

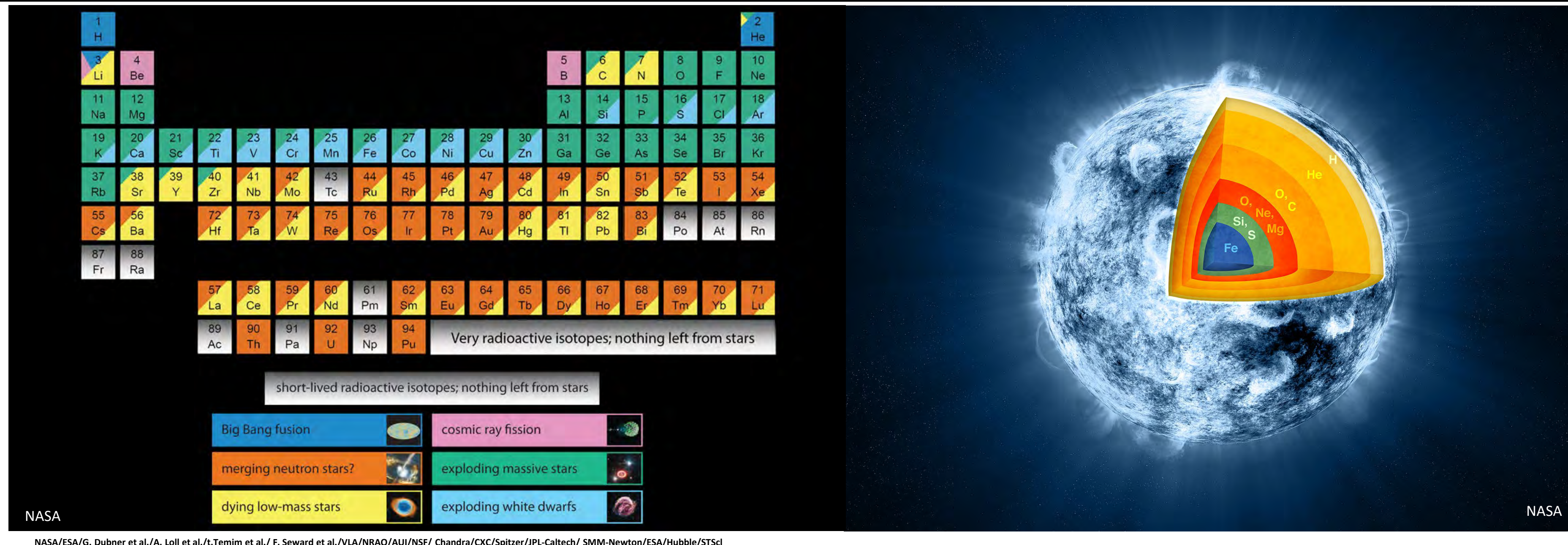
Im Fokus: Sicherheit

Grundlagenverständnis und Vorteile von H₂ im Vergleich zu anderen Energieträgern

Dipl.-Ing. Christian Machens
Geschäftsführer

Allgemeinwissen / Historie

H₂ im Universum



- Ca. 75% aller Atome im Universum sind Wasserstoff-Atome
- Die großen Gasplaneten (Jupiter, Saturn) haben einen Kern aus metallischem Wasserstoff (supraleitend, magnetisch)
- Alle Wasserstoff-Atome sind in der ersten 0,5s des Urknalls entstanden. Danach Helium und Lithium. Alle anderen Elemente erst Milliarden Jahre später
- In unserer Sonne reagieren jede Sekunde ca. 600 Mio. Tonnen Wasserstoff zu Helium (Kernfusion)

Anwendungen in Vergangenheit und Gegenwart

Vergangene Anwendungen H₂ im Stadtgas

Stadtgas

- ab Mitte des 19. Jh. weitverbreitetes, aus Kohlevergasung gewonnenes Brenngas
- Beleuchtung von Wohnungen und Straßenlaternen, Einsatz bei Gasherden und Durchlauferhitzern
- in der zweiten Hälfte des 20. Jh. durch Erdgas ersetzt
- Zusammensetzung:
 - abhängig von verschiedenen Parametern; von Hersteller zu Hersteller verschieden
 - Zusammensetzung ehemalige Wiener Gaswerk Simmering:

Wasserstoff H₂ (51 %)

Methan CH₄ (21 %)

Stickstoff N₂ (15 %)

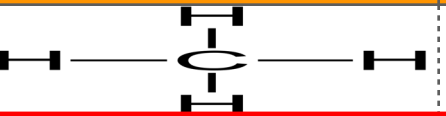
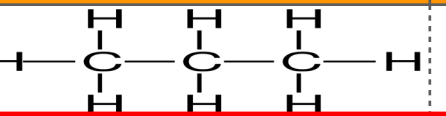
Kohlenmonoxid CO (9 %)



