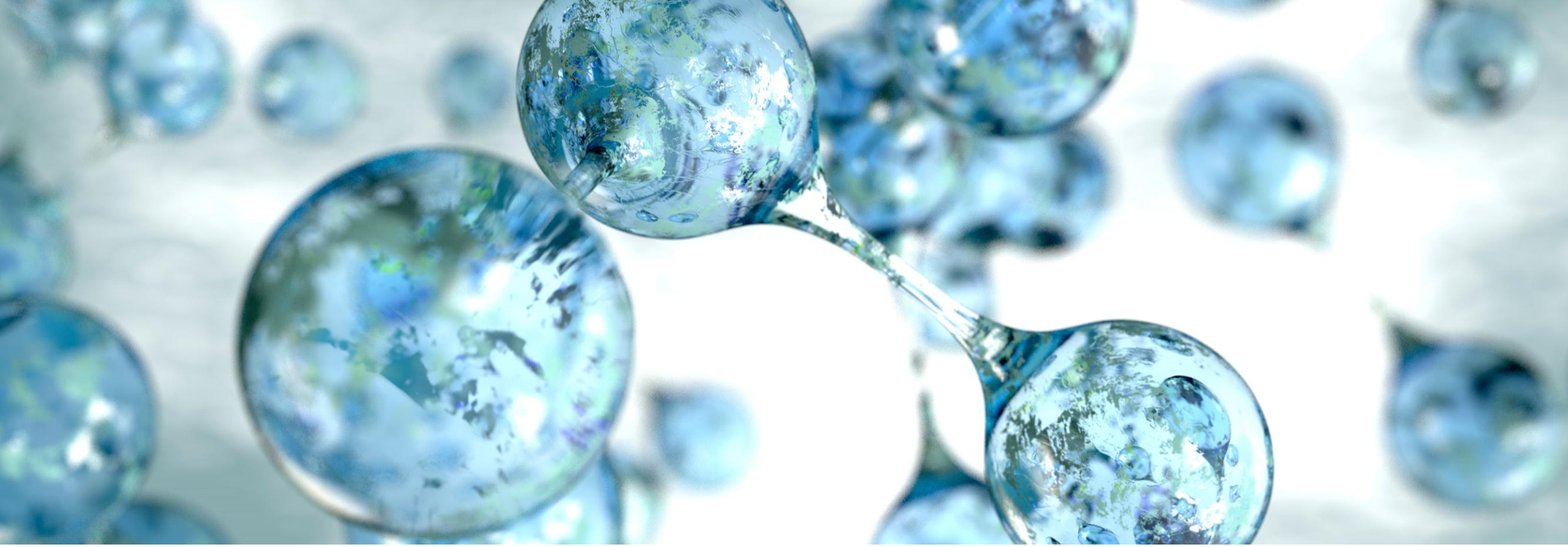


CO_2 neutrale Baumaschine – Ein Technologievergleich

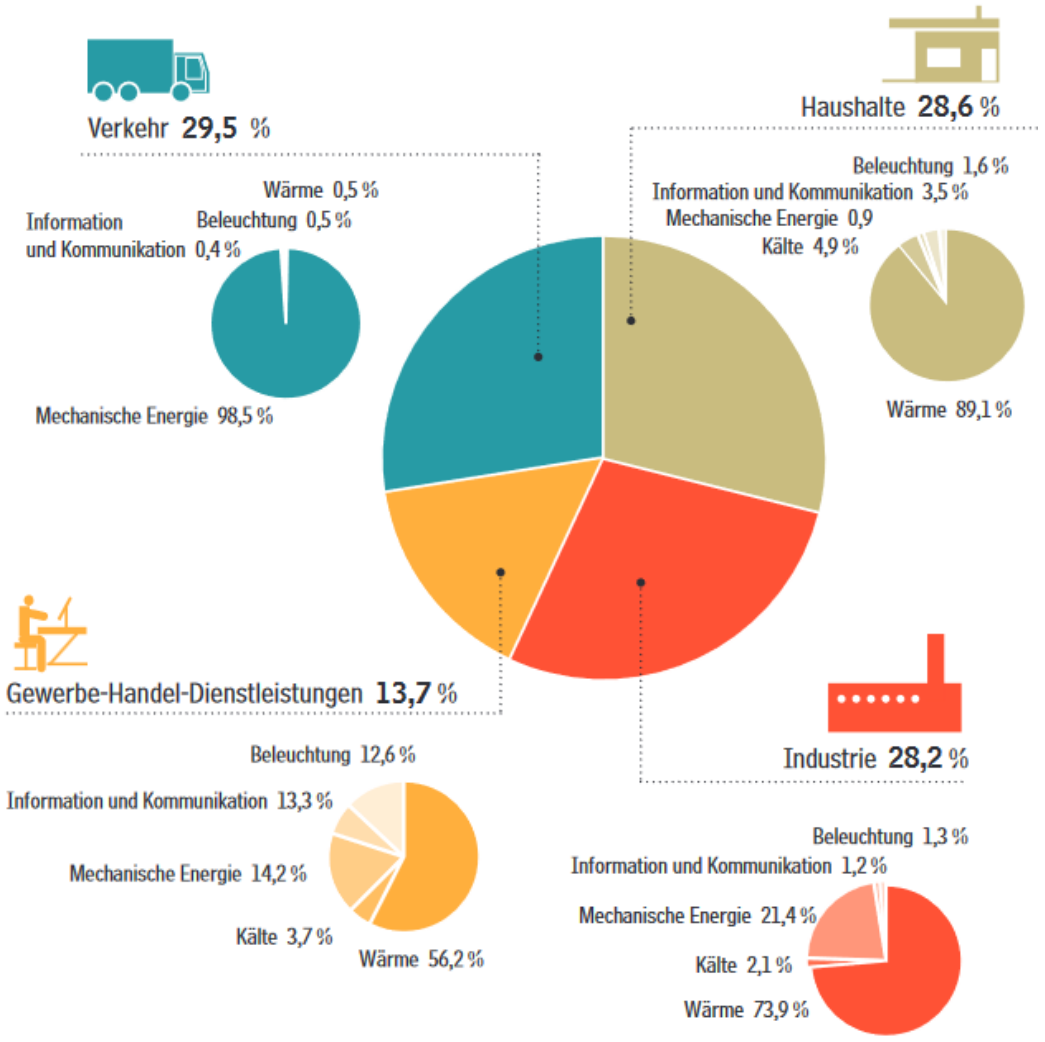
mobile Experience Days 2025

David Coleman

HYDROGEN AND NEW ENERGY SOLUTIONS

Einführung

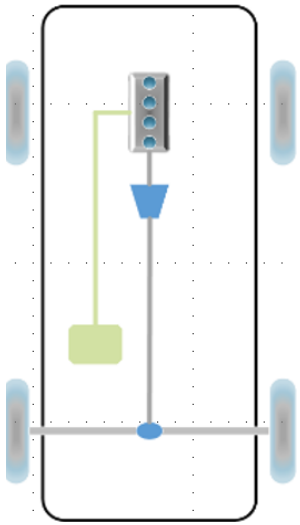
Endenergieverbrauch 2022 in GER nach Sektoren

