

Hydrogen Storage: Status, Advances and Outlook

19. Symposium Energieinnovation 2026

Graz, 12. Februar 2026

DI Dr.techn. Nejc Klopčič, MBA



HyCentA Research Leading Hydrogen Innovation

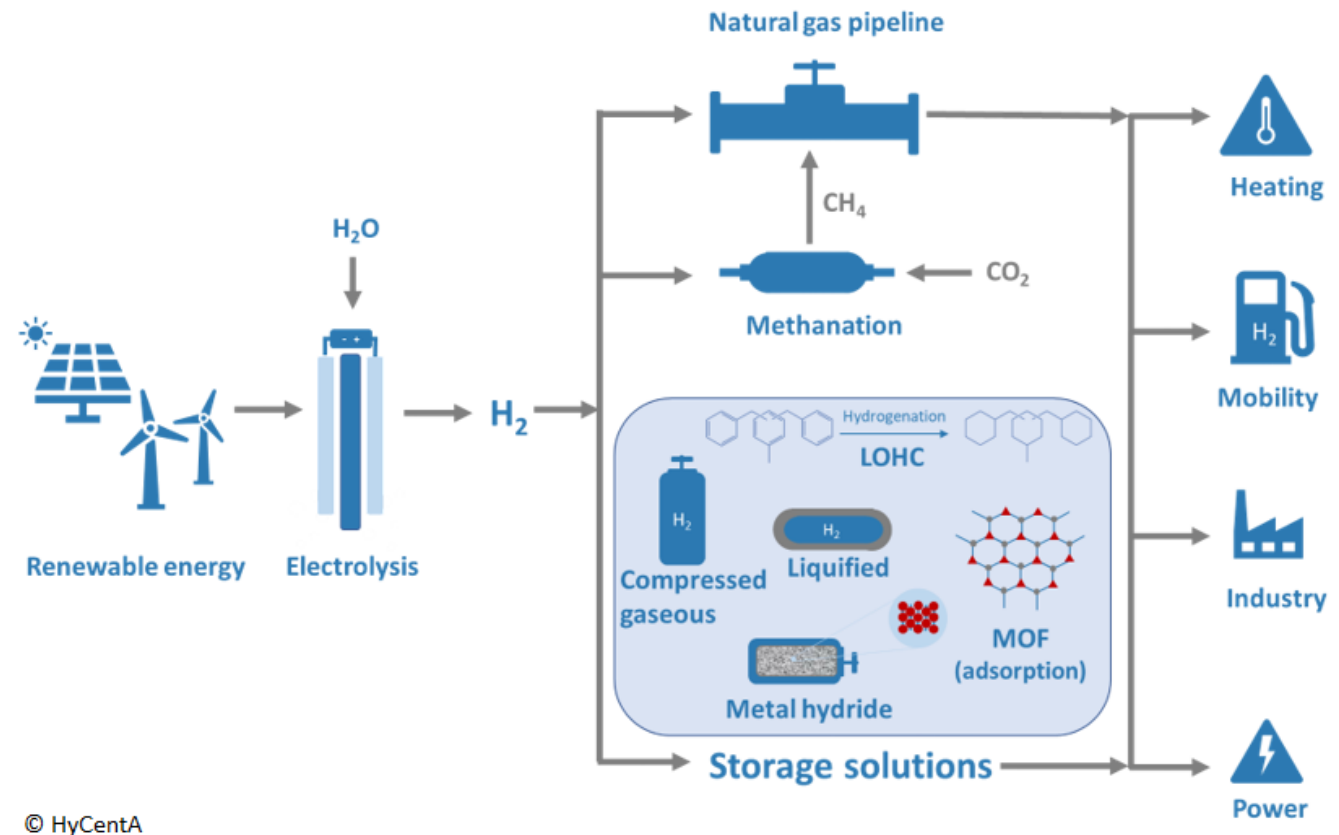
- **110+ researchers** mechanical engineering, physics, chemistry, process engineering, electrical engineering
- **600+ projects** successfully completed
- **20+ years of R&D expertise**
- **State-of-the-art research**, testing and refueling infrastructure
- **International Cooperations**

