

# Wasserstoff und Supraleiter im Energiesystem – Hydrogen Integration Plattform (HIP)

20260416, ZIEHL X, Berlin

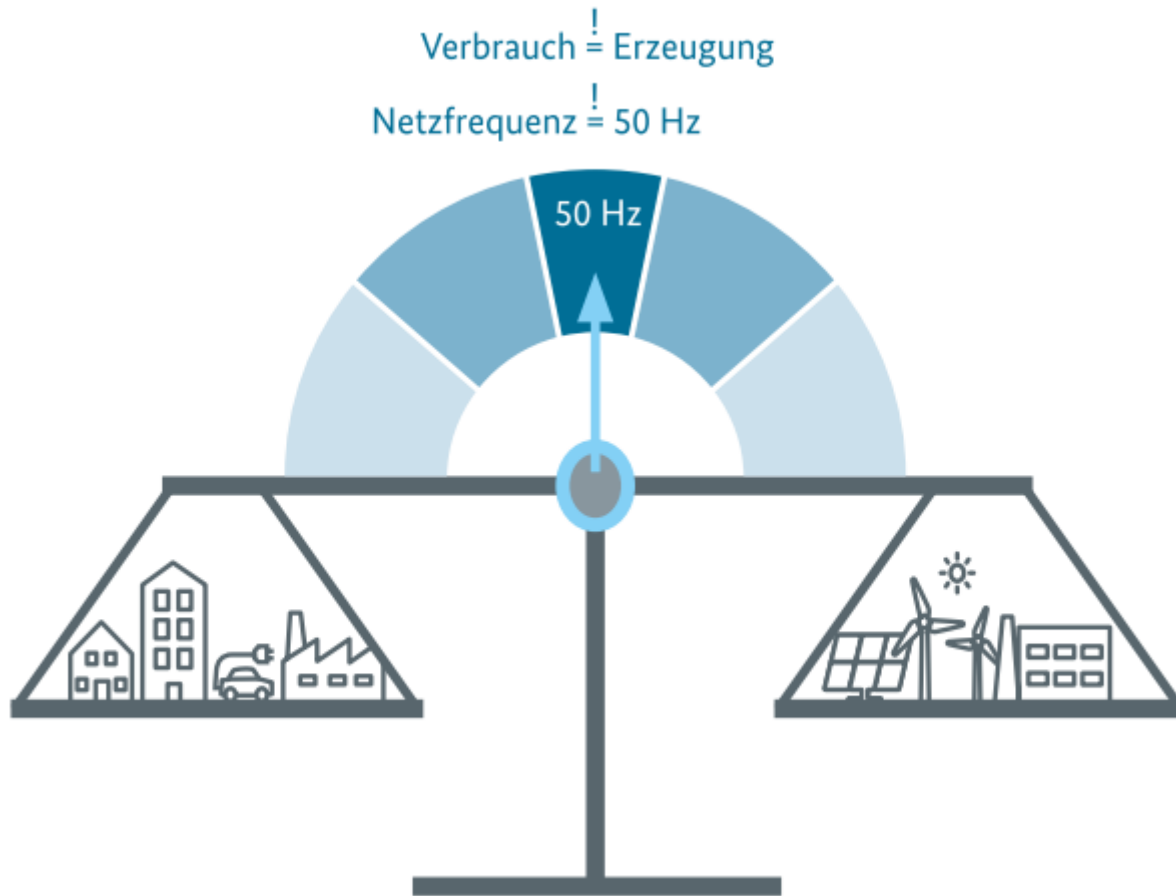
Univ.-Prof. Dr. Tabea Arndt, Dr. Michael Wolf, Prof. Dr.-  
Ing. Giovanni de Carne, Niels Nemsow et al., KIT ITEP



## Inhalt

- Einführung & Motivation
- EnergyLab
- HIP (konventionell)
- HIP (LH<sub>2</sub> & Supraleitung)
- Zusammenfassung und Ausblick

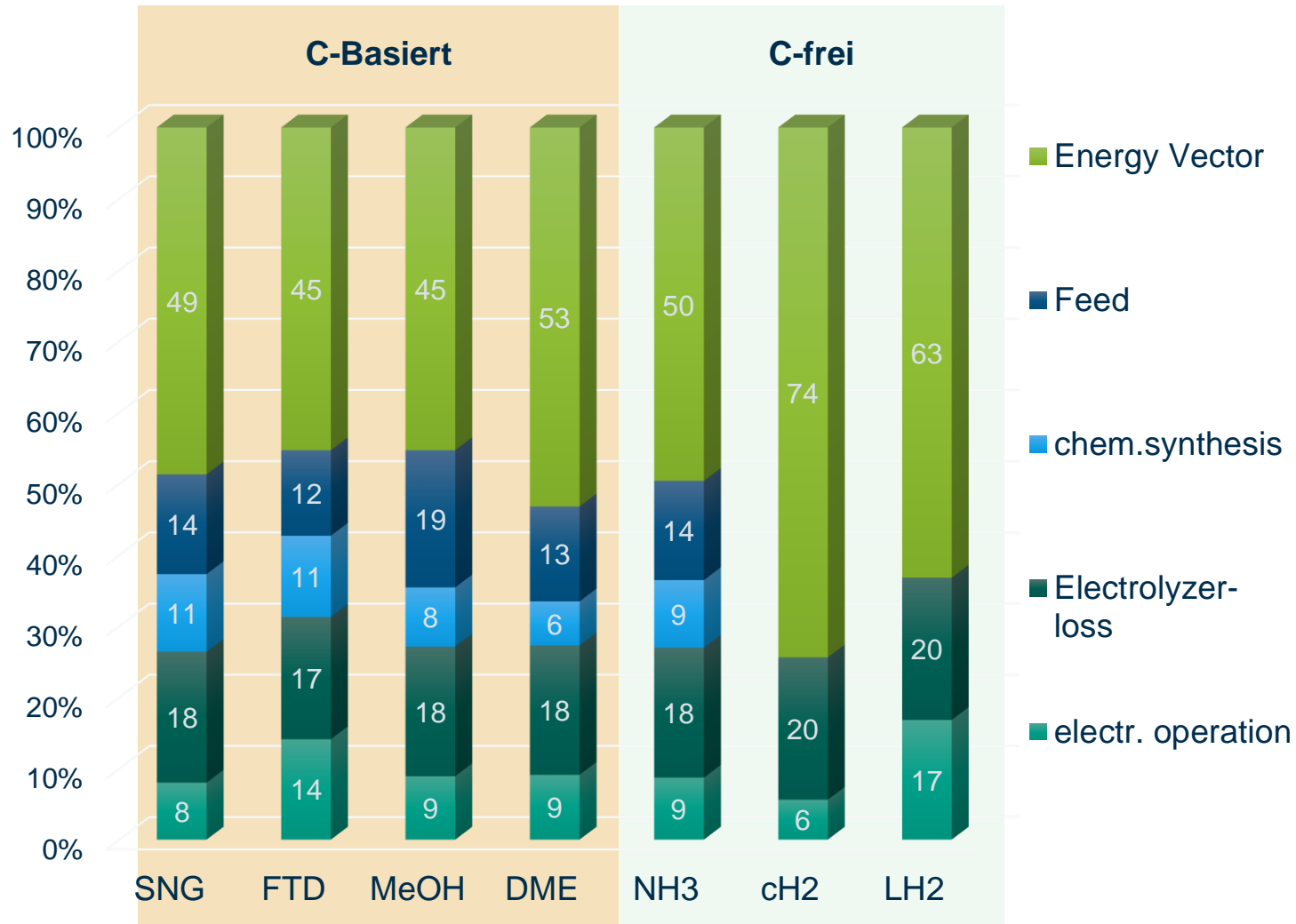
# Elektrische Energienetze



[BMWE-Roadmap Systemstabilität, November 2023]

Die elektrischen Energienetze müssen aus Stabilitätsgründen balanciert sein – ein Überangebot muss anderweitig genutzt werden.  
Welche molekularen Energieträger nutzen? - Quiz