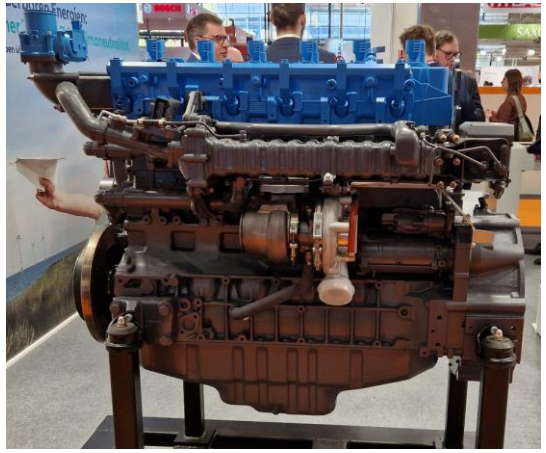


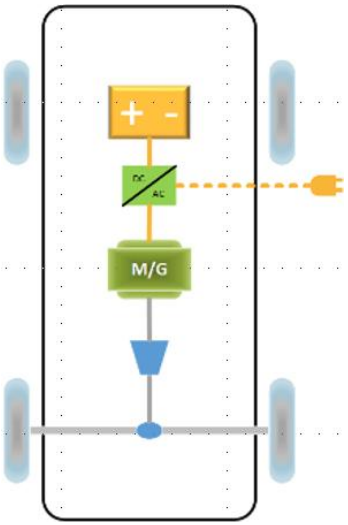
- Verkehrssektor weist mit 29,5% den höchsten Endenergieverbrauch auf
- Ein Großteil des Endenergiebedarfs der Sektoren kann durch Maßnahmen der Suffizienz und Effizienz gemindert werden
- Für schwer bzw. nicht elektrifizierbare Prozesse bedarf es chemischer Energieträger
- Wie aber sieht es bei Arbeitsmaschinen aus?
  - Arbeitsmaschinen und Arbeitsgeräte für die Land- oder Forstwirtschaft (z. B. Mähdrescher)
  - Arbeitsmaschinen für Erdarbeiten und Straßenbau (z. B. Planiermaschine)
  - Sonstige Arbeitsmaschinen (z. B. Mobilkran)

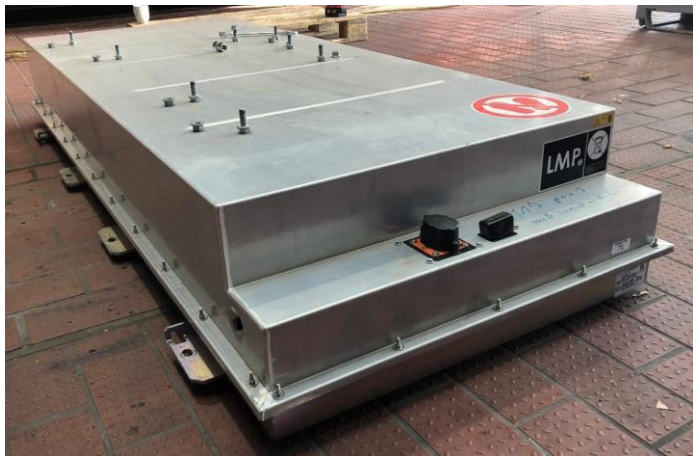
Einführung

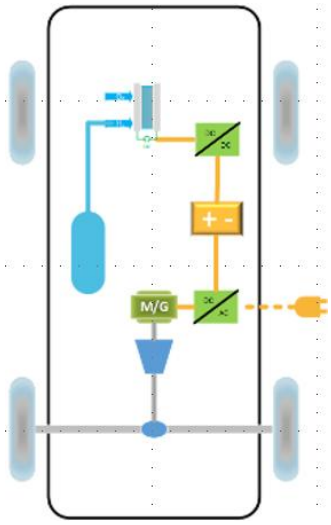
Unterschiedliche Möglichkeiten der Dekarbonisierung