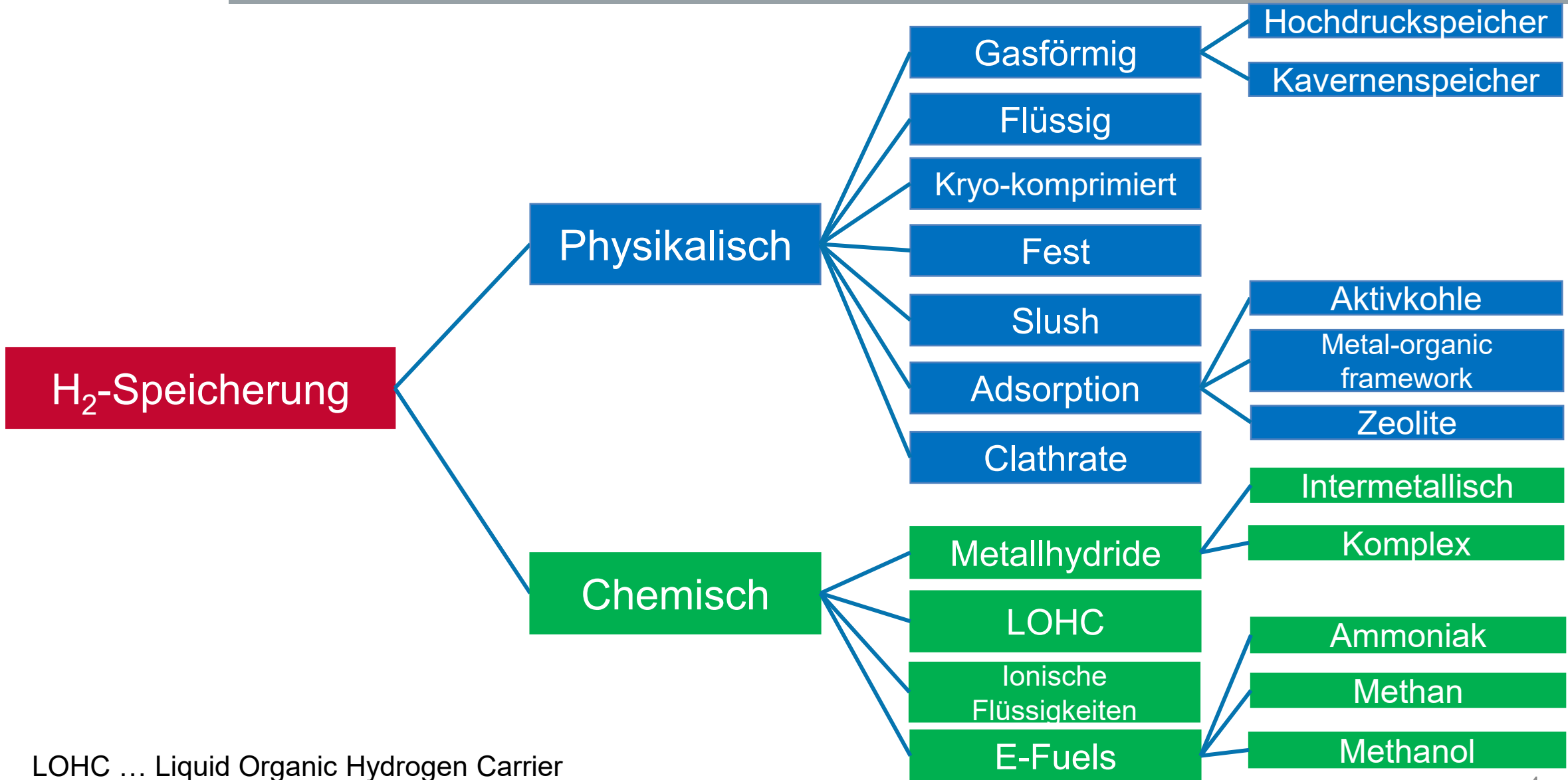


Extra-university research organization at
Graz University of Technology (TUG)



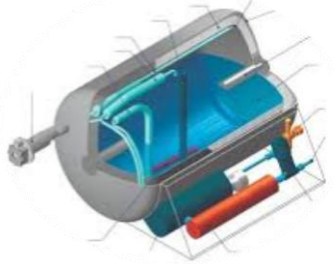
- **Warum Energiespeicherung?**
 - Aufgrund der **volatilen** Natur der **erneuerbaren Energieträger** sind **Energieangebot** und **Energiebedarf** zeitlich und örtlich **entkoppelt**
 - Kurz- bis langfristige **Energiespeicherung** und **-transport** sind essenziell
- **Die Rolle von Wasserstoff als Energieträger für die Energiewende**
 - **Keine CO₂-Emissionen** bei Nutzung von Wasserstoff zur Stromerzeugung
 - **Hohe Flexibilität** von Wasserstoff für den Einsatz in Industrie und Mobilität sowie zur Heizung und Stromerzeugung
 - Hohe **gravimetrische** Energiedichte