Gasometer in Wien

Physikalische Eigenschaften

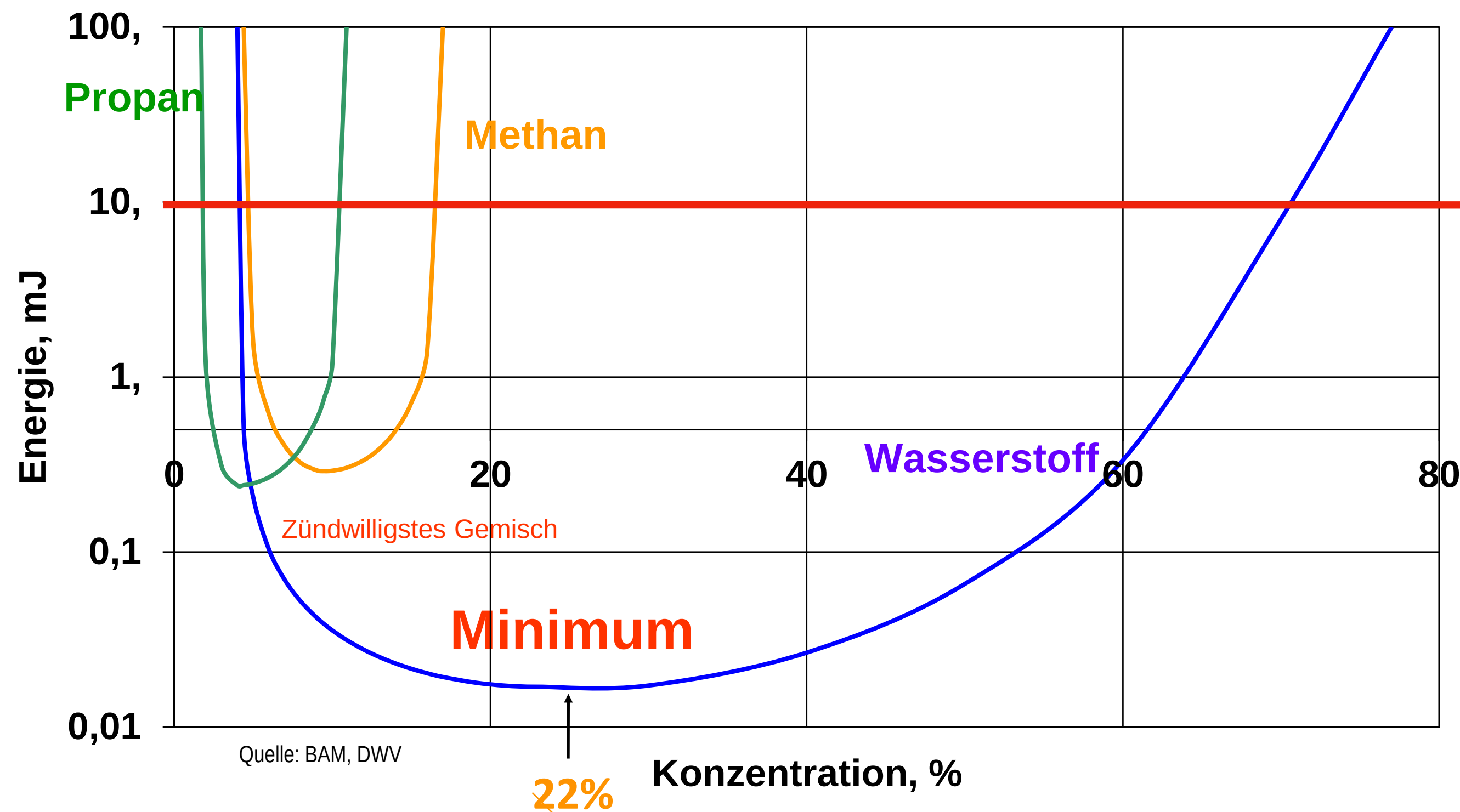
Explosionsschutzrelevante Eigenschaften (in Luft)

Formel		H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈	C ₇ H ₁₆	C ₁₀ H ₂₂
Name	Einheit	Wasserstoff	Methan	Propan	Benzin*	Diesel*
Strukturformel						
Untere Zündgrenze UZG	Vol.-%	4,0	4,4	1,7	1,1	0,7
Unterer Detonationsgrenze UDG	Vol.-%	18,3	6,3	2,2		
Stöchiometrisches Gemisch	Vol.-%	22	9,5	4,0	1,9	1,3
Obere Detonationsgrenze ODG	Vol.-%	59,0	13,5	9,2		
Obere Zündgrenze OZG	Vol.-%	75	17,0	10,9	6,7	5,4
Zündenergie (min.)	mJ	0,016	0,290	0,240	0,24	
Explosionsgruppe (IEC60079)		IIC	IIA	IIA	IIA	IIA
Selbstzündungstemperatur	°C	560	595	470	215	205
Flammentemperatur	°C	2065	1970	1925	1026	2104
Strahlungsintensität	%	30		90		100
Laminare Brenngeschwindigkeit	m/s	3,4	0,35	0,45	0,46	
Schallgeschwindigkeit	m/s	1280	466			
Normspaltweite (Löschspaltweite)	cm	0,06	>0,9	>0,9	>0,9	>0,9
Explosionskraft	kgTNT/m ³	2	7	20		
Sauerstoffgrenzkonzentration	Vol.-%	4,3	9,9	9,8	9,3	
Diffusionsgeschwindigkeit	cm/s	0,69	0,22	0,1	0,04	

*: Heptan und Dekan sind als Stoffe ausgewählt worden, das diese dem Benzin bzw. Diesel in ihren Eigenschaften ähnlich sind

Chemische Eigenschaften

Mindestzündenergie



Der typische Wert für die gespeicherte Energie in einer Person beträgt 10 mJ und der höchste zu erwartende Wert 15 mJ.