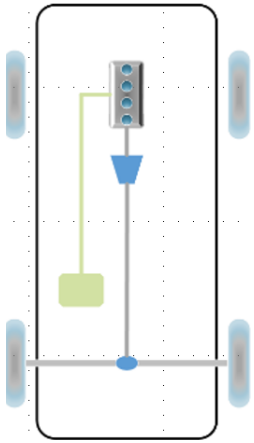


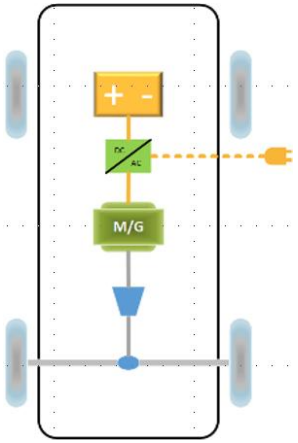


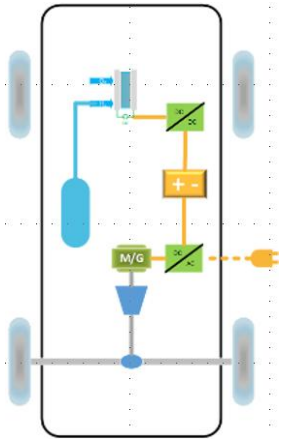


Einführung

Technischer Entwicklungsbedarf



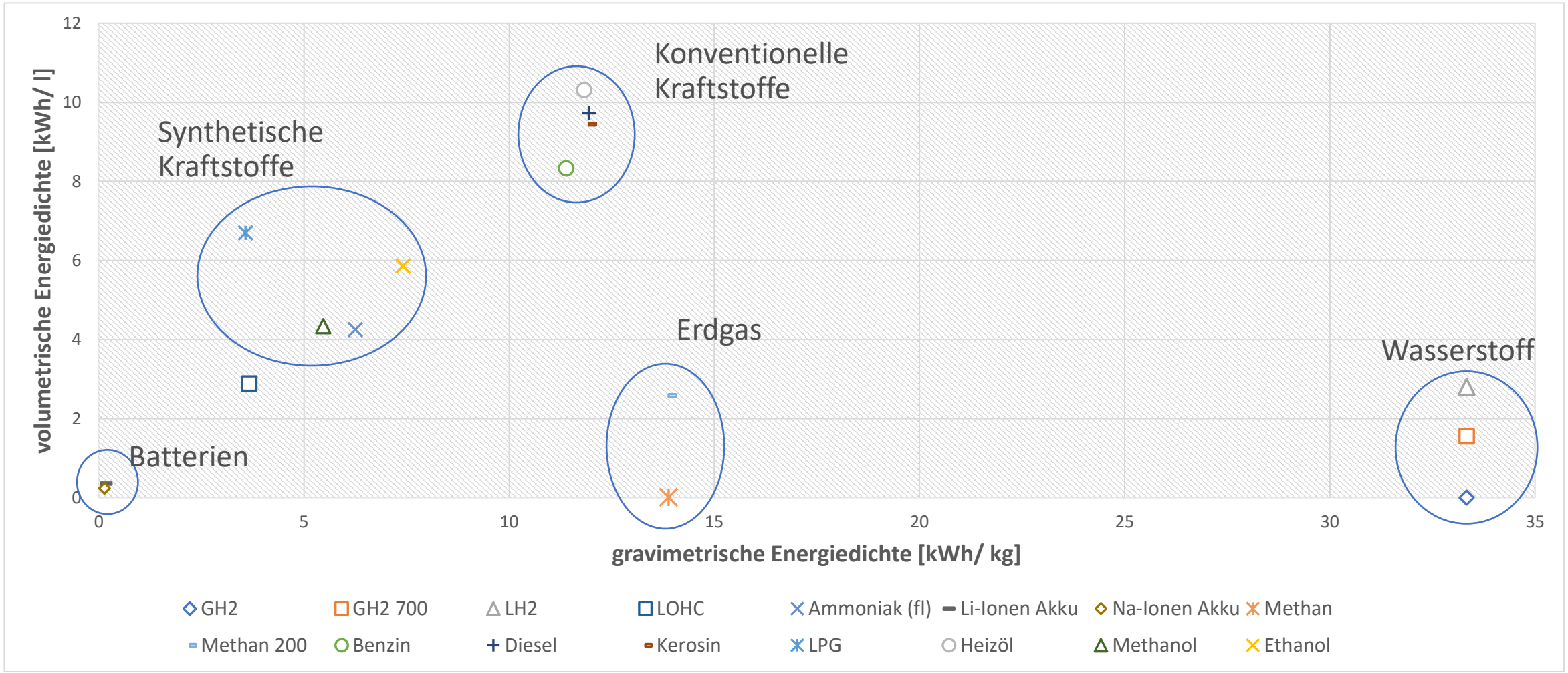




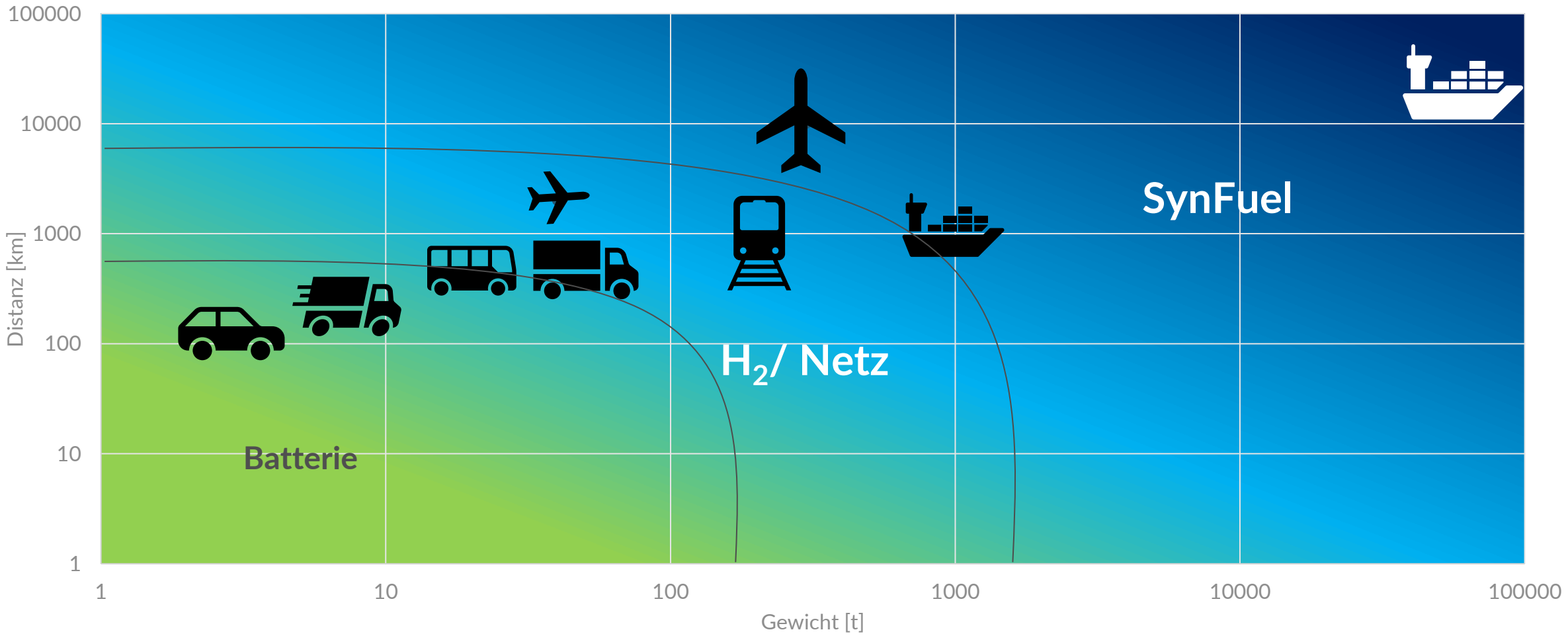
	Verbrenner	BEV	FCEV
Energieversorgung	Primärenergieproduktion Kraftstoffproduktion	Primärenergieproduktion Energietransport	Primärenergieproduktion Kraftstoffproduktion
Infrastruktur	Produktangebot	Energieverteilung Konduktiv statische Schnittstelle (300 – 1.000 kW)	Tankstellenart Tankstellengröße Tankstellenmenge
Energieträger/ -Speicher	Synthetische Kraftstoffe (H2, SynFuels) Biogene Kraftstoffe (HVO, CNG, LNG)	Batteriezellchemie Kritische Rohstoffe	GH2 350, GH2 700, LH2, Methanol, Ammoniak
Energiewandler	Verbrennungskraftmaschine		PEMFC, DMFC

Einführung

Ragone Diagramm gängiger Energieträger und Speicher



Einführung


100000
10000
1000
100
10
1
Distanz [km]
1
10
100
1000
10000
100000
Gewicht [t]
Batterie
H2/ Netz
SynFuel

Ziele

Teilprojekt Technologievergleich

Vorauswahl von geeigneten Energieträgen und Technologien für den CO_2-neutralen Antrieb von Baumaschinen