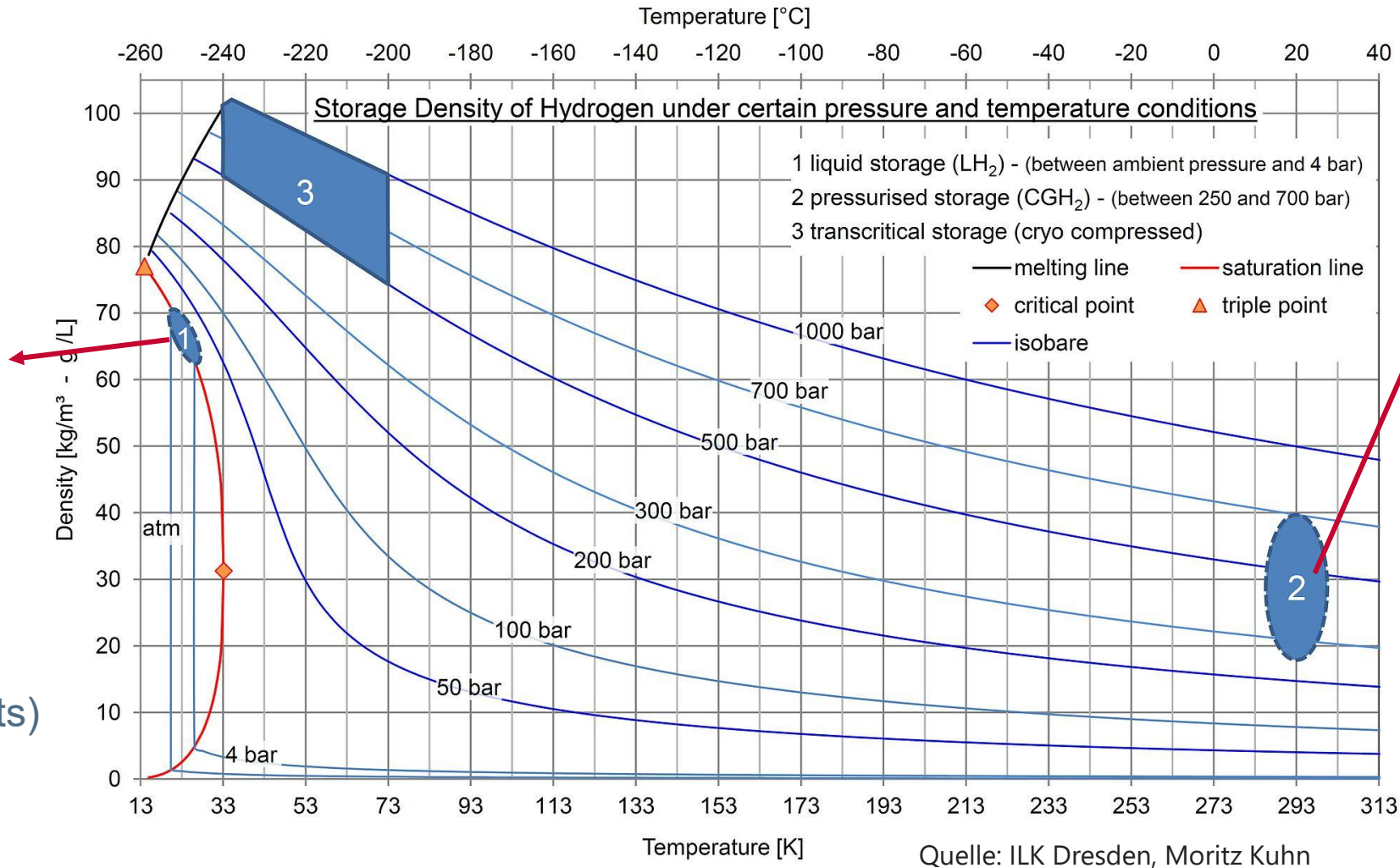
LOHC ... Liquid Organic Hydrogen Carrier

Energiedichten Wasserstoff



LH2
Flüssiger
tiefkalter H₂ bei
T < -253°C
in Kryobehältern

Hoher
Energieaufwand
für Verflüssigung
(20-30 % des
unteren Heizwerts)



CGH2
Gasförmiger H₂
in Druckbehältern

Verdichtung
erfordert 6–15 %
des Energieinhalts
bezogen auf den
unteren Heizwert

- 4 Typen

- **Typ I:** vollständig aus austenit. Stahl / Stahl-Aluminium-Legierungen (bis 300 bar)

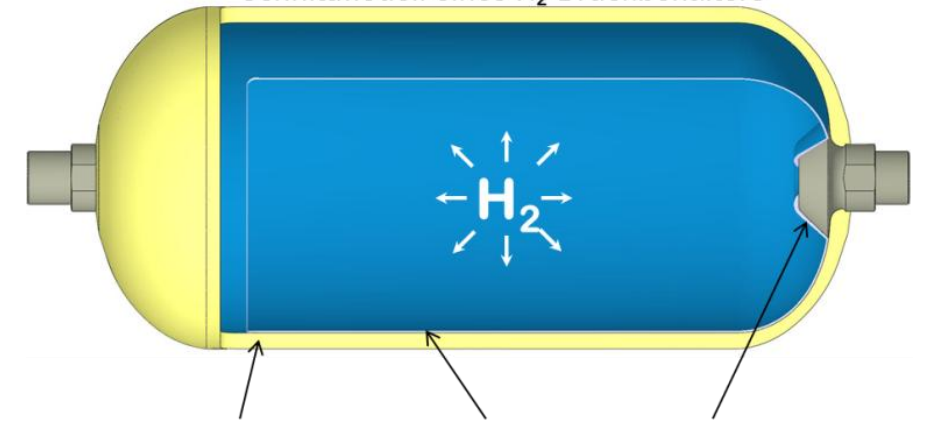
Komposit Behälter:

- **Typ II:** Innen (Liner) aus Stahl / Aluminium, teilweise umhüllt von Kohlenstofffasernetz
- **Typ III:** Liner aus Aluminium komplett umhüllt von Kohlefaser verstärkten Kunststoff (CFK)
- **Typ IV:** Liner und Hülle aus Kunststoff