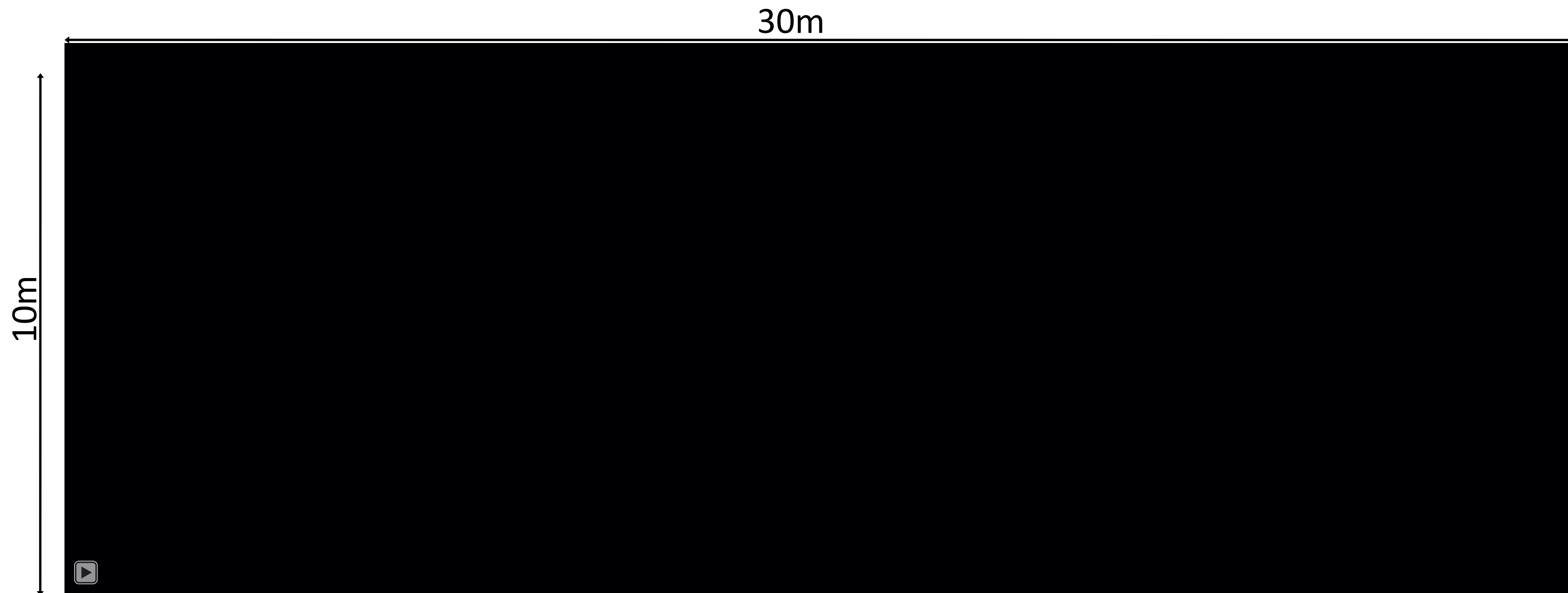
Quelle: BG RCI T033 „Elektrostatik“

Brennbare Substanzen (Stoffgemische)

- MZE > 10 mJ als **normal** zündempfindlich
- 10 mJ > MZE > 3 mJ als **besonders** zündempfindlich
- MZE < 3 mJ als **extrem** zündempfindlich

Physikalische Eigenschaften

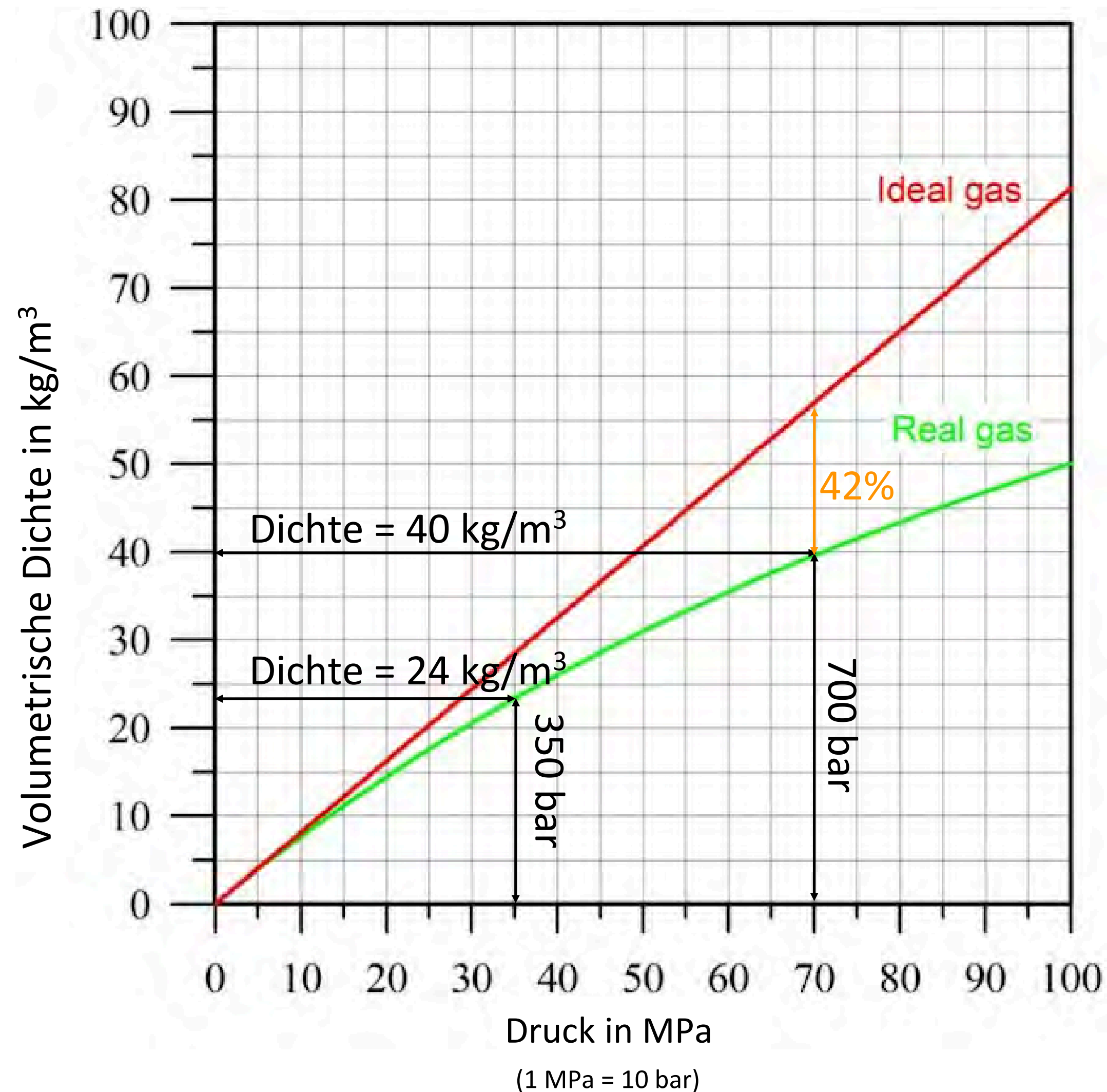
Thermodynamische Eigenschaften: Auftrieb in Luft



Die Simulation zeigt, dass Wasserstoff recht schnell aufsteigt und sich unter der Decke verteilt.
Durch das geöffnete Rollltor (rechts) strömt frische Luft nach.
Es ist auch zu beobachten, daß sich ein stabiler Zustand einstellt, da über die Entlüftung laufend Atmosphäre aus dem Raum entfernt wird.
Simulationsdauer: 1 Minute (läuft hier in doppelter Geschwindigkeit ab!)

Physikalische Eigenschaften

Thermodynamische Eigenschaften: Dichte



Vergleicht man das reale Gasgesetz mit dem idealen Gasgesetz, so zeigt sich, dass das ideale Gas eine falsche Vorhersage der Wasserstoffdichte um ca. 18,5% bei 350 bar und ca. 42% bei 700 bar macht.

Farbe von H₂ als Gas: Farblos, transparent

Farbe der H₂-Flamme: In sauberer Atmosphäre farblos und transparent.