- auf der Grundlage vorhandener Daten und einfacher Modellszenarien
- ohne neue Messungen oder Versuche

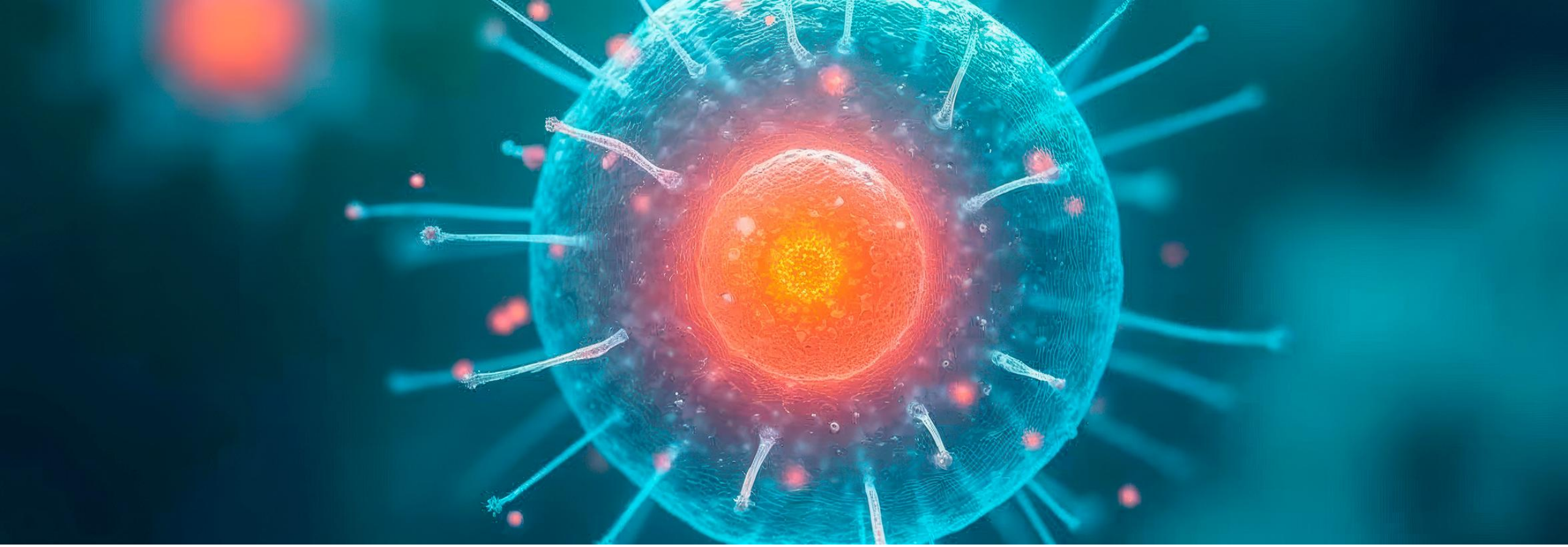
Vorauswahl geeigneter Energieträger und Technologien

- Basis: vorhandene Daten und Modellszenarien
- Fokus: Spezialtiefbaumaschinen, Baumaschinen

Inhalt

Teilprojekt Technologievergleich

- Unterschiedliche Energieträger bzw. Technologien untersuchen, beschreiben und vergleichen, z. B.
  - Wasserstoff (GH_2, LH_2)
  - Wasserstoff-Träger (LOHC)
  - Wasserstoff-Derivate (Methanol, Ammoniak, Synthetische Kraftstoffe)
  - biogene Kraftstoffe (HVO-Diesel)
- insbesondere folgende Aspekte zur Bewertung berücksichtigen:
  - Handhabung, Lagerung und Transport
  - Kosten und Verfügbarkeit der Energieträger (insbesondere Deutschland, Europa, USA)
  - CO_2-Neutralität
  - rechtliche Rahmenbedingungen (Gesundheits-, Umweltauflagen)
  - Technische Reife und Marktreife