# Energievektoren - e-fuel Potenzial beim "Einspeichern"

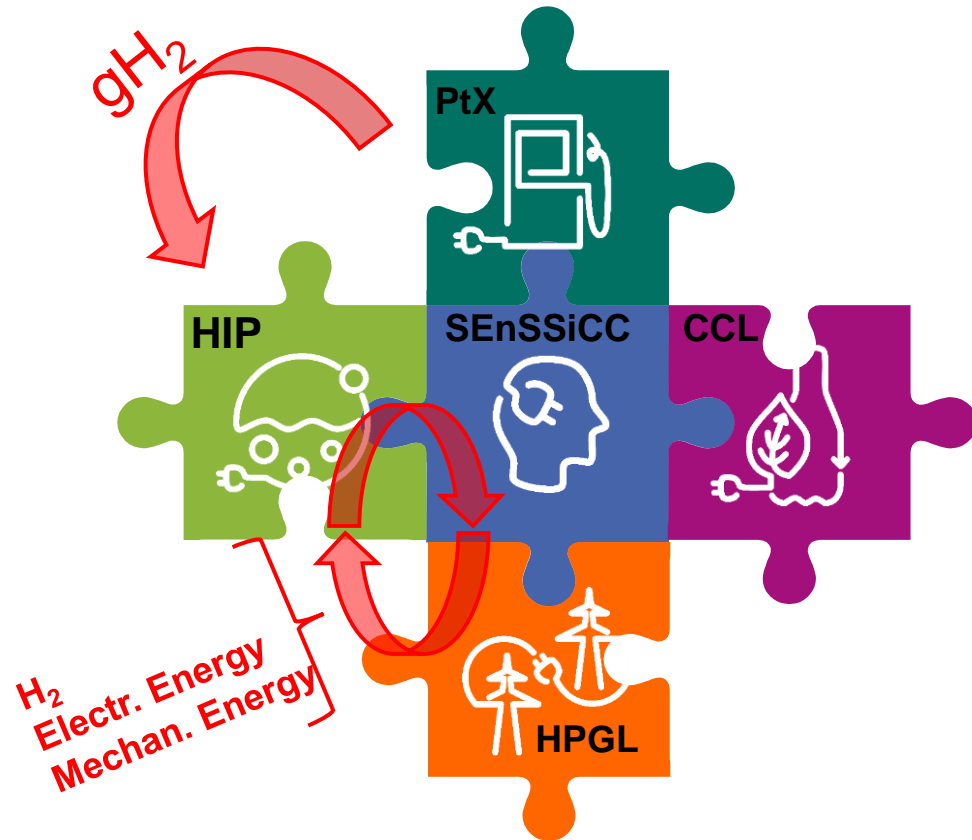


- SNG:** synthetic natural gas  
=künstliches Methan/ Erdgas
- FTD:** Fischer-Tropsch-Diesel
- MeOH:** Methanol
- DME:** Dimethylether
- NH<sub>3</sub>:** Ammoniak
- cH<sub>2</sub>:** compressed hydrogen  
=Wasserstoff unter Druck (700 bar)
- LH<sub>2</sub>:** Flüssigwasserstoff

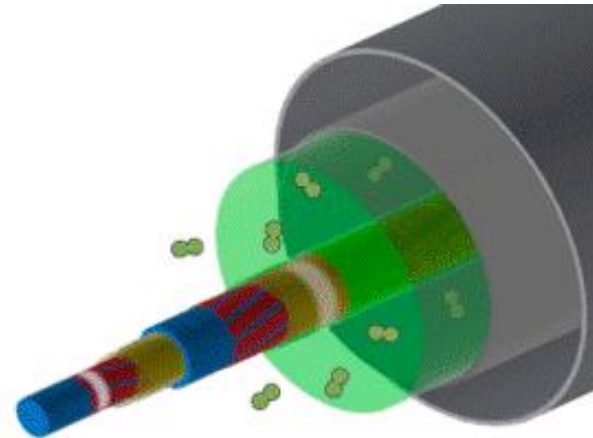
Achtung: Nur „Einspeichern“ betrachtet!

H<sub>2</sub> ist bzgl. eingespeichertem Energieanteil ein Champion!  
Deshalb die HIP (Hydrogen Integration Platform) im EnergyLab @KIT...

# EnergyLab – HIP (Hydrogen Integration Platform) @ KIT



- Die HIP ist eingebettet in die Energiesystemforschung
- Systemwirkungen
- Komponentenentwicklung und –test, Beispiele:
  - Hybride Energie-Pipeline mit HTS
  - Neuartige Motoren
  - Kalte Leistungselektronik
  - uvm.



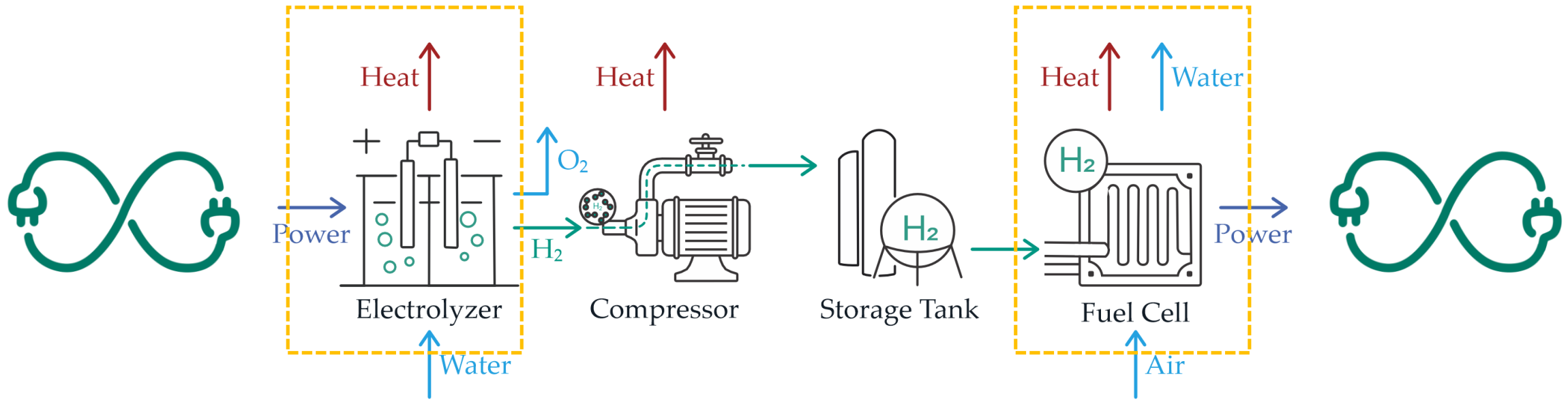
Forschungsfokus: Zusammenspiel aller Komponenten des Energiesystems.  
EnergyLab und HIP im Detail...



(Team H2-in-the-loop & H2-Rail; Dank an Niels Nemsow, KIT ITEP, RTSET und Kollegen)

Die HIP ist eingebettet in das Hardware-Modell des Energiesystems am KIT.  
H<sub>2</sub>-in-the-loop...

# Schema H<sub>2</sub>-in-the-Loop



## Elektrolyseure

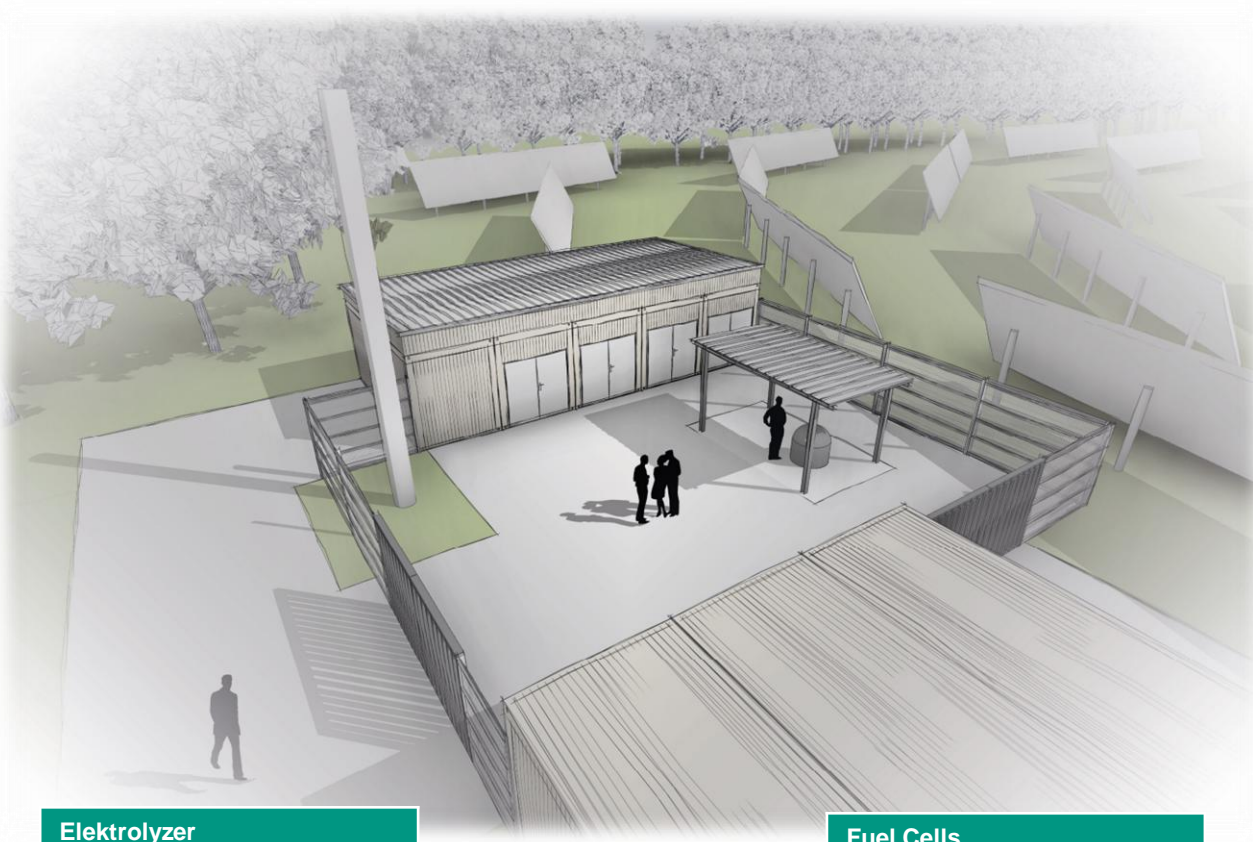
- Untersuchung als **variable Netzlasten**
- Erforschung von verschiedenen **Netzdienst-Szenarien** in der Power-Hardware-in-the-Loop

## Brennstoffzellen

- Untersuchung als **variable Netzquellen**
- Erforschung von verschiedenen **Netzdienst-Szenarien** in der Power-Hardware-in-the-Loop

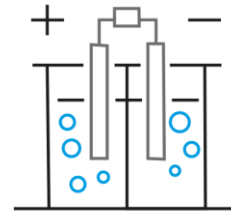
Integration der Elektron-Molekül-Wandler in das Energiesystem.  
Infrastruktur...