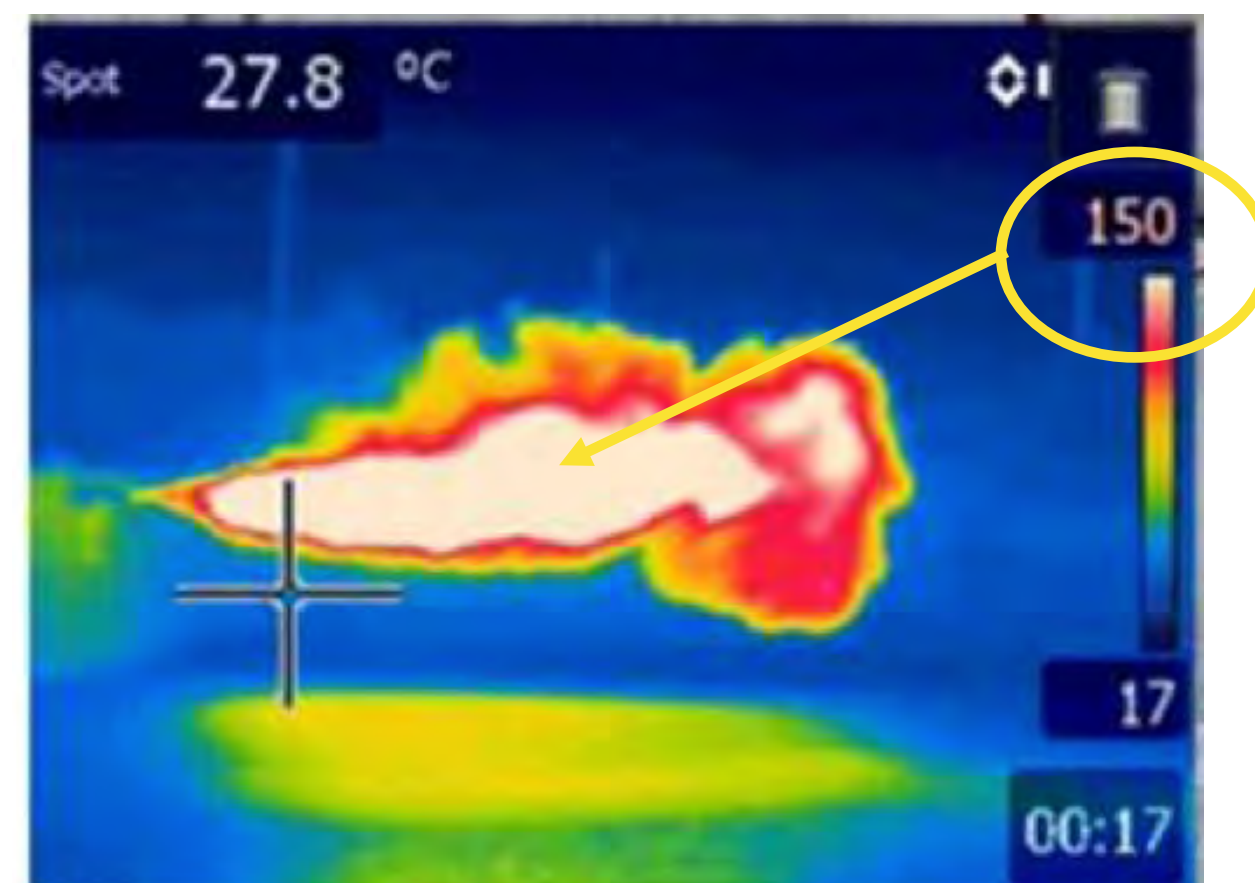
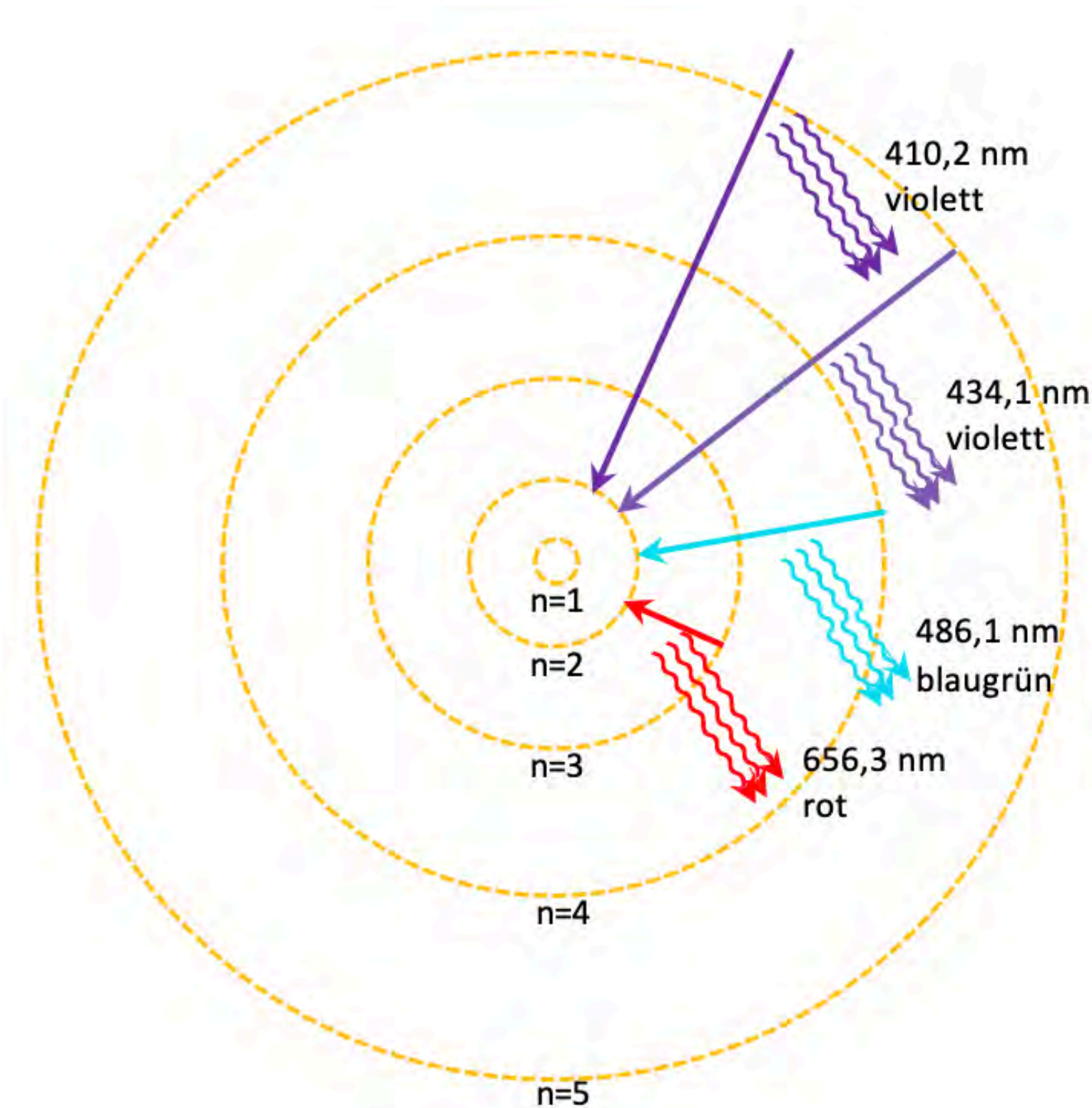
Wasserstoff-Absorptionsspektrum