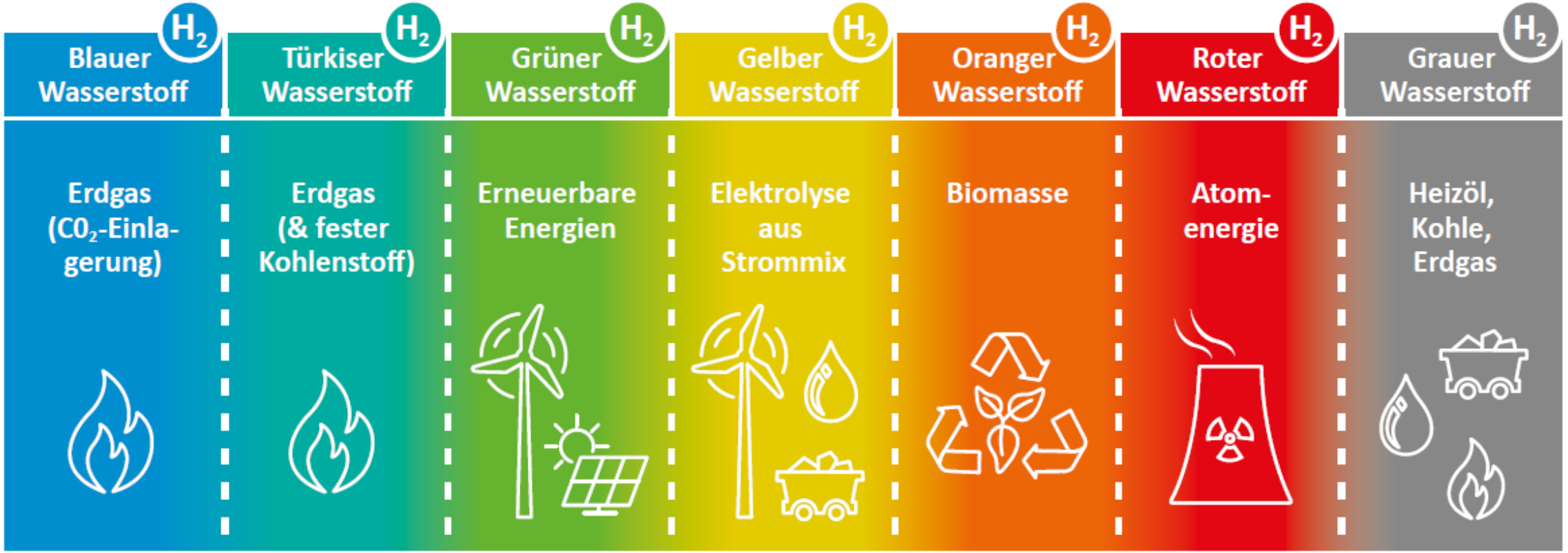
Energieträger

Stand der Technik und Marktumfeld

hynes
HYDROGEN AND NEW ENERGY SOLUTIONS

Energieträger

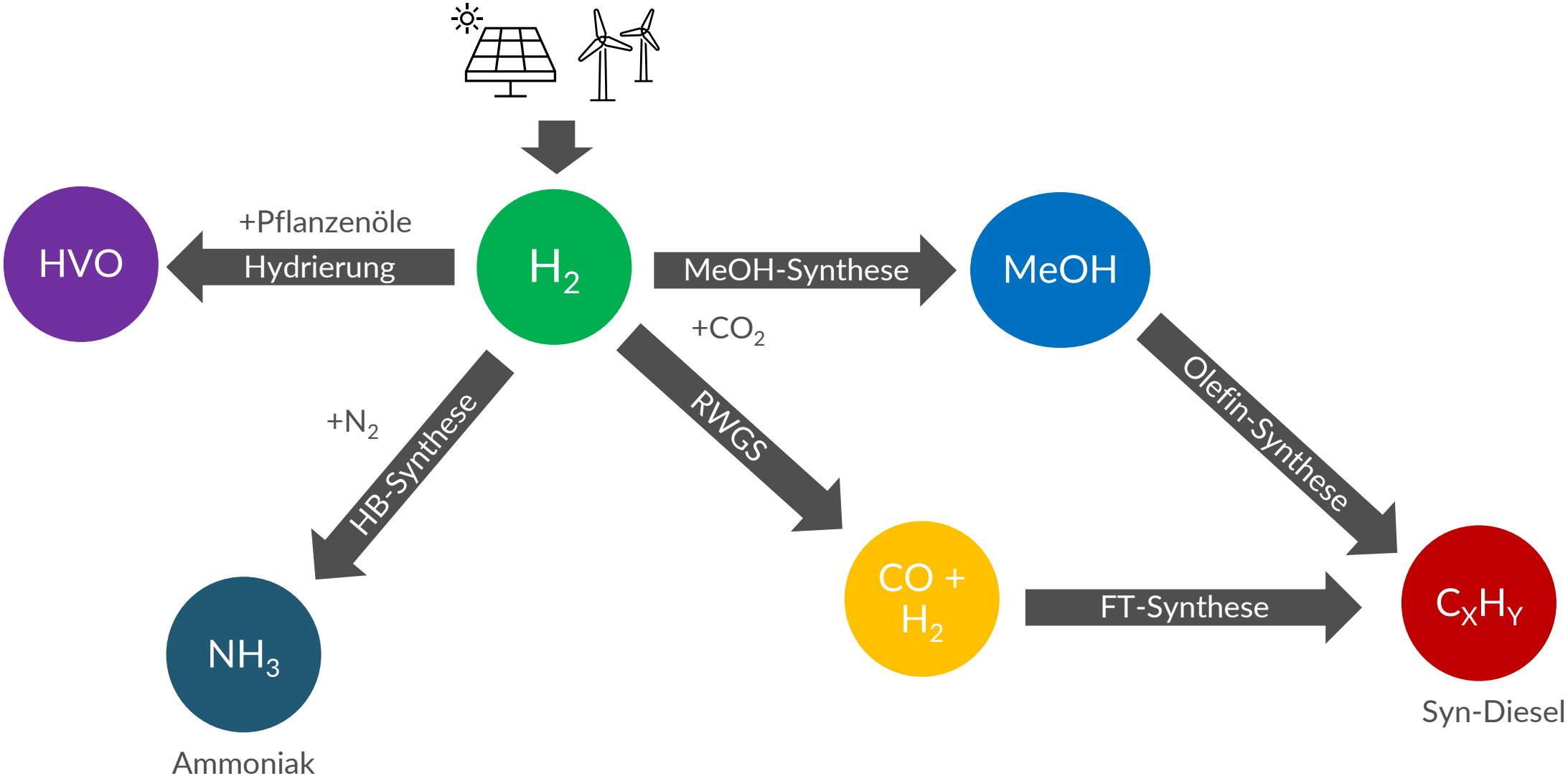
Der Wasserstoffregenbogen



Quelle: Scheppat, Coleman, Werner 2022; Wasserstoff als Energiequelle der Zukunft – Grundlagen, Konzepte und mögliche Anwendungsbereiche; FERI Cognitive Finance Institute