# H<sub>2</sub>-in-the-Loop – Details der Infrastruktur



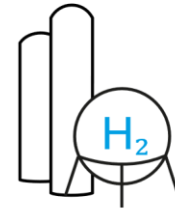
Elektrolyzer	
$P_{N,EL}$	50 kW
$U_{EL}$	3x 400 V AC
$I_{EL,max}$	70 A
$E_{H_2}$	19 kg / 1267 kWh

Fuel Cells	
$P_{N,FC}$	10 kW
$U_{FC}$	41..57 V DC
$I_{FC,max}$	250 A
$E_{H_2}$	19 kg / 317 kWh



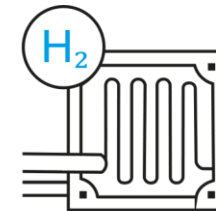
## Alkali-Elektrolyse Einheit

Anschlussleistung 50 kW  
 H<sub>2</sub>-Produktion 8 Nm<sup>3</sup>/h at 8 bar



## H<sub>2</sub>-Speicher

Hochdruck bis zu 450 bar  
 Kapazität 800 L / 32 kg / 1000 kWh

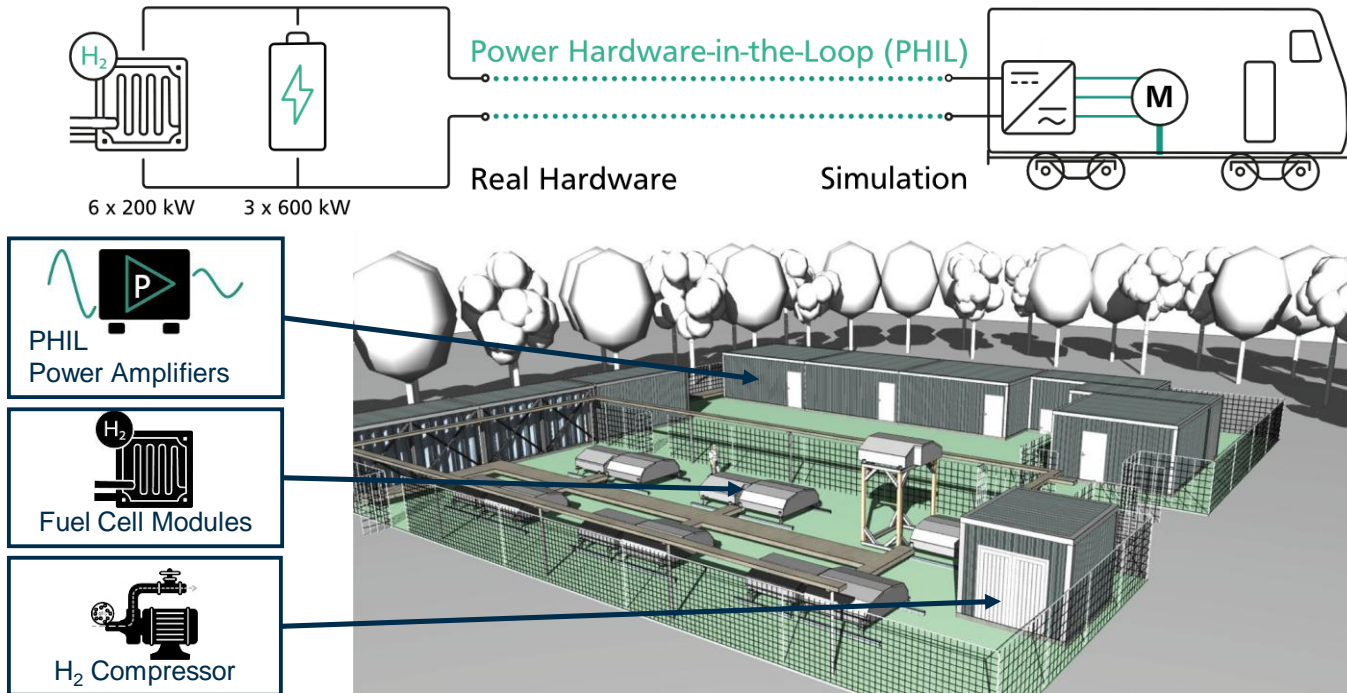


## PEM-Brennstoffzellen Einheit

Nominelle Ausgangsleistung  
 10 kW  
 Batterie-gepuffertes DC interface bei 48V

Hardware zur Evaluation.  
 H<sub>2</sub>-Rail-Anwendung...

# H<sub>2</sub>Rail Infrastruktur



- 1.2 MW Brennstoffzellenleistung (6 x 200 kW)
- 1.8 MW Batterieleistung (3 x 600 kW)
- DC-Kopplung von Brennstoffzellen und Batterien
  - Flexibler Einsatz im PHIL-System
- Lokale Produktion von H<sub>2</sub> (35 bar) und on-site Kompression (350 bar)
- Hochdruckspeicher von bis zu 600 kg H<sub>2</sub> (20 MWh)

Batteries		Fuel Cells	
$P_{N,Bat}$	3 x 600 kW	$P_{N,FC}$	6 x 200 kW
$U_{Bat}$	835 V	$U_{FC}$	330..700 V
$I_{Bat,max}$	3 x 720 A	$I_{FC,max}$	305 A
$E_{Bat}$	3 x 400 kWh	$E_{H_2}$	600 kg / 8300 kWh

Realisierung eines brennstoffzellen-elektrischen Antriebstrangs von Lokomotiven (“iron bird”).  
Geht das auch für “kleinere Fahrzeuge” – LKW?...

# Flüssig-Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) LKWs (LH<sub>2</sub>-brennstoffzellen-elektrischer Antriebsstrang)



26.09.2023: Daimler Truck AG <http://media.daimlertruck.com/go/HydrogenRecordRun>

- 40 Tonnen LKW
- 80 Liter LH<sub>2</sub>
- Reichweite >1000 km ohne Nachtanken
- Von Würth → Berlin  
(nahe Karlsruhe am Oberrhein)
- Weitere Effizienzsteigerungen möglich.

Machbarkeit demonstriert!  
Kostensituation...

# Energiekosten und Effizienzen\* heute

## Diesel/ Heizöl

$$\frac{(1 - 2) \frac{\text{€}}{\text{l}}}{9.8 \frac{\text{kWh}}{\text{l}}} \approx 0.10 - 0.20 \text{ €/kWh}$$

wirkungsgradbereinigt:

0.30 – 0.60 €/kWh



"Dieses Foto" von  
Unbekannter Autor  
ist lizenziert gemäß  
[CC BY-SA](#)

## Wasserstoff

$$\frac{8 \frac{\text{€}}{\text{kg}}}{33.3 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} \approx 0.24 \text{ €/kWh}$$

wirkungsgradbereinigt:

0.40 €/kWh



[Hylane Pressemitteilung  
18.11.2025]

## elektrische Energie

≈ 0.30 €/kWh

wirkungsgradbereinigt:

0.31 €/kWh



Neue Energieträger und –formen haben es schwer im Wettbewerb mit den Fossilen.  
Wie sieht es mit der Treibstoff-Versorgung & Industrialisierung von H<sub>2</sub> aus?...

# LH<sub>2</sub>-Importe

DAIMLER TRUCK



Daimler Truck AG

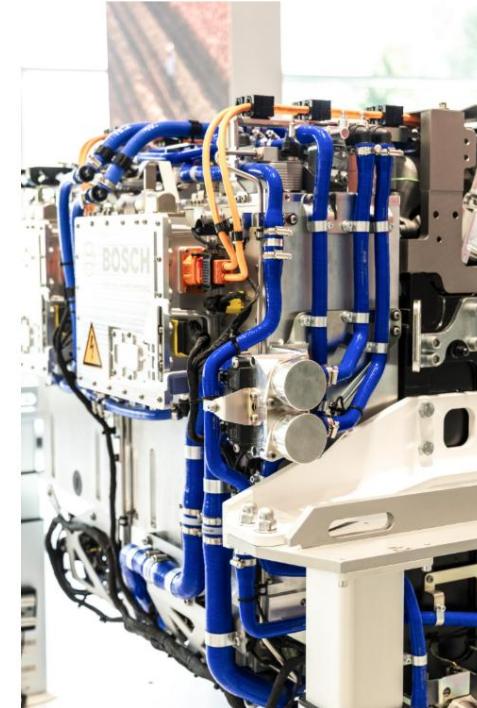
## Press Release

June 12<sup>th</sup>, 2024

### Daimler Truck and Kawasaki Heavy Industries sign MoU to jointly study the optimization of liquid hydrogen supply chains

- Daimler Truck and Kawasaki Heavy Industries sign MoU to jointly study optimized liquid hydrogen supply options for the decarbonization of road freight transportation in Europe.
- Initiative covers key elements of the entire supply chain and has significant potential to reduce costs of liquid hydrogen.
- Agreement supports Kawasaki's ambition to lead the development and implementation on international liquefied hydrogen supply chains, and Daimler Truck's ambition to lead sustainable transportation.

