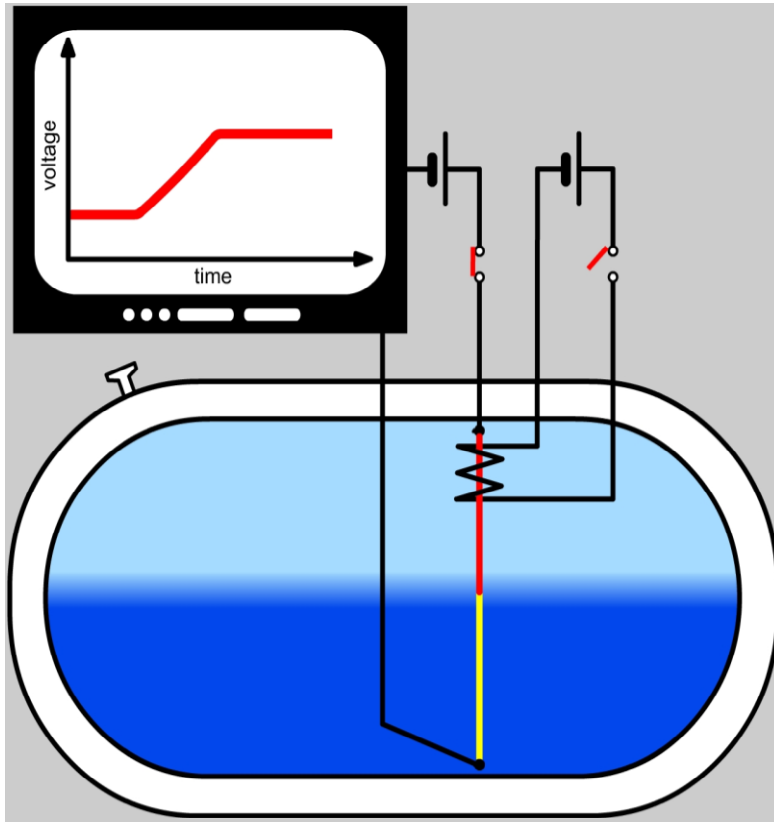


Koaxiale kapazitive Sonde zur LH₂- Levelbestimmung, TU Dresden.

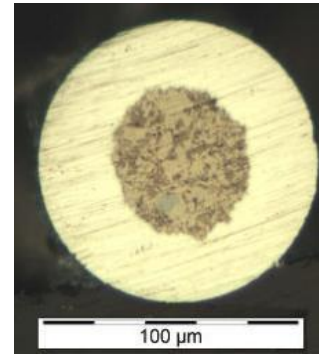
- **Stand der Technik.**
- Ermittlung der mittleren Dichte des Einphasen- oder Zweiphasen-System.
- Rückschluss auf Oberflächenposition nur im vollständig gesättigten System mit zusätzlicher Kenntnis von Druck oder Temperatur.
- Abweichungen bei unterkühlten Flüssigphase oder überhitzten Gasphase.
- **Für industrielle Zwecke i.d.R. vollkommen ausreichend.**

Supraleitende Sonde zur Levelbestimmung

Messgröße: elektrischer Widerstand ρ



Funktionsschema zur Levelbestimmung mittels supraleitender Sonde.