⊕ Höhere Energiedichte bis 1,84 kWh/kg vs. Typ 1 mit 0,4 kWh/kg

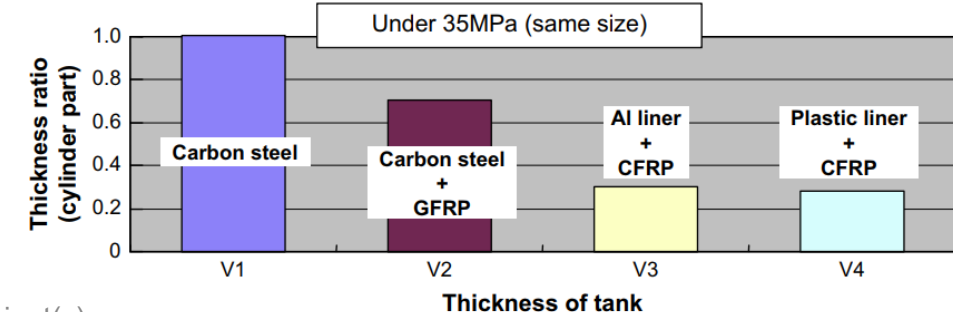
⊖ Teurer, Rezyklierbarkeit der Faser

Schnittmodell eines H₂-Druckbehälters

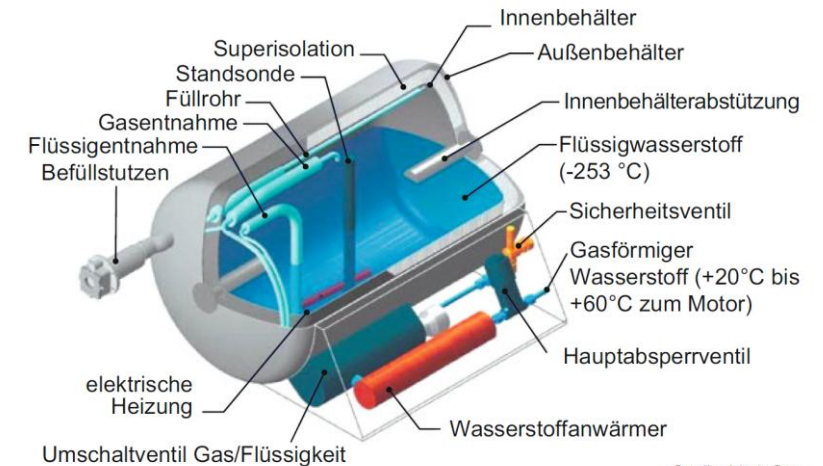


CFK-Laminat (lasttragend) Polymerliner (gasdicht) Metall-Boss

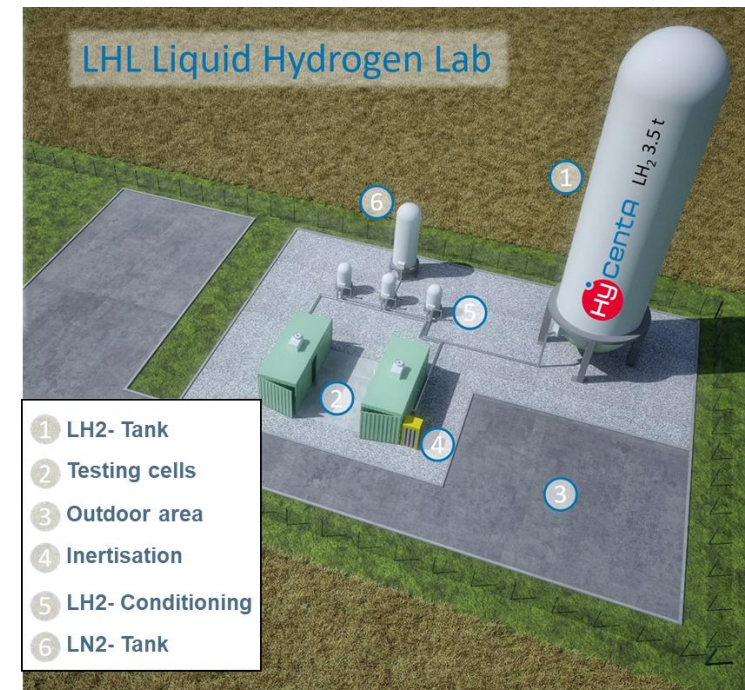
	V1	V2	V3	V4
composition	All Metal	Metal Liner + GFRP layer (hoop lap)	Metal Liner + CFRP layer (full lap)	Plastic Liner + CFRP layer (full lap)



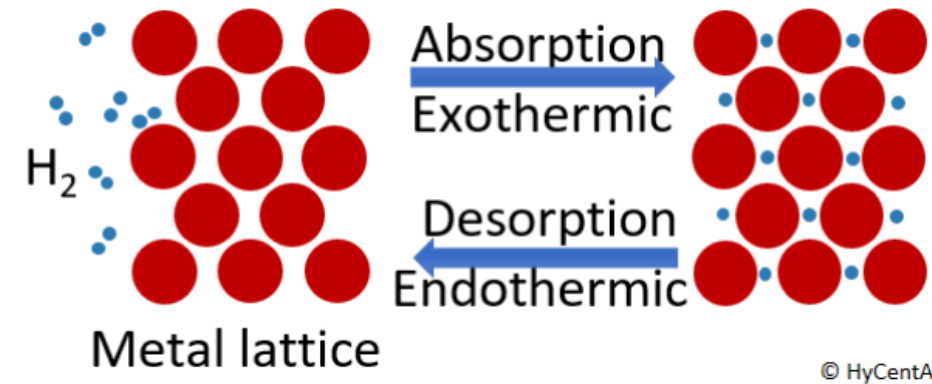
- **Kryobehälter bei T < -252,85°C**
- Bestehen aus **Innen- und Außenbehälter** mit **isolierendem Vakuumraum** dazwischen
- Bauteilanforderungen:
 - auch bei niedrigen Temperaturen **formstabil**
 - **keine Wasserstoffversprödung**
- **Wärmeeintrag** in Tankbehälter
 - Bildung von **gasförmigen H₂**
 - **Boil-Off** (0.3-3 % pro Tag) um Druck zu vermindern