Energieträger

Etablierung neuer Kraftstoffwertschöpfungsketten



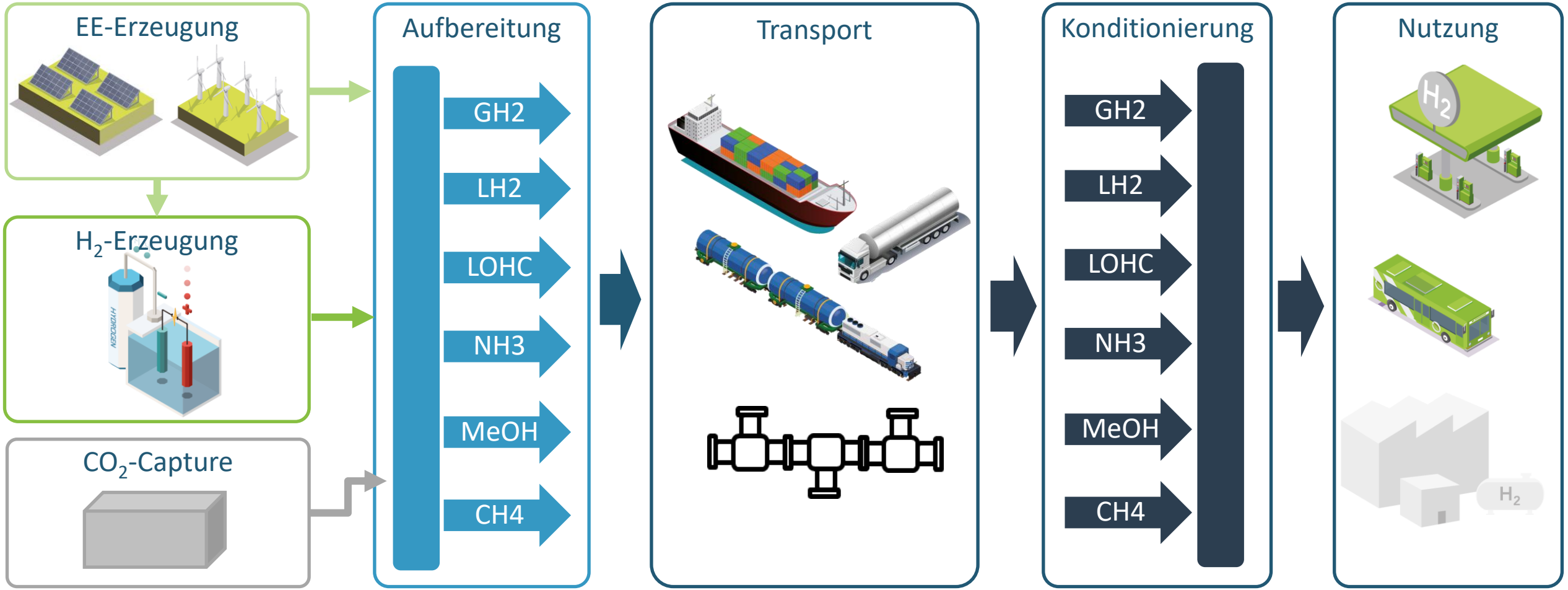
Energieträger

Wertschöpfungskette

		Umwandlung	Prozess
GH_2	Druckwasserstoff	Komprimierung auf bis zu 1.000 bar	Verdichtung
LH_2	Flüssiger Wasserstoff	Verflüssigung bei -253°C	Verflüssigung
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier	Bindung des H_2 an das LOHC als Trägerstoff	Hydrierung
NH_3	Ammoniak	Herstellung von Ammoniak aus Stickstoff und Wasserstoff mit anschließender Verflüssigung	Haber-Bosch-Synthese
MeOH	Methanol	Herstellung von Methanol aus H_2 und CO_2	Methanol-Synthese
SynFuel	Synthetische Kraftstoffe	Herstellung eines Kohlenwasserstoffgemischs aus H_2 und CO_2 mit anschließender Raffinierung	Fischer-Tropsch-Synthese
HVO	Hydrotreated Vegetable Oils	Hydrierung von Biomasse mittels Wasserstoff zu paraffinischen Kraftstoffen	Hydrierung

Energieträger

Etablierung neuer Kraftstoffwertschöpfungsketten





Technologiebewertung

Stand der Technik und Marktumfeld

Nutzwertanalyse

Annahmen der Technologiebewertung

GH2

- Zentrale Versorgungseinheit mit gasförmigem H2
- On-site Lagerung gasförmig unter Druck
- Betankung durch Versorgungsfahrzeug
- Speicherung in Drucktanks (350 bar)
- PEM-Brennstoffzelle als Energiewandler

LH2

- Zentrale Versorgungseinheit mit flüssigem H2
- Bereitstellung durch Verdampfer und Komprimierung (500 bar)
- Speicherung in Drucktanks (350 bar)
- Keine fahrzeugseitige Speicherung von LH2
- PEM-Brennstoffzelle als Energiewandler

LOHC

- Zentrale Versorgungseinheit mit hydriertem LOHC
- Reaktor zur Dehydrierung und Verdichtung (bis 500 bar)
- Speicherung in Drucktanks (350 bar)
- Keine fahrzeugseitige Speicherung von LOHC
- PEM-Brennstoffzelle als Energiewandler

NH3

- Zentrale Versorgungseinheit mit NH3
- Versorgung der Fahrzeuge mit NH3 und Dieselkraftstoff
- Dual-fuel Verbrennungskraftmaschine

MeOH, Syn-Diesel & HVO

- Versorgung durch handelsübliche Tankwagen

Nutzwertanalyse

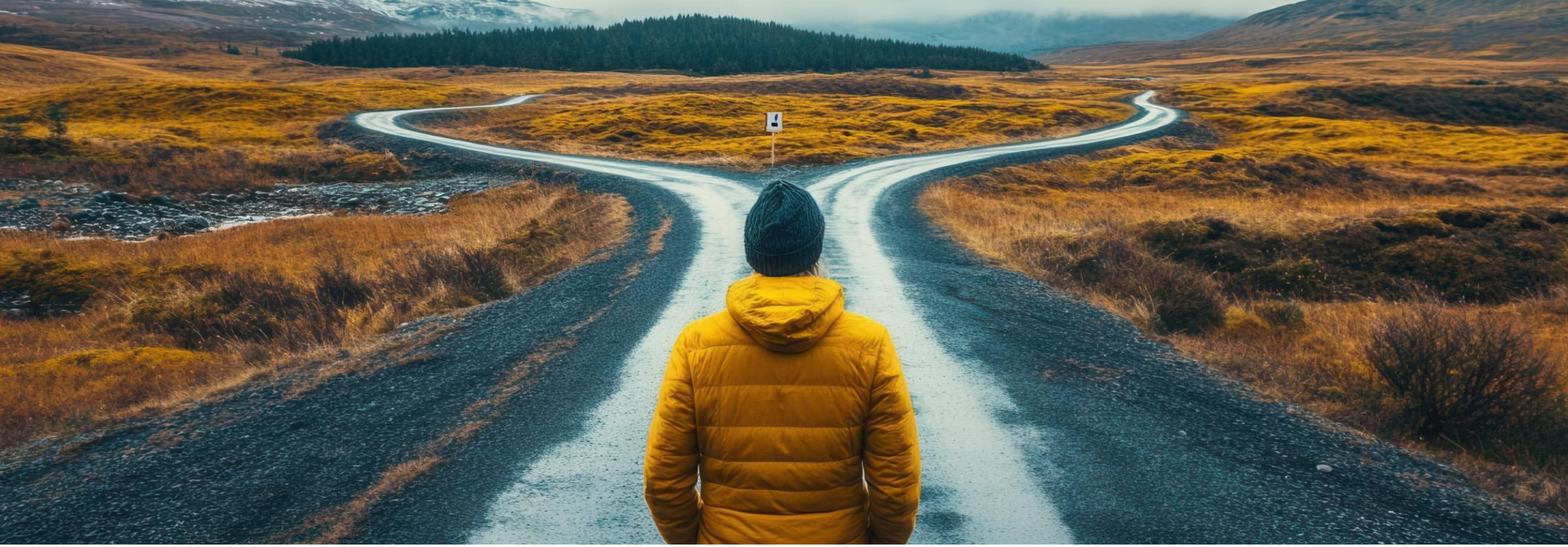
Kriterienkatalog und Ergebnisse (Auszug) des Status Quo