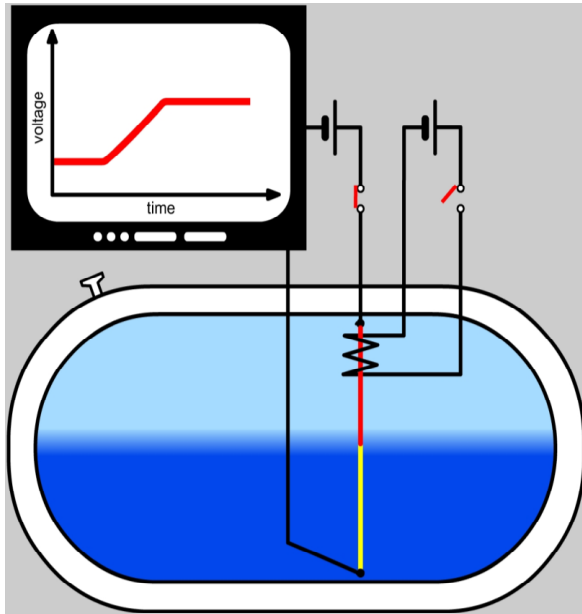


MgB₂ Filament inkl. Stabilisierung (100 μm, T_c=36 K) inbegriffen in einer Sonde zur Levelbestimmung, TU Dresden.

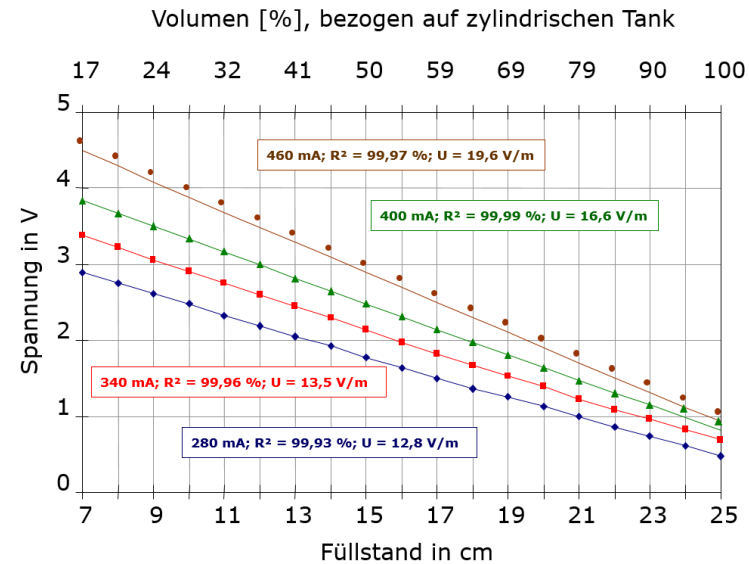
- **Entwicklung der TU Dresden, TRL 6**
- Lineares Ausgangssignal
- Hochaufgelöste Levelbestimmung +/- 1mm
- Getestet unter realistischen Bedingungen BMW E68, 2006

Supraleitende Sonde zur Levelbestimmung

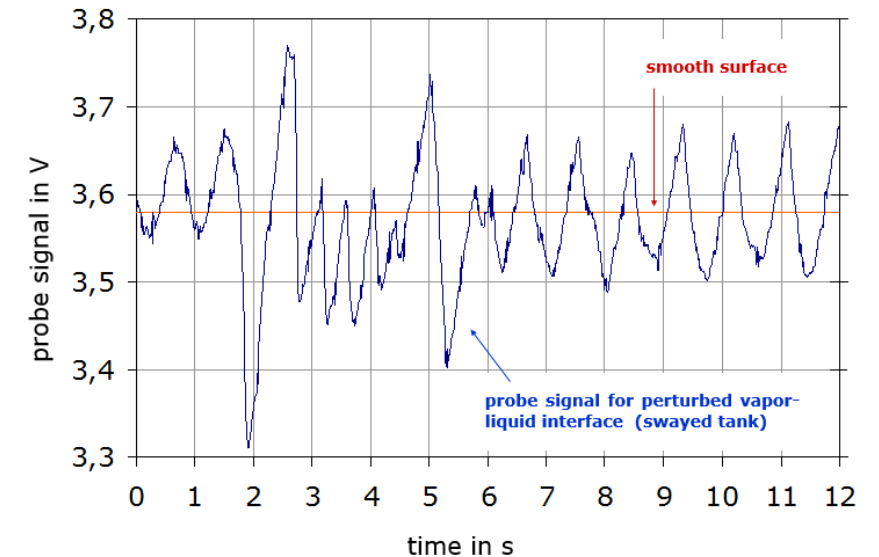
Messgröße: elektrischer Widerstand ρ



Funktionsschema zur Levelbestimmung mittels supraleitender Sonde.