Quelle: LindeGas



- **Absorption** von Wasserstoff ins **Metallgitter** zur Bildung von **Metallhydriden**
- **Wärmeentstehung** durch **Absorptionsreaktion** (exotherm)
- **Wärmezufuhr** nötig für **Desorption**
- **Vorteile:**
 - **Hohe volumetrische Speicherkapazität** = geringerer Platzbedarf
 - Erhöhte **Sicherheit**, da **Wasserstoff** im Metallgitter **chemisch gebunden** ist
 - **Betrieb** nahe bei **Umgebungsbedingungen** möglich
 - **Nutzung** der bei der Absorption entstandenen **Wärme** möglich



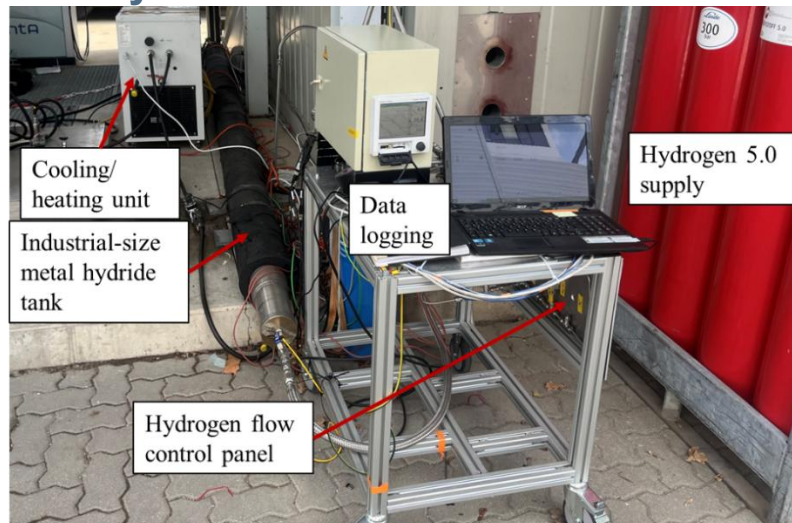
- **Nachteile:**
 - **Gewicht**
 - Benötigte **Wärme** für **Desorption**
 - Langsame **Kinetik** abhängig vom **Thermalmanagement**
 - **Materialkosten**
 - **Umgang mit Material** → Kontakt mit Luft und Feuchte muss vermieden werden

- **Elementarhydride:** Mg, Pd, Al...
- **Interstitial:**
 - AB: TiFe, TiCo, TiNi...
 - AB₂: TiMn₂, ZrMn₂, TiCr₂...
 - AB₅: LaNi₅, CaNi₅...

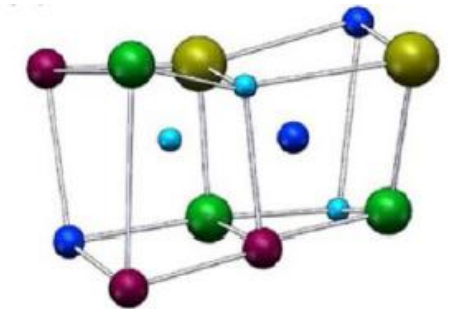
- **Komplex:**
 - Alanate: NaAlH₄, LiAlH₄, Mg(AlH₄)₂...
 - Borhydride: NaBH₄, LiBH₄...
 - Nitride/amide: LiNH₂, Li₂NH...

- **Hoch-Entropie-Legierungen:**
 - 5 oder mehr Metalle
 - Übergangsmetalle: V, Ti, Cr, Mn, Fe, Zr, Ni, Nb, Hf, Co und Mo
 - Andere Metalle: Mg oder Al
 - e.g. TiZrCrMnFeNi

Testing mit Industrie-MH-Speicher am HyCentA

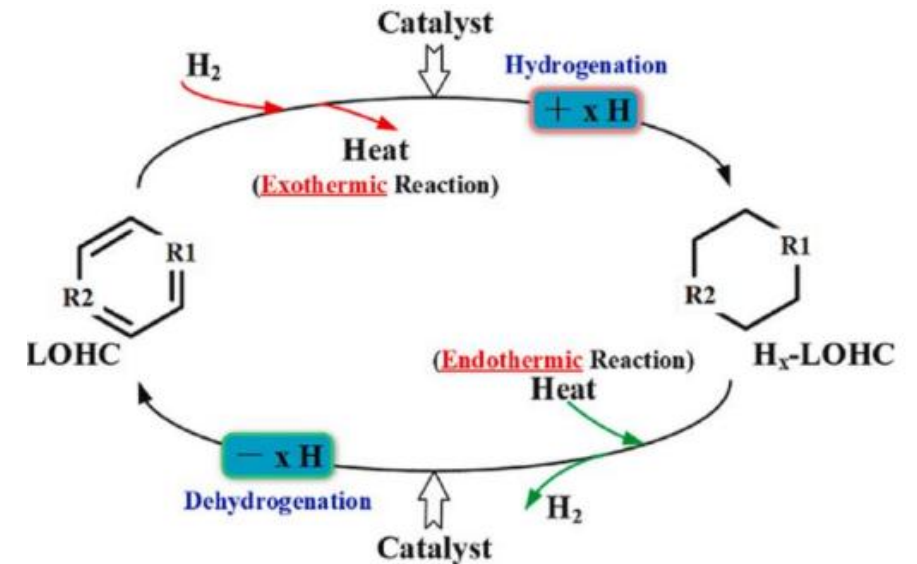


	Grav. Kap. [wt%]	Vol. Kap. [kWh/l]	Temp. [K]	Druck [bar]
CGH ₂	1-6	< 0.83	Umgebung	700
LH ₂	6-17	1.2	20 K	1-10
MgH ₂	7.6	3.67	> 573 K	< 30
TiFe	1.86	4.03	Umgebung	< 30
TiMn ₂	1.85	4.09	Umgebung	< 30
LaNi ₅	1.49	4.12	Umgebung	< 30
NaAlH ₄	7.5	4.08	> 373 K	< 30
LiBH ₄	18.5	3.20	> 573 K	< 30