Tokyo (Japan), Leinfelden-Echterdingen (Germany) – Kawasaki Heavy Industries (“Kawasaki”) and Daimler Truck AG (“Daimler Truck”), one of the world’s leading commercial vehicle manufacturers, have signed a Memorandum of Understanding (MoU) to study the establishment and optimization for the supply of liquid hydrogen.



Dipl.-Ing. Christoffer Uhr, Dipl.-Ing. Kai Weeber und Dipl.-Ing. Pierre Andrieu sind sich sicher: Ja, es gibt einen anderen Weg, denn sie sind ihn gegangen. Konsequenz, zielgerichtet und erfolgreich. Sie haben ein Brennstoffzellen-Antriebssystem entwickelt, ihr Fuel Cell Power Module, das aus Wasserstoff Strom erzeugt und es ermöglicht, einen schweren Lkw elektrisch und emissionsfrei zu betreiben, ohne Einschränkungen bei Reichweite oder Nutzlast für Transportgüter.

[<https://www.deutscher-zukunftspreis.de/de/team-3-2025>]

Industrielle Partner in Abstimmung zur LH<sub>2</sub>-Lieferkette.

Industrialisierung der Antriebsstränge.

Industriepartner starten strategische Aktivitäten bzgl. LH<sub>2</sub>.  
Kürzliche Konkretisierung zur Lieferkette...

# LH<sub>2</sub> Lieferkette



Daimler Truck, HHLA und Kawasaki Heavy Industries starten strategische Partnerschaft zum Aufbau einer Lieferkette für Flüssigwasserstoff in Europa

- Die drei Partner haben auf der „Hydrogen Technology World Expo“ in Hamburg eine **Absichtserklärung** (Memorandum of Understanding, MoU) unterzeichnet.
- Ziel ist es, die Entwicklung einer **zuverlässigen und kosteneffizienten Lieferkette** für grünen Flüssigwasserstoff über den Hamburger Hafen in das europäische Hinterland zu prüfen.
- Die Initiative möchte weitere Unternehmen und Institutionen gewinnen, um ein Konsortium **entlang der gesamten Wasserstoff-Wertschöpfungskette** zu bilden.

LH<sub>2</sub>-Importe, Anlandung mit Verteilung geplant.  
Wie sieht es mit CH<sub>2</sub> aus?...

# cH<sub>2</sub>-Korridor durch Europa



Vier Unternehmen haben während des Global Hydrogen Summit in Rotterdam ein Memorandum of Understanding (MoU) für einen Wasserstoff-Korridor für dem **LKW-Verkehr** in Europa unterzeichnet.

Das Konsortium „**See Hydrogen Mobility**“ will bis eine 2031 eine komplette Wasserstoff-Infrastruktur aufbauen, die sich über Ost- und Mitteleuropa, die Türkei und Teile Westeuropas erstreckt. Die beteiligten Unternehmen sind **See Hydrogen** aus Bulgarien sowie die niederländischen Firmen **Resato Hydrogen Technology**, **HyGear** und **Green Energy Park-Global**. Resatos Expertise liegt im Aufbau von Wasserstoff-Tankstellen sowie in Hochdruck-Transportsystemen, der Fokus von HyGear liegt in der Wasserstoffproduktion.

Als ersten Meilenstein will das Konsortium bis 2028 ein Pilotprojekt in Bulgarien realisieren. Dieses soll mindestens drei Wasserstoff-Tankstellen, eine Wasserstoff-Produktionsanlage, **über 100 Wasserstoff-Lkw** sowie die notwendige digitale Infrastruktur umfassen.

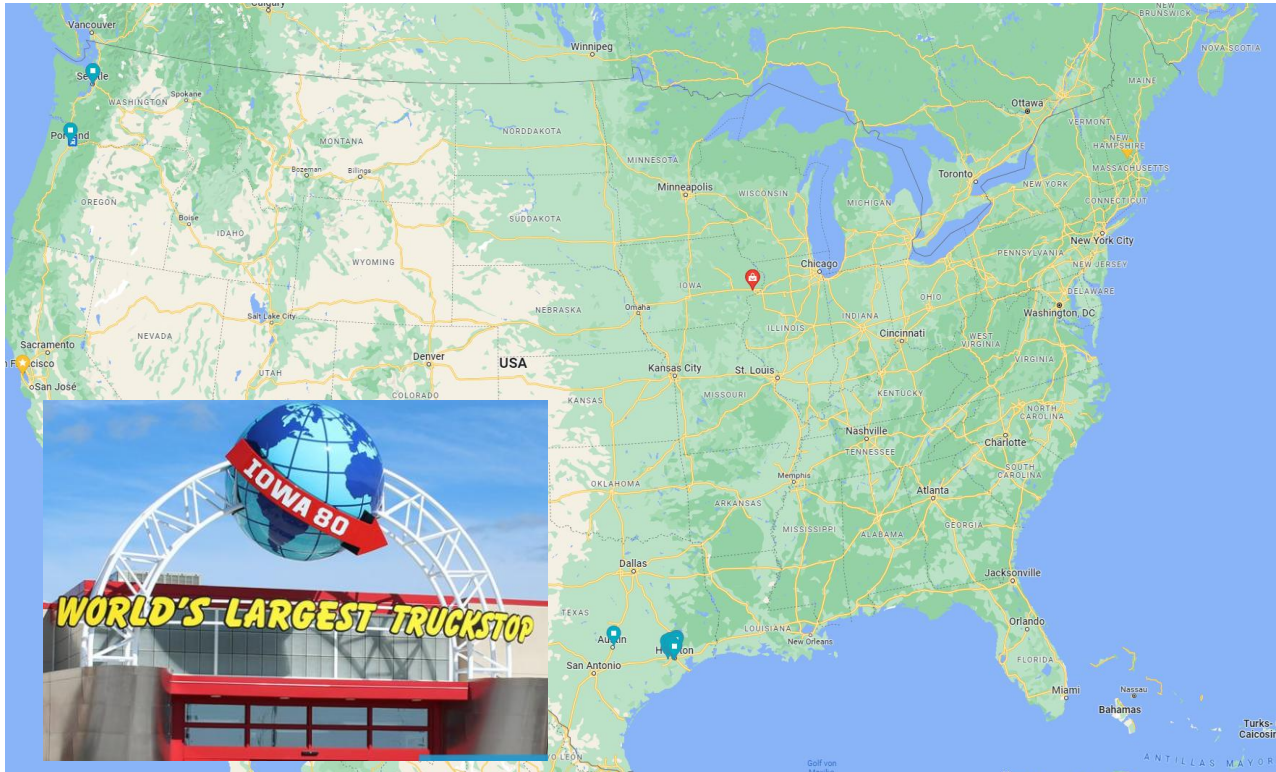
Der vollständige Ausbau des Projekts sieht mehr als 100 Wasserstoff-Tankstellen entlang des transeuropäischen Verkehrsnetzes vor. Die Tankstellen sollen in Abständen von etwa 200 Kilometern errichtet werden.

Zudem plant das Konsortium 17 regionale Produktionsanlagen für Wasserstoff sowie den Einsatz von bis zu **10.000 wasserstoffbetriebenen Lkw** durch ein Leasing-Modell nach dem Prinzip Pay-per-Use. Der benötigte grüne Wasserstoff soll **teilweise auch aus grünem Ammoniak** gewonnen werden.

Bis September 2025 wollen die Konsortialpartner gemeinsam die Eckpunkte festlegen, gefolgt von einer Entwicklungsvereinbarung später im Jahr. Das Konsortium steht für weitere Stakeholder aus der Wasserstoff-Wertschöpfungskette offen und sucht auch Kontakte zu öffentlichen Akteuren.

Konkretere Pläne auch für cH<sub>2</sub> (mit größerer Flächendichte).  
Realitäts-Check...

# Die größte LKW-Tankstelle der Welt: "Iowa 80", Walcott, IA, USA



[<https://iowa80truckstop.com/about-iowa-80/fun-facts/>]

- 24/7-Betrieb seit 1964
- 900 Parkplätze für LKW
- 5000 Tankvorgänge pro Tag

Umgesetzte Gesamtenergie am Tag:

$$E = 5000 \times 1000 \text{ l} \times 9.8 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} \approx 50 \text{ GWh}$$

Leistung:

$$P = \frac{E}{24 \text{ h}} \approx 2 \text{ GW}$$

Diesel-Umsatz entspricht einem großen Kernkraftwerk (Mississippi wäre nahe) – ist aktuell jedoch unabhängig vom elektrischen Energienetz.  
Kann man das mit (L)H2 ersetzen?