Kategorie	Kriterium	GH2	LH2	LOHC	NH3	MeOH	Syn-Diesel	HVO	Strom
Handhabung	Personeller Aufwand	3	2	2	3	4	5	5	2
	Betrieblicher Aufwand	2	2	2	3	4	5	5	1
	Technische Anforderungen an die								
Lagerung und Transport	Infrastruktur	2	1	1	3	4	5	5	1
	Betriebliche Anforderungen an die Infrastruktur	2	1	1	3	3	5	5	2
Kosten	Fahrzeugmehrkosten	2	2	2	3	4	5	5	3
	Bereitstellungskosten des Energieträgers	3	2	2	1	1	1	4	5
	Investitions- und Betriebskosten für Energieversorgung	2	1	1	3	3	5	5	3
Effizienz	Well-to-Tank	3	2	2	2	1	1	2	5
	Tank-to-Wheel	3	3	3	1	1	1	1	5
THG-Emissionen	Well-to-Tank	4	3	3	3	2	2	2	4
	Tank-to-Wheel	5	5	5	5	2	1	1	5
Gefahren	Physikalische Gefahren	3	3	5	3	4	5	5	3
	Gesundheitsgefahren	5	5	4	4	4	4	5	5
	Umweltgefahren	5	5	1	1	5	2	5	5
	Verbrennungsprodukte	5	5	5	2	2	1	1	5
Rechtliche Rahmenbedingungen	Aufwand für Einhaltung von Arbeitsschutz und Sicherheitsvorschriften	3	1	3	2	3	3	3	2
	Aufwand für Einhaltung von Umweltvorschriften	5	5	2	2	4	2	4	5
Technische Reife (TR)	TR der supply chain	3	1	1	3	3	3	3	4

Nutzwertanalyse

Kriterienkatalog und Ergebnisse (Auszug) des Status Quo

Kategorie	Kriterium	GH2	LH2	LOHC	NH3	MeOH	Syn-Diesel	HVO	Strom
	TR des Energieversorgungseinrichtung (Energieverteilung)	3	2	2	2	4	5	5	3
	TR des fahrzeugseitigen Energiespeichers	3	3	3	3	5	5	5	4
	TR des fahrzeugseitigen Energiewandlers	4	4	4	2	2	5	5	5
Marktreife	Marktreife der nationalen supply chain	3	2	1	2	2	1	3	4
	Marktreife der europäischen supply chain	3	2	1	2	2	1	3	4
	Marktreife der globalen supply chain	2	1	1	2	2	1	3	1
	Marktreife der Energieversorgungseinrichtung (Energieverteilung)	2	1	1	1	2	5	5	2
	Marktreife des fahrzeugseitigen Energiespeichers	4	4	4	2	3	5	5	4
	Marktreife des fahrzeugseitigen Energiewandlers	3	3	3	1	1	5	5	5
Skalierbarkeit	Skalierbarkeit in der Energieversorgung	3	2	2	1	1	1	2	1
	Skalierbarkeit in der Energieverteilung	2	2	1	2	3	5	5	1
	Skalierbarkeit in der fahrzeugseitigen Energiespeicherung	2	2	2	4	4	5	5	1
Synergie mit anderen Nutzern	Nutzbarkeit durch andere Baustellenfahrzeuge	2	2	2	2	1	5	5	4
	Nutzbarkeit der Infrastruktur für andere Akteure	3	3	3	3	3	5	5	1



Zusammenfassung und Fazit

Stand der Technik und Marktumfeld

Zusammenfassung und Fazit

Dekarbonisierung mobiler Arbeitsmaschinen

- **Herausforderung:**
  - Komplexe Transformation erfordert Elektrifizierung, Wasserstoffverbrennungsmotoren, synthetische Kraftstoffe
  - Klimaneutralitätsziele der EU und des Bundes bis 2040: Serienreife Maschinen bis 2030 notwendig
- **Experteninterviews:**
  - Größte Branchenherausforderung: Personalmangel
  - Einigkeit über die Notwendigkeit alternativer Antriebe wegen Treibhausgasemissionen
  - Hoher Stellenwert des Verbrennungsmotors; elektrifizierte Wasserstoffkonzepte werden betrachtet
  - Fokus auf Effizienzsteigerung; klare Tendenz zu elektrifizierten Antriebskonzepten fehlt
- **Nutzwertanalyse:**
  - "Dieselnahe" Konzepte kurzfristig einfacher umsetzbar als elektrische oder wasserstoffbasierte
  - Flüssige Kohlenwasserstoffe (HVO, Synthetischer Diesel) vorteilhaft in Handhabung, Lagerung, Transport, Marktreife
  - Nachteile: Geringe lokale Emissionseinsparungen und hohe Kosten bei niedriger Marktreife
- **Prognose bis 2035:**
  - Verschiebung zu elektrifizierten Antriebskonzepten; technische und normative Herausforderungen müssen gelöst werden