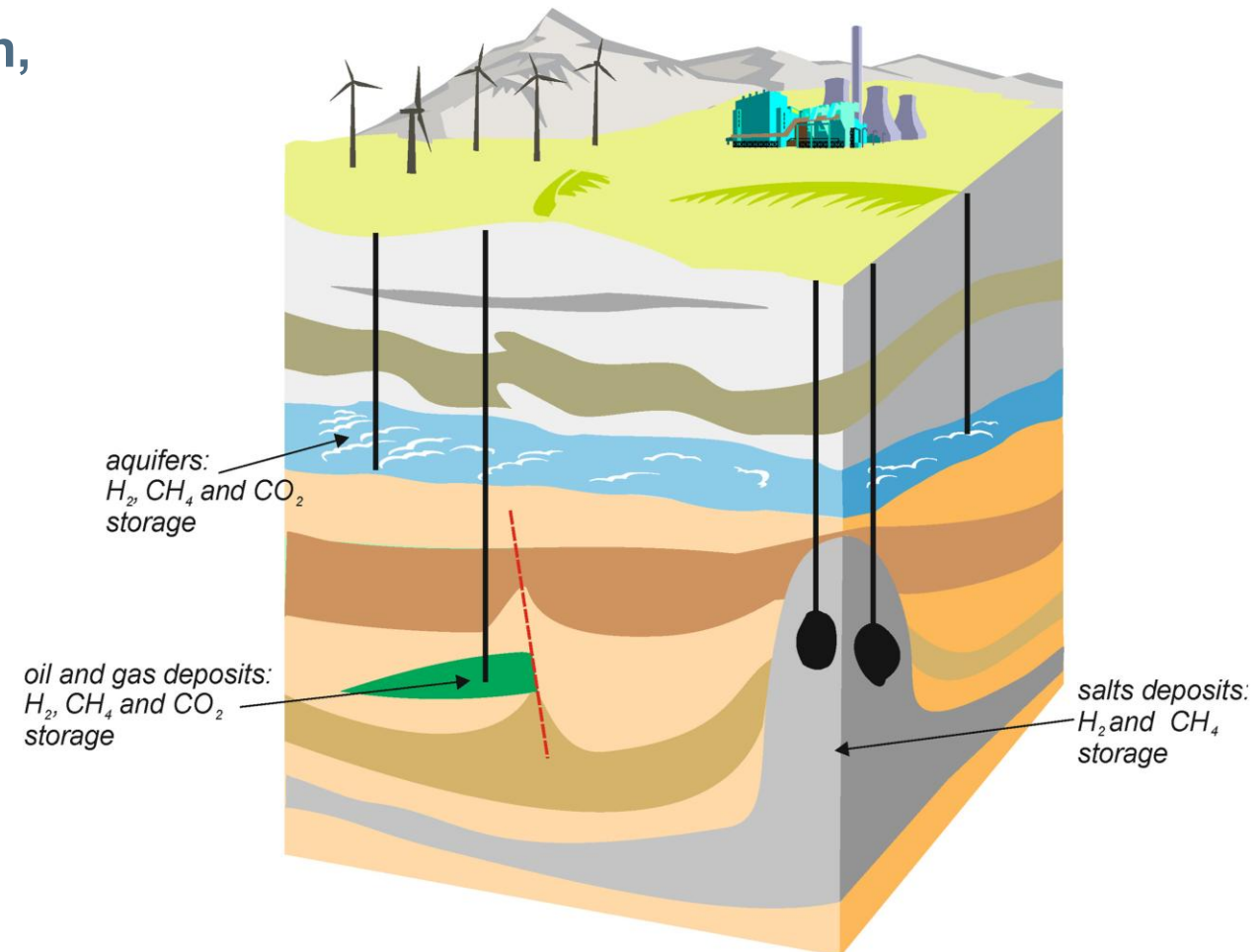


Quelle: Luo, Long, et al. "High-entropy alloys for solid hydrogen storage: a review." *International Journal of Hydrogen Energy* (2023).