# Wäre es möglich, Diesel durch LH<sub>2</sub> zu ersetzen?

## Diesel

- LKW-Verbrauch 330 l/1000 km

$$\rightarrow 330 \frac{\text{l}}{1000 \text{ km}} \cdot 0.835 \text{ kg/l} \cdot 11.9 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 3285 \frac{\text{kWh}}{1000 \text{ km}}$$

- IOWA(Diesel):

$$50 \text{ GWh} \Rightarrow 5 \cdot 10^6 \text{ liter Diesel}$$

## LH<sub>2</sub>

- LKW-Verbrauch 80 kg/1000 km

$$\rightarrow 80 \frac{\text{kg}}{1000 \text{ km}} \cdot 33.3 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 2664 \frac{\text{kWh}}{1000 \text{ km}}$$

- IOWA(LH<sub>2</sub>):

$$50 \text{ GWh} \cdot \frac{2664}{3285} \cdot \frac{2.4 \text{ kWh}}{\text{l}} \Rightarrow 17 \cdot 10^6 \text{ liter LH}_2$$

x3



Ca. 3x größeres LH<sub>2</sub>-Volumen anzuliefern und umzusetzen als Diesel – erscheint machbar.  
Macht LH<sub>2</sub> in Lokomotiven Sinn?...

# Kürzliches Whitepaper – LH<sub>2</sub> im Eisenbahnbetrieb



The viability of railway vehicles with liquid hydrogen storage is highly dependent on the availability of liquid hydrogen in the future energy systems. If liquid hydrogen is used to distribute hydrogen via ships, trains and trucks then the TCO of liquid hydrogen storages is lower compared to gaseous storages. However, in case of distribution of gaseous hydrogen via pipeline the additional step of liquification might lead to a substantial increase of the TCO in case of liquid hydrogen storage.

[Eiboock, M.; Loipolt, P.; Jeitler, D.; Stepan, T.; SAG New Technologies GmbH;  
Liquid Hydrogen as Attractive Energy Storage Solution for Railway Applications  
[https://sag.at/wp-content/uploads/2025/05/2025\\_SAG\\_Whitepaper\\_Schienenfahrzeuge.pdf](https://sag.at/wp-content/uploads/2025/05/2025_SAG_Whitepaper_Schienenfahrzeuge.pdf)]

- Die Tragfähigkeit von Eisenbahnfahrzeugen mit LH<sub>2</sub> hängt von der **Verfügbarkeit** im zukünftigen Energiesystem ab.
- Ein Transport von LH<sub>2</sub> mit Schiffen, Zügen und LKW bietet **TCO-Vorteile** gegenüber gH<sub>2</sub>.
- Eine manchmal notwendige **Vor-Ort-Verflüssigung** kann die Kosten deutlich erhöhen.
- Besonders für Lokomotiven auf nicht elektrifizierten Strecken (Amerika, Afrika, Asien, Australien) sinnvoll.

Lokomotiven können LH<sub>2</sub> vorteilhaft nutzen.

Wie können HTS beitragen? - Motoren in Antriebssträngen...

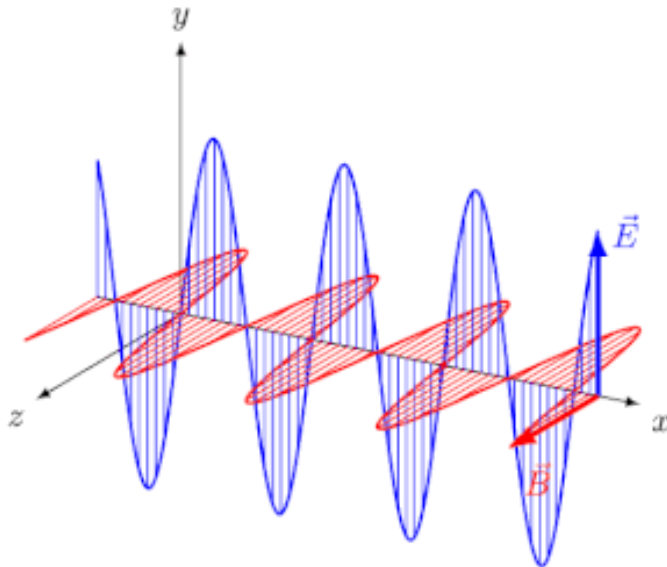
# Patentrecherche zu Elektromotoren

(worldwide.espacenet.com, 03.11.2021)

## Suchbegriffe:

“electric motor” electro-magnetic design

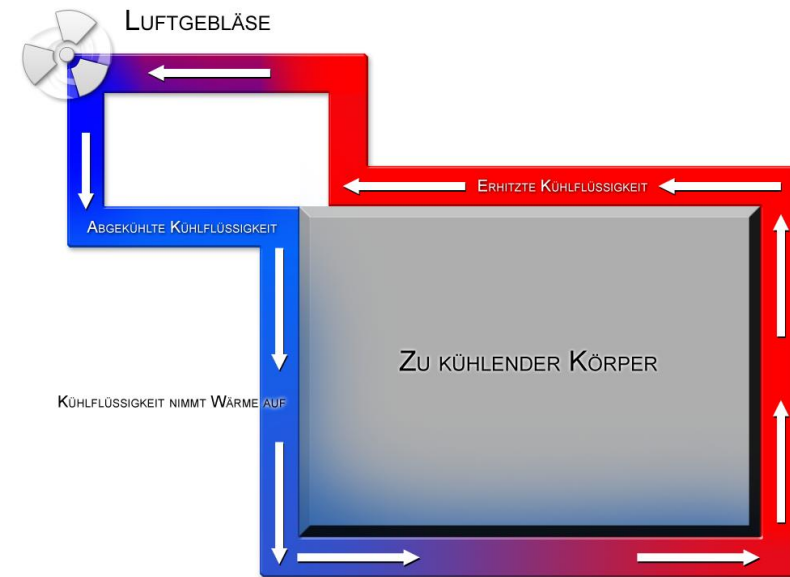
Treffer: 3080



## Suchbegriffe:

“electric motor” heat removal

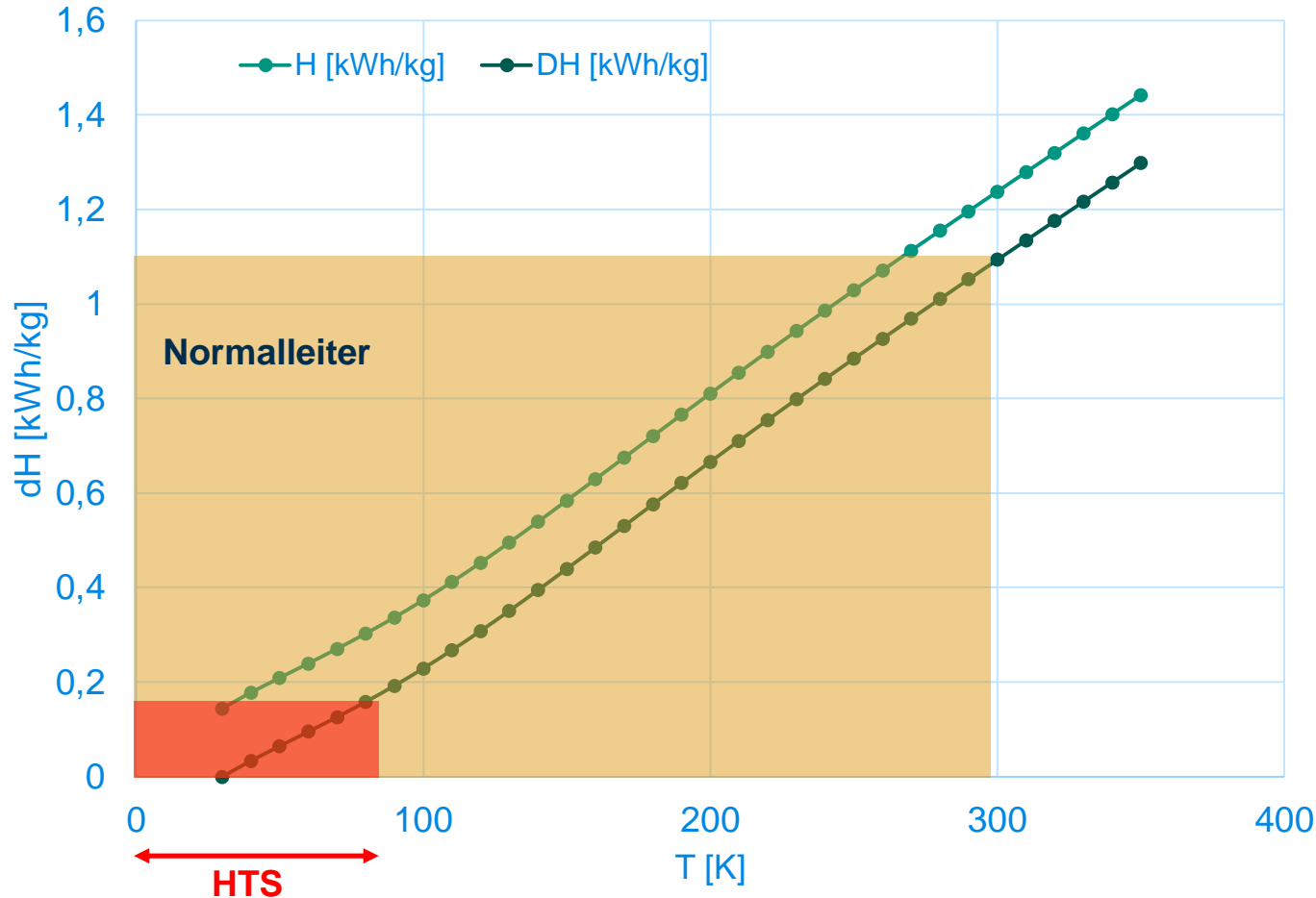
Treffer: 63021



20x mehr intellektueller Aufwand für Entwärmung als für elektromagnetisches Design!