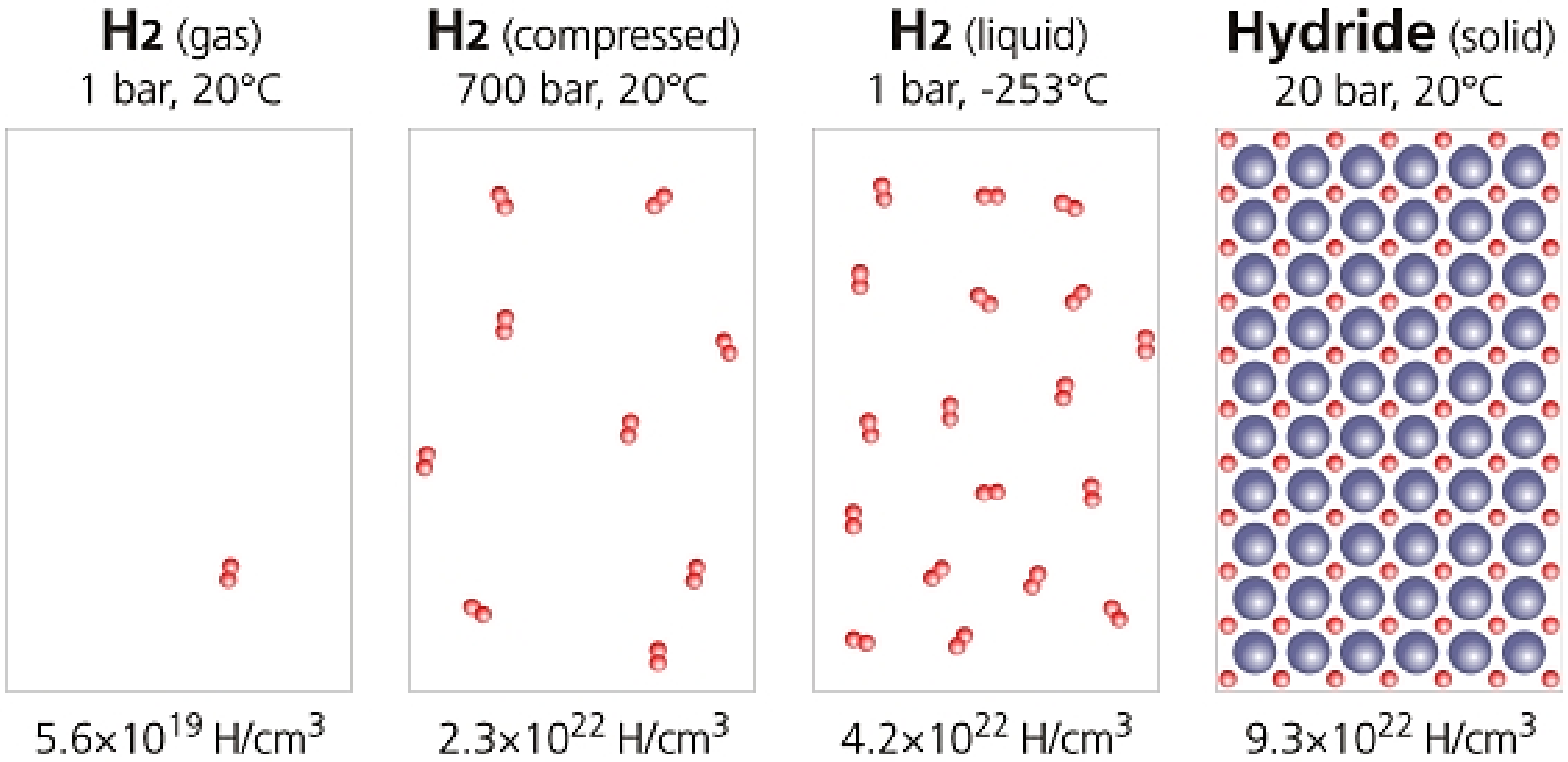
H_2-Speichersysteme

Metallhydrid für Baumaschinen

hynes
HYDROGEN AND NEW ENERGY SOLUTIONS

Wasserstoffspeicherung

Volumetrische Energiedichte



Quelle: *Fraunhofer IFAM*

Anwendungen für Metallhydridspeicher



John Deere Gator utility vehicle modified by Westinghouse Savannah River Co. and Energy Partners [1].



LiteFCBike von Fraunhofer ISE [3]



Crown FC 4020-50 forklift 48 V [5]



[6]



[7]



Die Alsterwasser - Brennstoffzellenschiff [2].



U-Boot der 212A-Klasse [4]



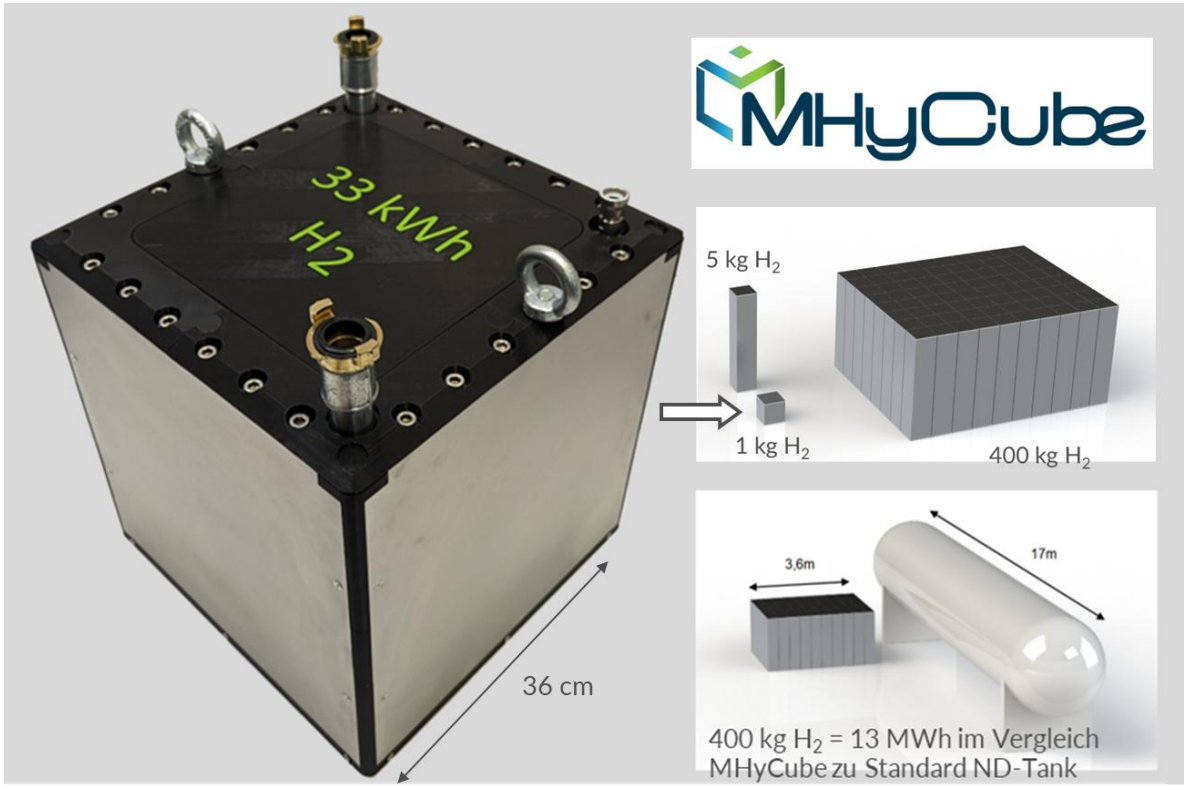
[8]

[1] *T. Motyka, W.A. Summers, and L.K. Heung, "Industrial Fuel-Cell Vehicles with Metal Hydride Storage," in Proc. 11th Canadian Hydrogen Conf. (1999);*
[2] *www.hzwei.de;* [3] *Fraunhofer ISE;* [4] *Bundeswehr;* [5] *Sandia National Labratories;* [6-8] *www.horizoneducational.com*

MHyCube – Next Level Hydrogen Storage

Innovativer Metallhydrid-Niederdruckspeicher für H_2

- MHyCube
  - einfacher, robuster und flexibel skalierbarer Metallhydrid-Niederdruckspeicher für H_2
- USP
  - 10-fach höhere H_2-Speicherkapazität als vergleichbare Niederdruckspeicher
  - sichere Speicherung großer Mengen H_2 auf kleinen Raum
  - Wegfall der temporären, aufwändigen Hochdruckspeicherung
  - nahezu 100% Wiederverwertbarkeit des Speichermaterials
- Anwendungsfälle
  - Baumaschinen: Dual-Use H2-Speicher - Counterweight
  - Energieversorgung: saisonale H_2-Speicherung von autarken Quartieren und Gebäuden
  - H_2-Erzeugung: flächenoptimierte H_2-Pufferspeicher zwischen Elektrolyse und Verwertung



Kontakt:

- Uwe.Trautmannsheimer@hs-rm.de
- Matthias.Werner@hs-rm.de
- David.Coleman@hynes.eu

Hochschule **RheinMain**

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit



https://hynes.eu/

Postadresse:

Alex.-v.-Engelberg-Str. 12
65203 Wiesbaden

Besucheradresse:

Am Brückweg 26
65428 Rüsselsheim

24