Wasserstoff-Emissionsspektrum



Wasserstoff Alpha-Linie
Übergang von n=3 zu n=2



Von H₂ emittierte Strahlung ist mit $\epsilon < 0,3$ sehr gering.
Bei Kohlenwasserstoffen liegt diese etwa bei $\epsilon \approx 1$.

Quelle: Sandia National Laboratory

ϵ - Emissionsgrad

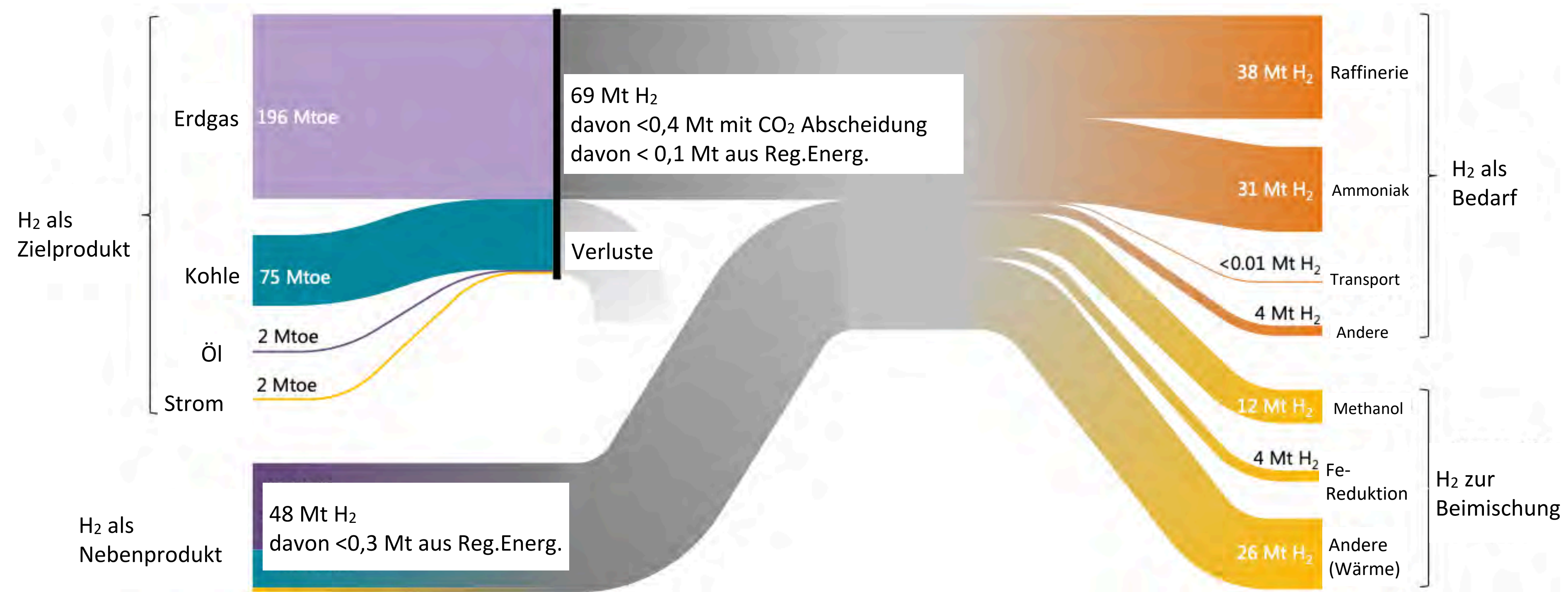
Anwendungen in Vergangenheit und Gegenwart

Aktuelle Anwendungen von H₂

	Anwendung	Beschreibung
Chemische Industrie (Weltweit)	Ammoniakherstellung (300 Mrd. m ³ /a)	$N_2 + 3H_2 = 2NH_3$
	Raffinerien, Entschwefelung (300 Mrd. m ³ /a)	$H_2 + S = H_2S$
	Methanolherstellung (40 Mrd m ³ /a)	$CO_2 + 3H_2 = CH_3OH + H_2O$
Mikrochipherstellung	Halbleiterproduktion	H ₂ zum Dotieren und als Schutzatmosphäre
Kraftwerke	Kühlung von Generatoren	H ₂ hat hohen C _p Wert
Glasindustrie	H ₂ -O ₂ Flamme, Schmelzen von Quarzglas	Hohe Temperatur und Reinheit
Schmuckherstellung	H ₂ -O ₂ Flamme, Schmelzen von Metallen	Hohe Temperatur und Reinheit
Metallproduktion	Reduktion der Oxyde (Mo, W, Co, Ge)	$WO_3 + 3H_2 = W + 3H_2O$
Fetthärtung	Margarineherstellung (Hydrierung)	$R \equiv R \xrightarrow{+ H_2 / \text{Katalysator}} \begin{matrix} R & & R \\ & \backslash & / \\ & C = C \\ & / & \backslash \\ R & & R \end{matrix} + \begin{matrix} R & & R \\ & \backslash & / \\ & C = C \\ & / & \backslash \\ & & R \end{matrix}$
Raumfahrt	Treibstoff und Energieversorgung	$2H_2 + O_2 = 2H_2O$
Gaschromatographie	Flammenionisationsdetektor (FID)	Chemieionisation H ₃ O ⁺ und CHO ⁺ Ionen