- **Reversible Wasserstoffspeicherung** in Cycloalkanen, Aromaten und deren Derivaten
- **Hydrierung** von Toluol, Naphthalin, N-Ethylcarbazol zu **gesättigten Verbindungen** (Methylcyclohexan, Decalin und Dodecahydro-N-ethylcarbazol)
- **Exotherme katalytische Hydrierung** bei $p > 5$ bar und $T = 150-320$ °C
- **Endotherme katalytische Dehydrierung** bei $p < 5$ bar und $T = 350-320$ °C
- **Speicherkapazitäten 5.5 – 7.5 Gew.%**
- **Vorteile:** produziert in Großmengen, Nutzung bestehender Öl- und Gasinfrastruktur
- **Nachteile:** teure Katalysatoren, Energieaufwand (11 kWh/kg H₂ → 33% vom H_u) für Dehydrierung
- **Kommerziell:** Hydrogenious LOHC Technologies



- **Speicherung von Wasserstoff in Salzkavernen, Aquiferen und ausgeschöpften Öl- und Gaslagerstätten**
- **Vorteile:**
 - **Sichere Lagerung**
 - **Geringer Platzbedarf** (da unterirdisch)
 - **Relativ geringe Kosten pro gespeichertes kg an Wasserstoff**
 - **Mehrere Millionen Tonnen Wasserstoff** können gespeichert werden
 - **Bestehendes Know-how** als Erdgasspeicher
- **Nachteile:**
 - **Hohe CAPEX / Investitionskosten**
 - **Verfügbarkeit abhängig von geografischen Gegebenheiten**



Quelle: Radosław Tarkowski, Barbara Uliasz-Misiak, Piotr Tarkowski, Storage of hydrogen, natural gas, and carbon dioxide – Geological and legal conditions, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 46, Issue 38, 2021, Pages 20010-20022, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.131>.



Anwendungsart

- Stationär / mobil / Transport
- Speichermenge
- Speicherdauer
- Befüll-/Entladerate u. Dynamik



Herstellung

- Anforderung ans Rohmaterial
- Skalierbarkeit
- Serienproduktion
- Tankbau / Montageaufwand



Umweltaspekte

- CO₂-Fußabdruck entlang des ganzen Lebenszyklus
- Giftigkeit
- Rezyklierbarkeit



Technische Aspekte

- Betriebsbedingungen (p, T)
- Speicherkapazitäten
- Lebensdauer
- Synergieeffekte im Gesamtsystem (e.g. Abwärme)



Sicherheitsaspekte












- Umgang / Handling
- Entflammbarkeit
- Giftigkeit
- Explosivität



Wirtschaftsaspekte

- Materialkosten
- Materialhäufigkeit
- Materialverfügbarkeit
- Herstellungskosten
- Kosten Gesamtsystem

Technologie nach Anwendung

	Small-scale	Large-scale	Short-term	Seasonal	Transport	Car	Bus	Truck	Train	Ship	Aviation
CGH2	✓		✓		✓	✓	✓	✓	~		
LH2		~			✓		~	✓	~	✓	✓
Adsorption											
Hydride	~	✓	~	✓					✓	~	
LOHC		~		~	✓					✓	
Underground		✓		✓							