Kann da LH<sub>2</sub> und HTS helfen?...

# Nutzen der “GratisKälte” von LH<sub>2</sub> (Druck p=4 atm)



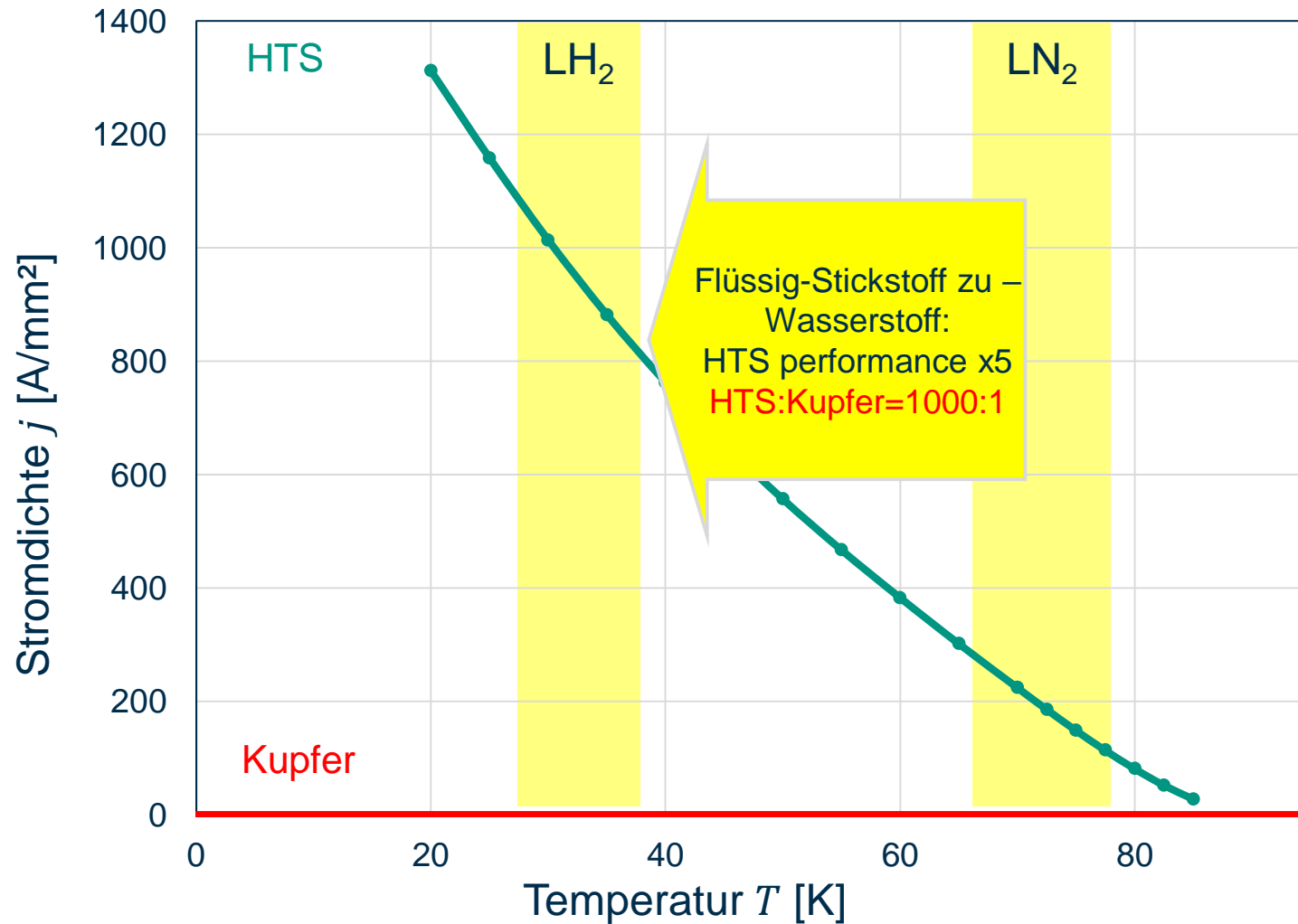
Beim Aufwärmen des (L)H<sub>2</sub> kann man die *Enthalpie H* zur Kühlung anderer Komponenten nutzen:

- Bei Hochtemperatur-Supraleitern **HTS**: bis zu **0.2 kWh/kg** Kühlaufwand
- bei **Normalleitern**: bis zu **1.2 kWh/kg** Kühlaufwand

T hi [K]	T lo [K]	dH [kWh/kg]
50	30	0,065
65	30	0,080
77	30	0,150
92	30	0,193
330	30	1,217

Die hochwertige GratisKälte von (L)H<sub>2</sub> kann zur Kühlung von anderen Komponenten im Antriebsstrang genutzt werden (NEU).  
Wieso HTS anstatt Normalleiter?...

# Vorteile von HTS

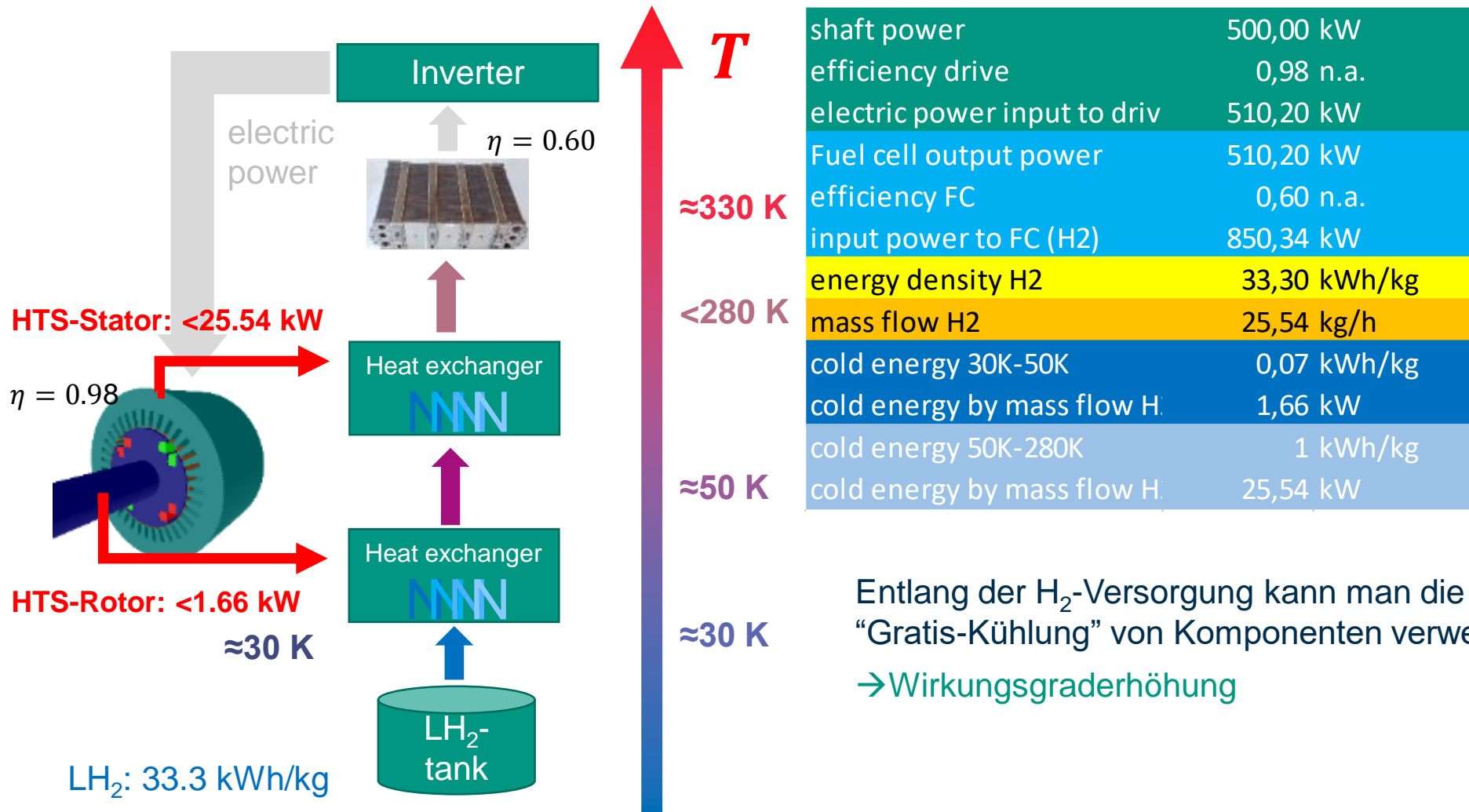


## Vorteile HTS:

- Kein Widerstand  
→ Keine Verlustwärme
- Höhere Stromdichte  
→ kompaktere Geräte
- Betriebstemperatur in LH<sub>2</sub>  
→ Keine weiterer Kühlaufwand

HTS & LH<sub>2</sub> ist ein „no-brainer“.  
Wie kann ein solches integriertes Konzept aussehen?...