Anwendungen in Vergangenheit und Gegenwart

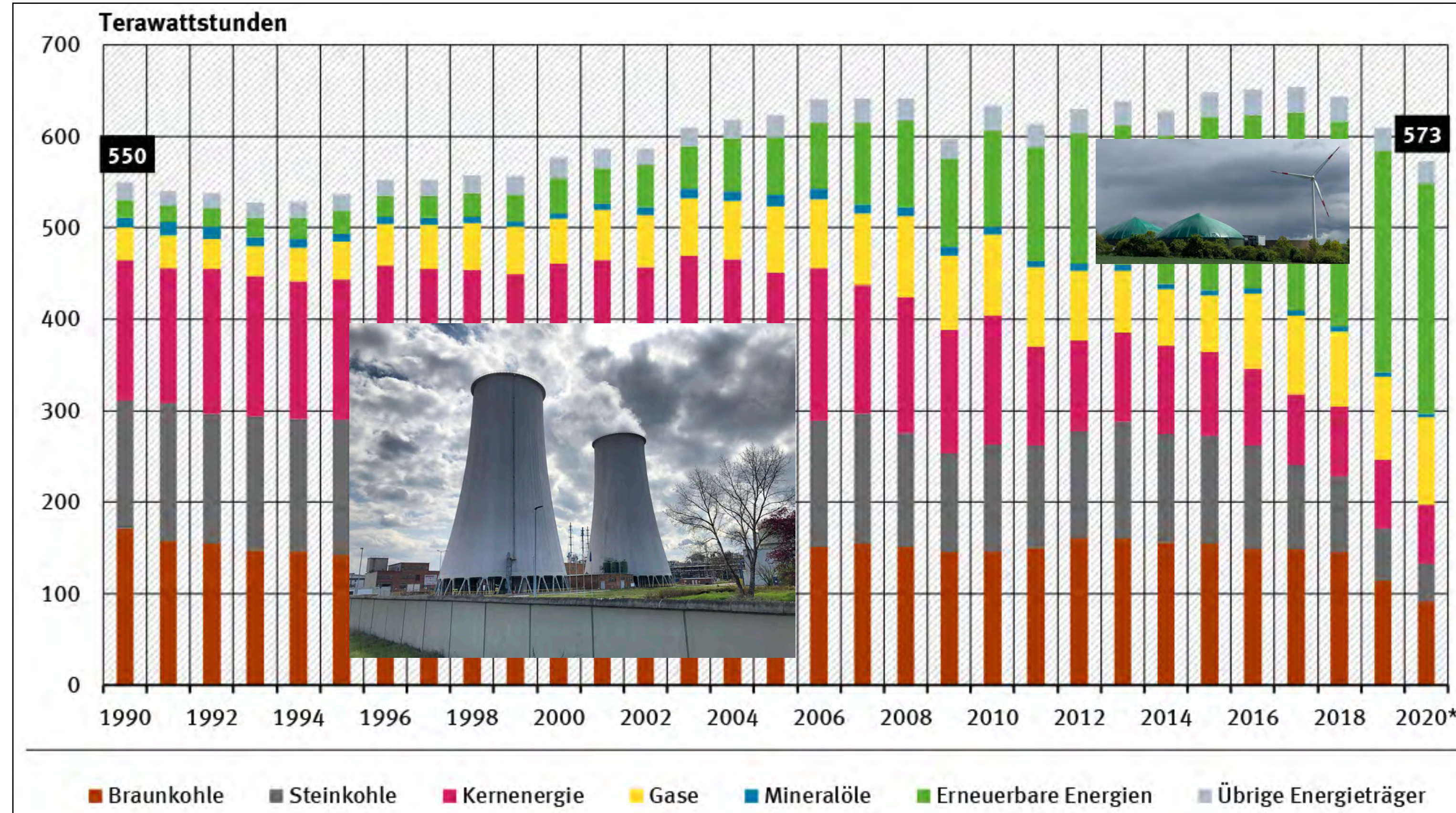
Wasserstoffproduktion und -verbrauch



Wasserstoff-Nachfrage und -Angebot weltweit (Quelle: IEA 2019)

Definitionen der einzelnen Sektoren

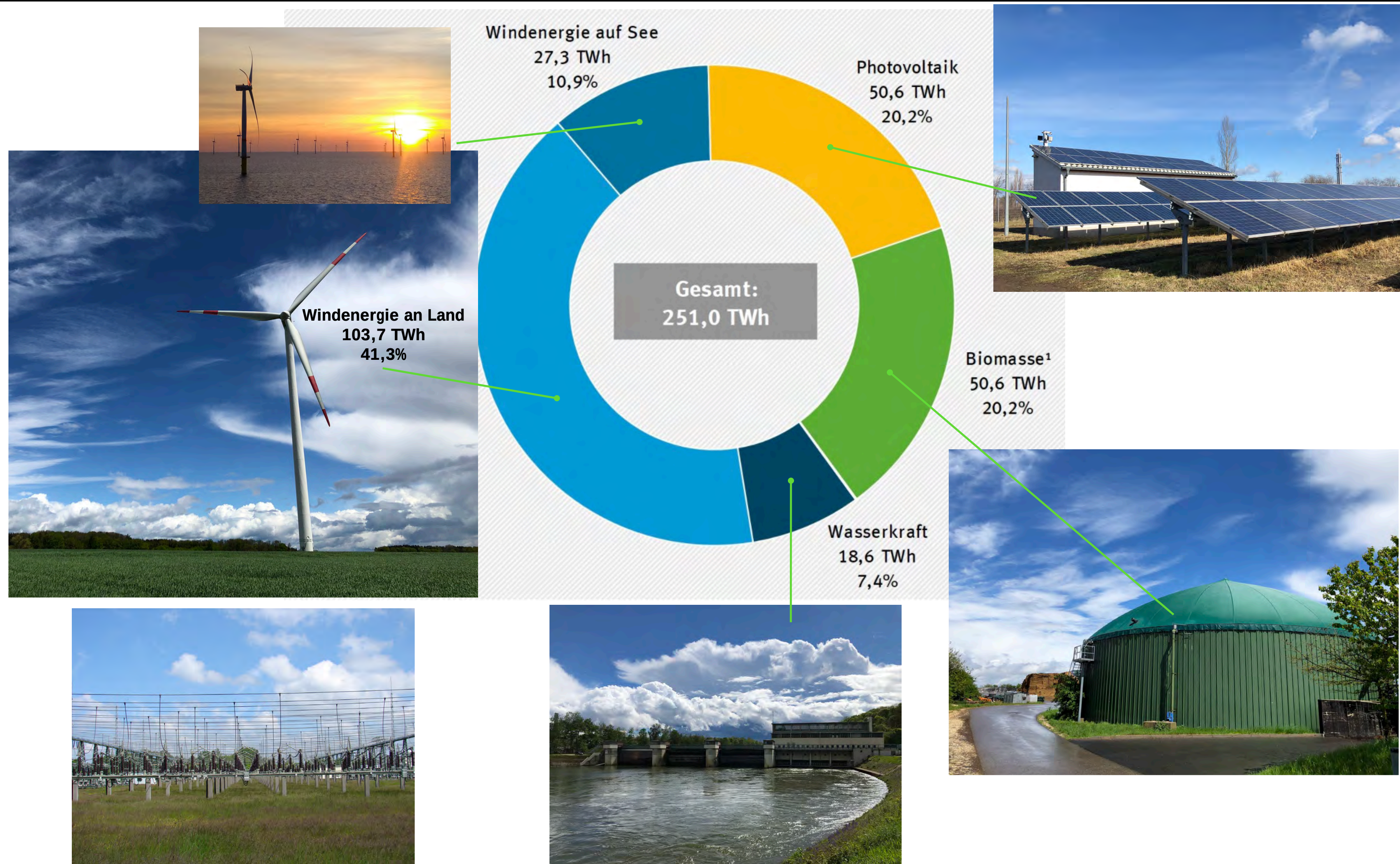
Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern



Der Anteil erneuerbarer Energien (Wasserkraft, Windenergie, [Biomasse](#), biogener Anteil des Abfalls, Photovoltaik, Geothermie) **stieg seit 1990 auf mehr als das 12-fache**, die regenerativ erzeugte Strommenge auf fast das 13-fache. Diese Entwicklung ist besonders auf die Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) zurückzuführen und hat ganz wesentlich zum Rückgang der fossilen Bruttostromerzeugung beigetragen.

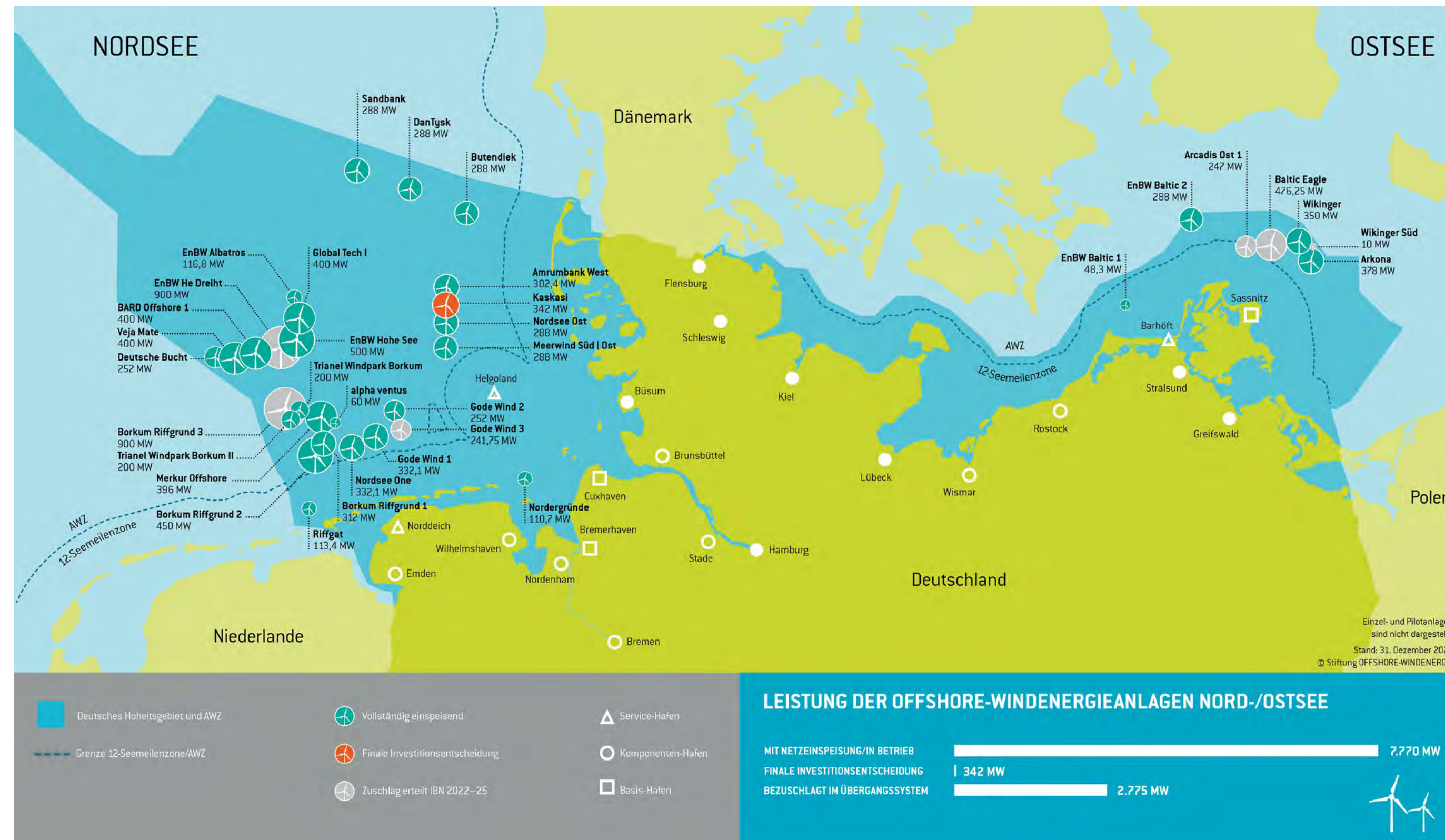
Definitionen der einzelnen Sektoren

Bruttostromerzeugung aus Regenerativen Energien



Definitionen der einzelnen Sektoren

Ausbau der Offshore Windenergie bis 2050



Bis 2050 installierte Offshore-Leistung: mind. 50 GW (!)
Heutiger Stand (2021): ca. 8 GW

Potentiale zur Dekarbonisierung der Sektoren Emissionen der verschiedenen Erzeugungswege

Farbe des Wasserstoffs	Technologie	Eingesetzte Energie	CO ₂ Verbleib	Emissionen (gCO ₂ /kWhH ₂)
Grau	Elektrolyse	Grauer Netzstrom	Atmosphäre	691 ⁽¹⁾
Grau	Reformer	Erdgas	Atmosphäre	400 ⁽¹⁾
Blau	Reformer	Erdgas	CCS/CCU	183 ⁽¹⁾
Türkis	Pyrolyse	Methan	Fester Kohlenstoff	43-97 ⁽²⁾
Grün	Elektrolyse	Windstrom	Entsteht nur beim Bau	26 ⁽¹⁾