Contact

DI Dr. techn. Nejc Klopčič, MBA

HyCentA Research GmbH

Inffeldgasse 15

A-8010 Graz

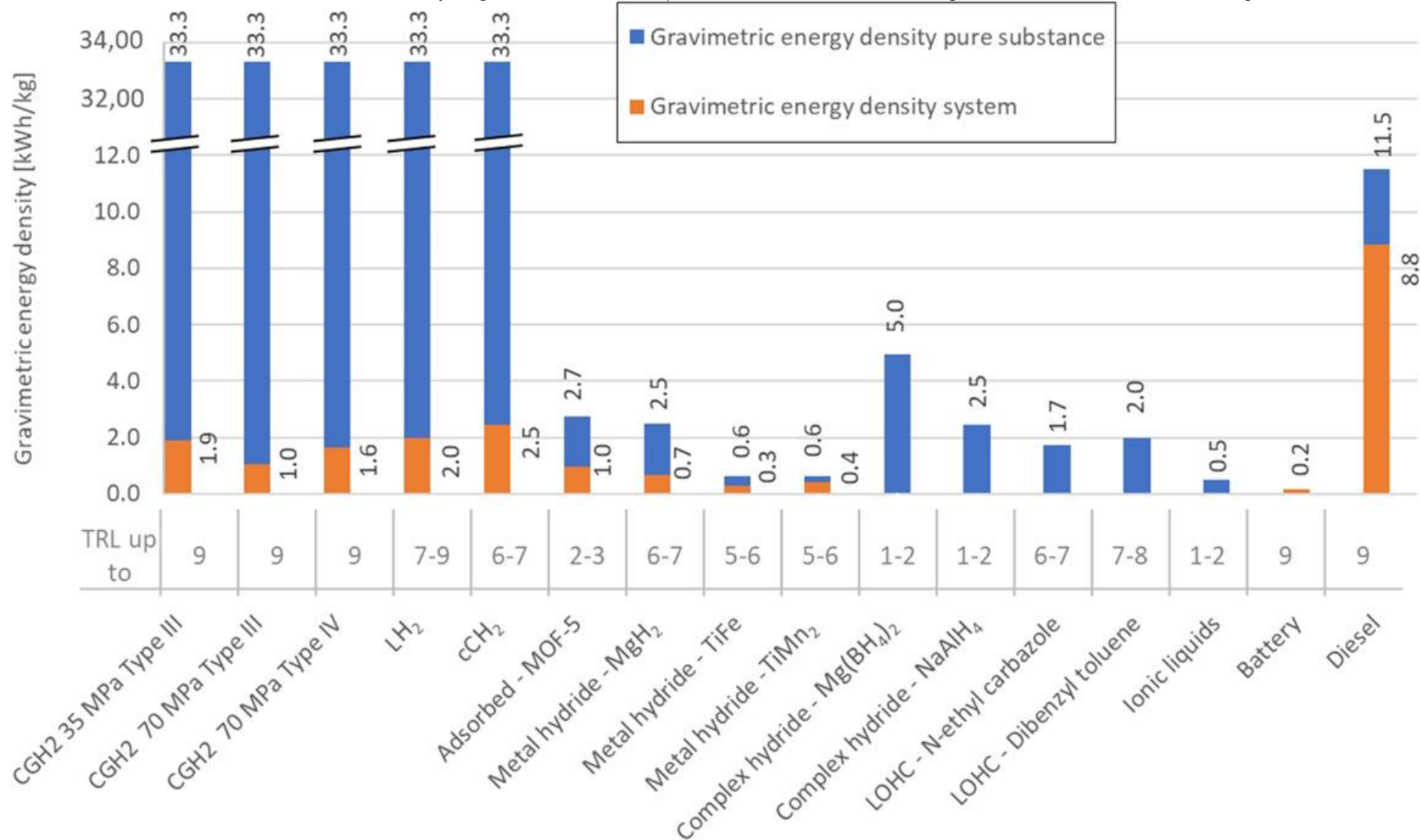
Phone: +43 316 873 9492

klopccic@hycenta.at

www.hycenta.at

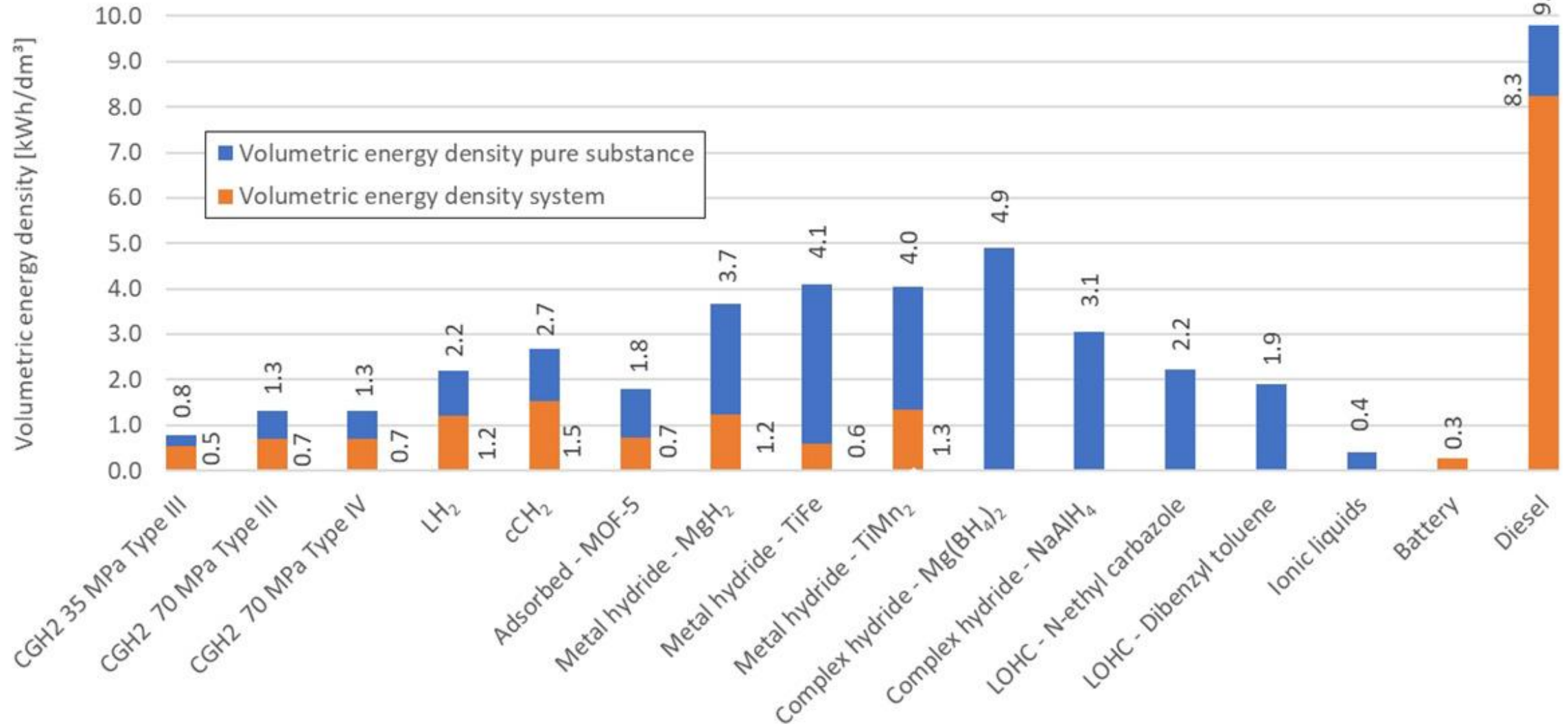
Energiedichten Speichersysteme

Quelle: Trattner, A., et al., „Renewable Hydrogen: Modular Concepts from Production over Storage to the Consumer,“ Chemie Ingenieur Technik, 2021




Energiedichten Speichersysteme

Quelle: Trattner, A., et al., „Renewable Hydrogen: Modular Concepts from Production over Storage to the Consumer,“ Chemie Ingenieur Technik, 2021





 Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

 Bundesministerium
Arbeit und Wirtschaft