# LH<sub>2</sub> brennstoffzellen-elektrischer Antriebstrang (500 kW)



Entlang der H<sub>2</sub>-Versorgung kann man die Enthalpie-Differenz zur "Gratis-Kühlung" von Komponenten verwenden  
→ Wirkungsgraderhöhung

Effizienzsteigerung durch Kombination von LH<sub>2</sub> und HTS.  
Was ist mit dem Boil-off für verschiedene Fahrzeuge?...

# Große Fahrzeuge benötigen mehr H<sub>2</sub> als im (schlecht isolierten) LH<sub>2</sub>-Tank verdampft.



Fahrzeug	Leistung [MW]	Leistungs-gewicht	Leistungs-dichte	Null-Emission	Betankungs-dauer	Leistung:boil-off *
Flugzeug	1...20	++ (>10 kW/kg)	+	+	+	>1200
Loko-motive	0.5...1	0	++	++	++	≈1000
LKW	0.3...0.6	+	++ (<1000 l)	++	++	>1000
Schiff	2...20	0	+	++	0	1.25**

++: sehr wichtig, +: wichtig, 0: wenig wichtig

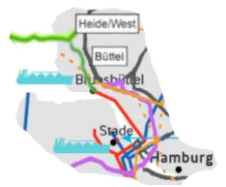
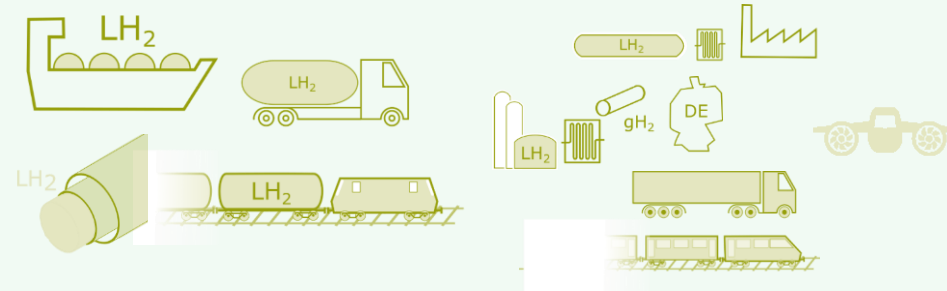
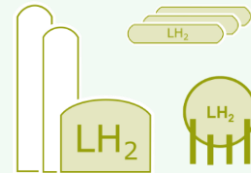
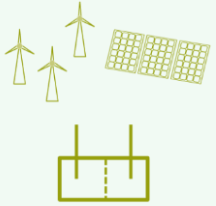
\*: Tank niedriger Isolation \*\*: abhängig vom Schiffstyp (hier: Lastschiff/ Tanker)

[Pictures: Universal Hydrogen, Siemens Mobility GmbH, Daimler Truck AG, Binnenschifffahrt online]

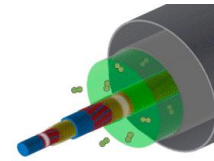
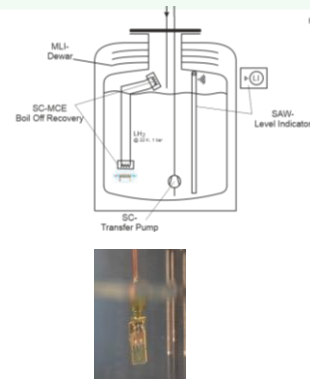
Abhängig vom Typ und dem Missionsprofil ist für einige große Fahrzeuge LH<sub>2</sub> als Treibstoff attraktiv.  
HIP-AppLHy!...

# Forschungs-Verbundprojekt "AppLHy!" teil des Leitprojekts "TransHyDE"

## Green H2 Production

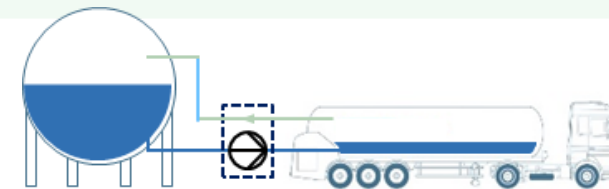


Verflüssiger beim KIT  
Betrieb ab 01/2026



Effiziente  
Speicherung  
(Technologien)

2x 200 MW  
Hybride  
Energie-  
Pipeline



Effiziente virtuelle Pipelines

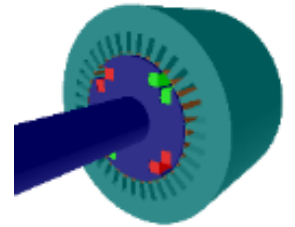


Neuartige Pumpen

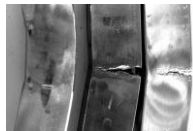


Sicherheit

Techno-ökonomische  
Anwendungsfälle



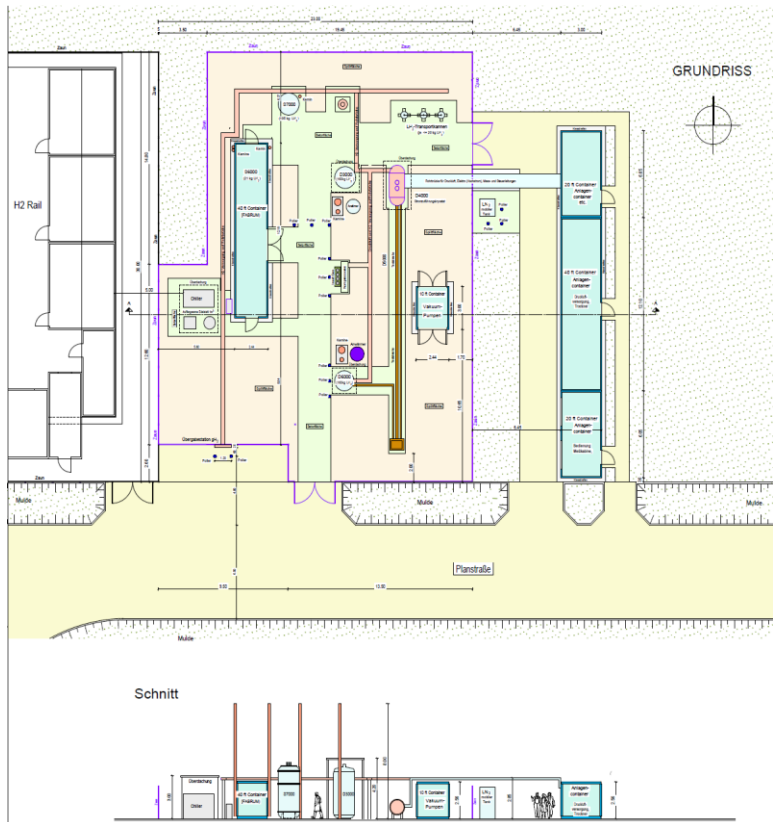
Neuartige Antriebstechnologie  
für LH<sub>2</sub>-betriebene Fahrzeuge  
und Leistungselektronik



(kryogene) Material-  
eigenschaften

AppLHy! Adressiert viele verschiedene Forschungsfragen entlang der LH<sub>2</sub>-Kette.  
HIP-AppLHy!-Installation...