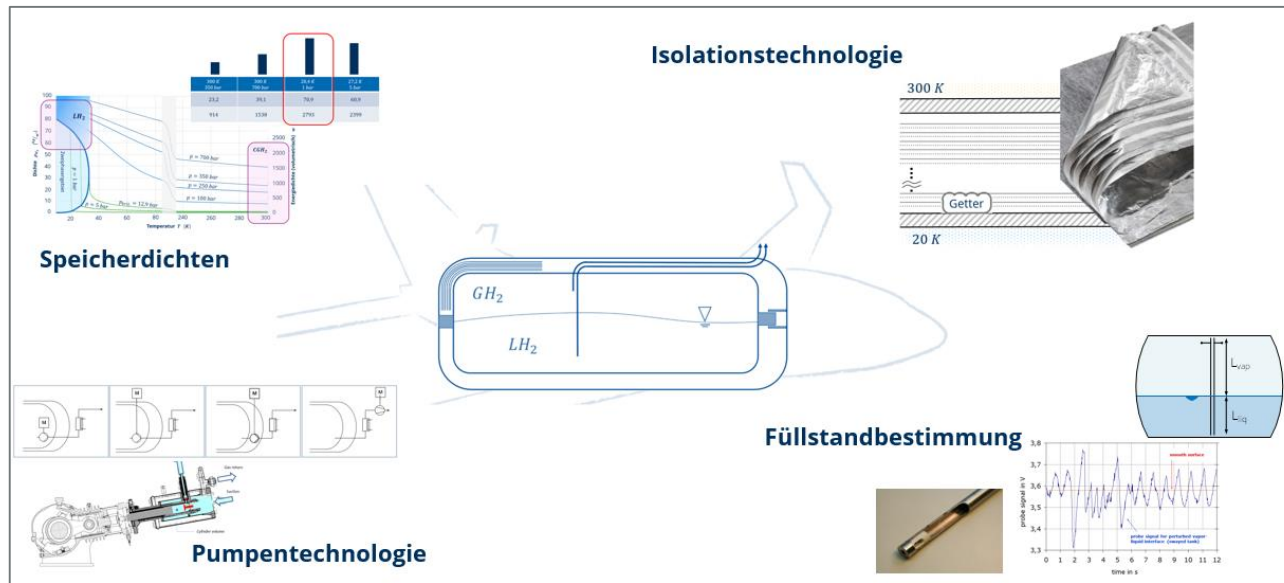


Linearität des Ausgangssignals.



Sichtbarmachung der schwappenden Flüssigoberfläche im Ausgangssignal.

Kryogener Wasserstoff als Option für die Luftfahrt



Quellenangaben:

- [1] Frey H., Haefer R.A., Tieftemperaturtechnologie, VDI-Verlag, 1981
- [2] Chrz V., Helium Storage and Transport, European Course of Cryogenics der TU Dresden, 2017
- [3] Fa. Cryotherm, Kirchen/Sieg; www.cryotherm.de, 2022
- [4] Windmeyer Ch., Randall F.B., „Cryogenic Technology“ in Ullmann´s Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2013
- [5] Projekt HDGAS, „Enhanced High Pressure Submerged LNG Pump Prototype (fa. Westport)“, www.HDGAS.eu, 2018
- [6] Fa. Cryostar, FR; <https://cryostar.com/hydrogen/>, 2022
- [7] Petitpas G., 1000+ cycles of a 350 bar prototype cryo-compressed pressure vessel, Lawrence Livermore National Laboratory USA, 2018

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Standardwerke:

Frey H., Haefer R.A.,
Tieftemperaturtechnologie,
VDI-Verlag, 1981

Weisend II J.G.,
Handbook of Cryogenic
Engineering, Taylor & Francis, 1998

Peschka W.,
Flüssiger Wasserstoff als Energieträger
Springer Verlag, Wien New York, 1984