# HIP-AppLHy!-Areal und kürzliche Installationen



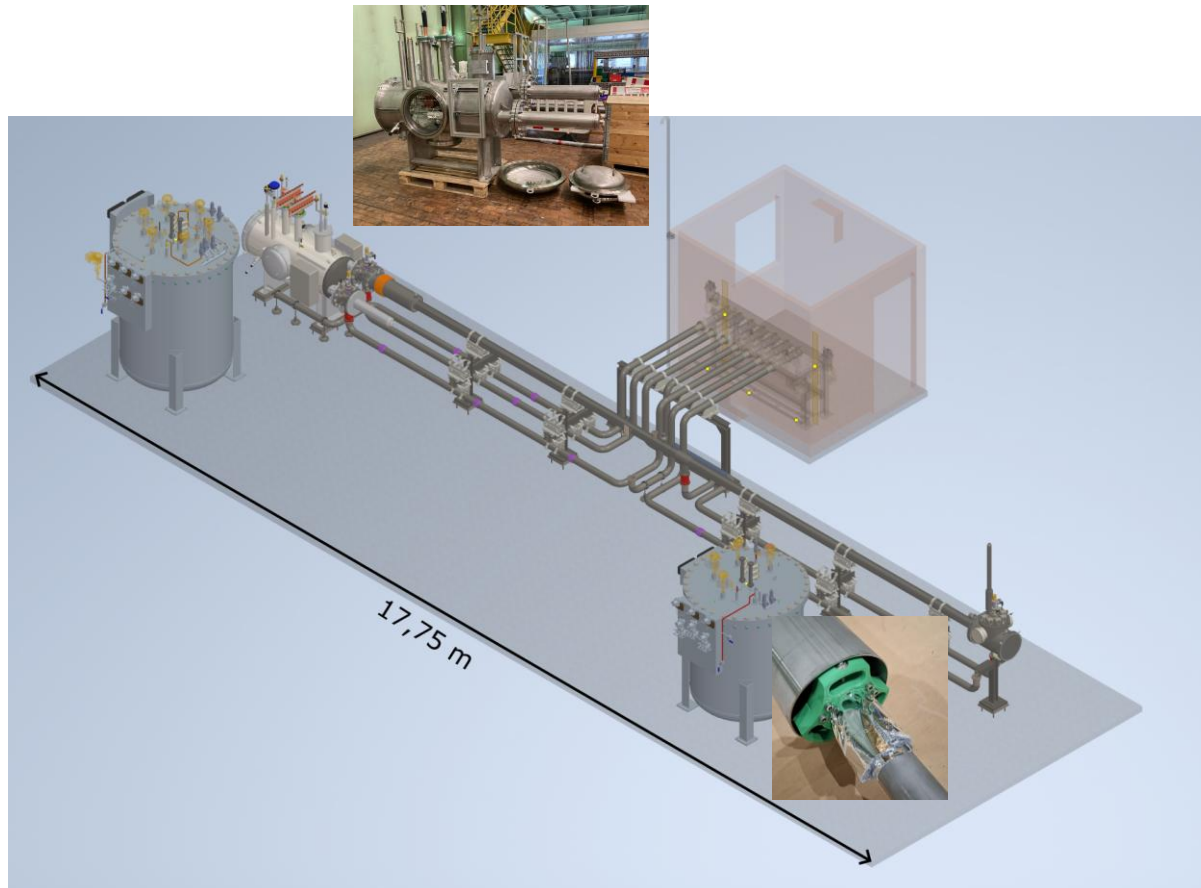
H<sub>2</sub>-Verflüssiger  
(mit LH<sub>2</sub>-Speichertank, rechts):  
Rate: ~ 2.4 kg/h > 50 kg/d



Installationsstatus HIP 03/2026 @KIT; angedeutete Hybride Energie Pipeline

Größter nicht-industrieller H<sub>2</sub>-Verflüssiger in Deutschland (Europa?) – zugänglich für Dritte.  
Hybride Energie Pipeline...

# HEP – Schema und erste Komponenten



- Eingangs- und Ausgangsspeichertanks
- Endverschluss
- 10 m Pipeline-/Kabel-Strecke

Vorteile gegenüber Einzellösungen:

- Geringere Trassenbreite
- Geringerer Invest
- Parallele oder Anti-parallele Ströme von elektrischer Energie und molekularer Energie als Szenarien.

Hybride Energie Pipeline noch im Aufbau.  
Zurück zu Antriebssträngen und Motoren (STAR-Machine)...

# Eine neuartige elektrische Maschine (HTS) – einfacher Rotor, leicht, kontaktlos

## A Novel Type of Jointless HTS Induction Machine – Proof-of-Principle

Roberto Oliveira, *Senior Member, IEEE*, Tabea Arndt, Andrés Yenes, Matthias Eisele, Marion Kläser

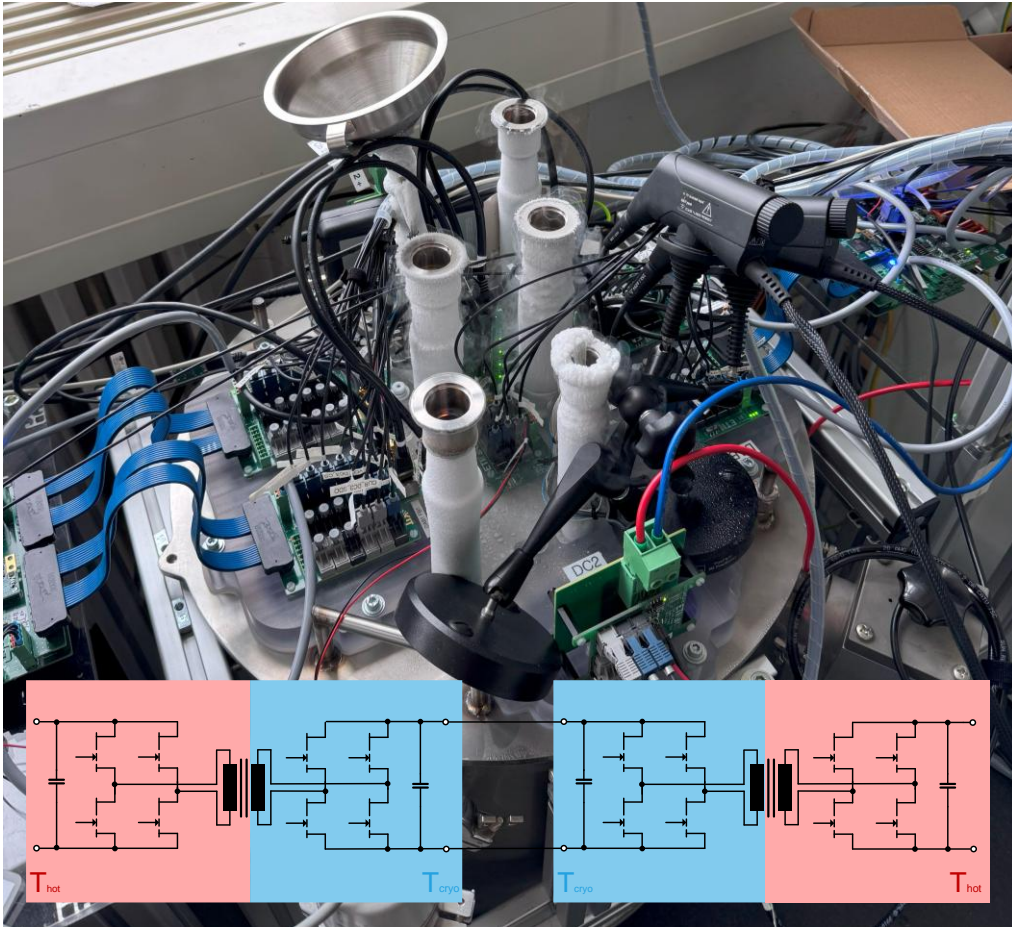
**Abstract**—The rotor of a commercial induction machine is replaced by a non-magnetic, non-metallic cryogenic rotor comprising bars of stacked 2G-HTS tapes without end rings nor joints, but with some back iron. The machine underwent initial functional tests with the rotor cooled by liquid nitrogen, and its operation and working principle were also verified. First, analytical considerations and FEM simulations are used to develop a preliminary approach to explain the machine's operation.

**Index Terms**—Partially superconducting motor, induction machine, jointless rotor, stacked HTS tapes, induced magnetization.

[Submitted to IEEE TAS 12/2025, accepted with minor changes, under review]

STAR-machine (asynchron und synchron)  
Kryo-kalte Leistungselektronik...

# Erste Messungen der kryogenen Leistungselektronik in Vakuum-Umgebung (KIT ETI)



Ein Ergebnis:

- Zwischenkreisspannung von 40 V und Strömen bis 5 A: Wirkungsgradsteigerung im Vergleich zu Raumtemperatur.
- Reduzierter Einschaltwiderstand der GaN-HEMTs auch im Dauerbetrieb.
- Die Leistung konnte in späteren Messungen auf etwa 1.2 kW bei 100 V DC-Spannung erhöht werden.

Kryo-kalt

Raumwarm

Kryogene Leistungselektronik zeigt erhöhten Wirkungsgrad und eliminiert Stromzuführungen (wichtig z.B. für Statorn!).  
Zusammenfassung und Ausblick...

# Zusammenfassung und Ausblick

- **Wasserstoff** unterstützt das Energiesystem
  - Netzdienstleistungen
  - Sektorkopplung
  - Dekarbonisierung
- Die **HIP** bietet **niedrigschwellige Explorationsplattform** (auch für Dritte)
- Anwendungen, die **LH<sub>2</sub>** und **HTS in Kombination** nutzen, sind besonders kompakt und effizient.
- **LH<sub>2</sub>** ist nicht mehr der „Champagner“ der Energiewende, sondern sinnvoll eingesetzt ein „Champion“ der Energiewende.
  
- **HTS** ermöglichen
  - **neuartige Maschinenanwendungen**,
  - ggf. mit **kryo-kalter Leistungselektronik**,
  - ggf. Vermeidung von Stromzuführungen.

Dankeschön.  
Fragen?...

Dankeschön!



Dankeschön.  
Fragen?