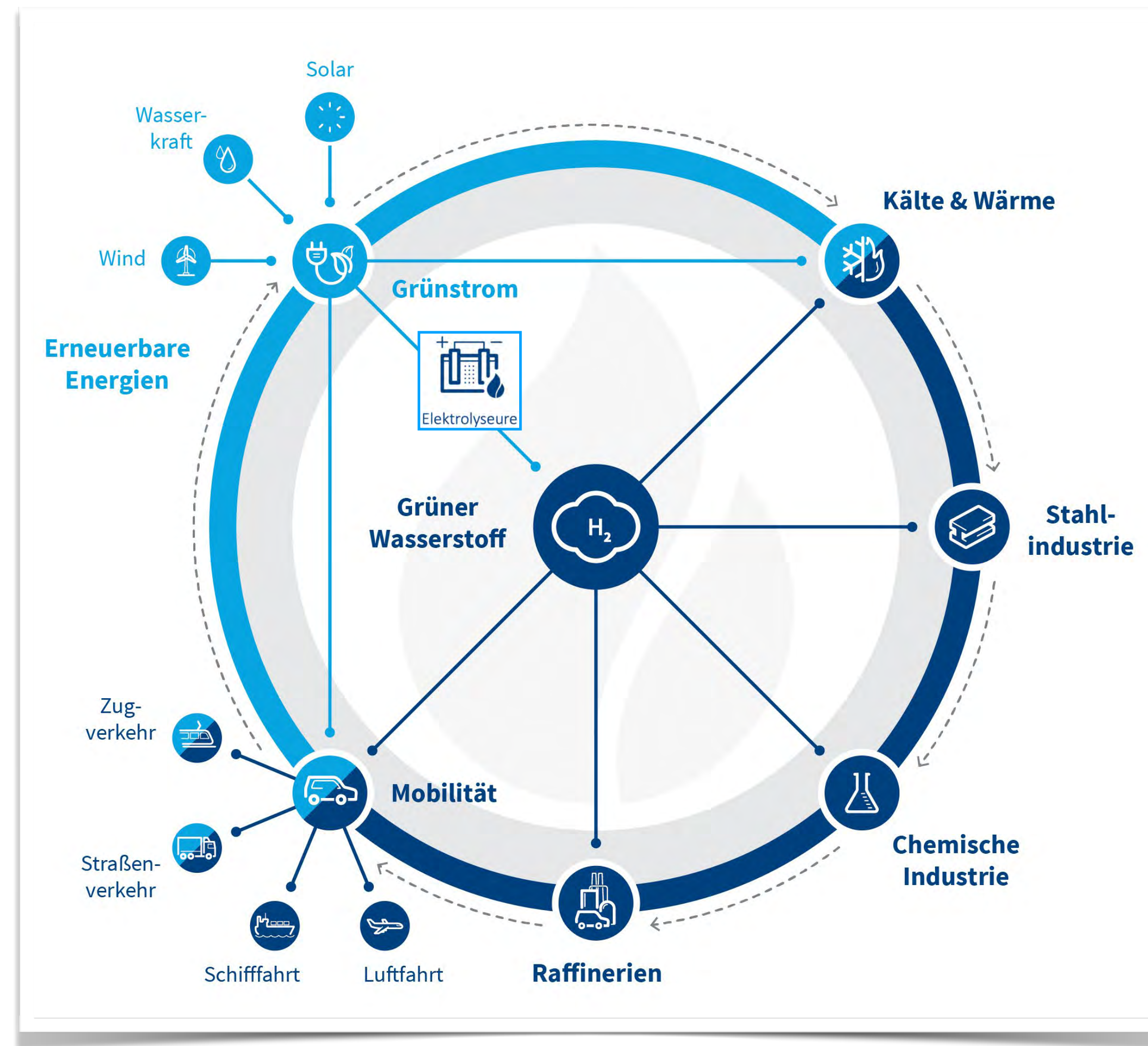
Quellen:

(1): Kurzstudie „Blauer Wasserstoff“ von Greenpeace Energy 2020

(2): „Hydrogen and hydrogen-derived fuels through methane decomposition of natural gas – GHG emissions and costs“, Universität Hamburg und Berlin

Definitionen der einzelnen Sektoren

Wasserstoff als zentrales Element der Sektorenkopplung



Potentiale zur Dekarbonisierung der Sektoren

Beispiel-Verbundprojekt: Reallabor „Westküste 100“



Einsatz in der Mobilität

Aktuelle Anwendungen von H₂: BZ-Gabelstapler



Bild: TOYOTA

32.500 Brennstoffzellen-Flurförderzeuge sind in den USA heute im Einsatz.
In Europa erst rund 600 Geräte.

Vorteile der Brennstoffzellen-Technologie für Flurförderzeuge:

- **Emissionsfreier Betrieb**, nur destilliertes Wasser als „Abfallprodukt“. Geeignet für Lebensmittel-Lager.
- **Zeitersparnis** durch **Wegfall** des **Batteriewechsels** oder Stillstandszeiten während des **Ladeprozesses**
- **Hohe Geräteverfügbarkeit**, da das Auftanken nur 2-3 Minuten dauert
- **CO₂-neutral** bei Verwendung von „grünem“ Wasserstoff
- **Kein Leistungsabfall** im Laufe des Einsatzes
- Einsatz im **Temperaturbereich von - 30°C bis 40°C** möglich

Einsatz in der Mobilität

Aktuelle Anwendungen von H₂ (LKW)

100.000 BZ-LKW bis 2030 in Europa unterwegs (Hydrogen Europe)

- Wasserstoff-LKW könnten schon 2027 die selben Betriebskosten haben wie Diesel-LKW ⁽¹⁾
- ab 2030 wahrscheinlich günstiger als Diesel und umwelttechnisch besser
- Hyundai rechnet dem Absatz von ca. 1.600 BZ-Trucks bis 2025

Reichweite	400 km
Antriebsleistung	350 kW _{el}
Tankdauer	10-20 Minuten
Wasserstoffdruck im Tank	350 bar
Batteriespannung / Energie	661 VDC (73,2 kWh)
CO ₂ -Einsparung pro Jahr	ca. 65 t



Foto: Hyundai



Foto: Hyundai

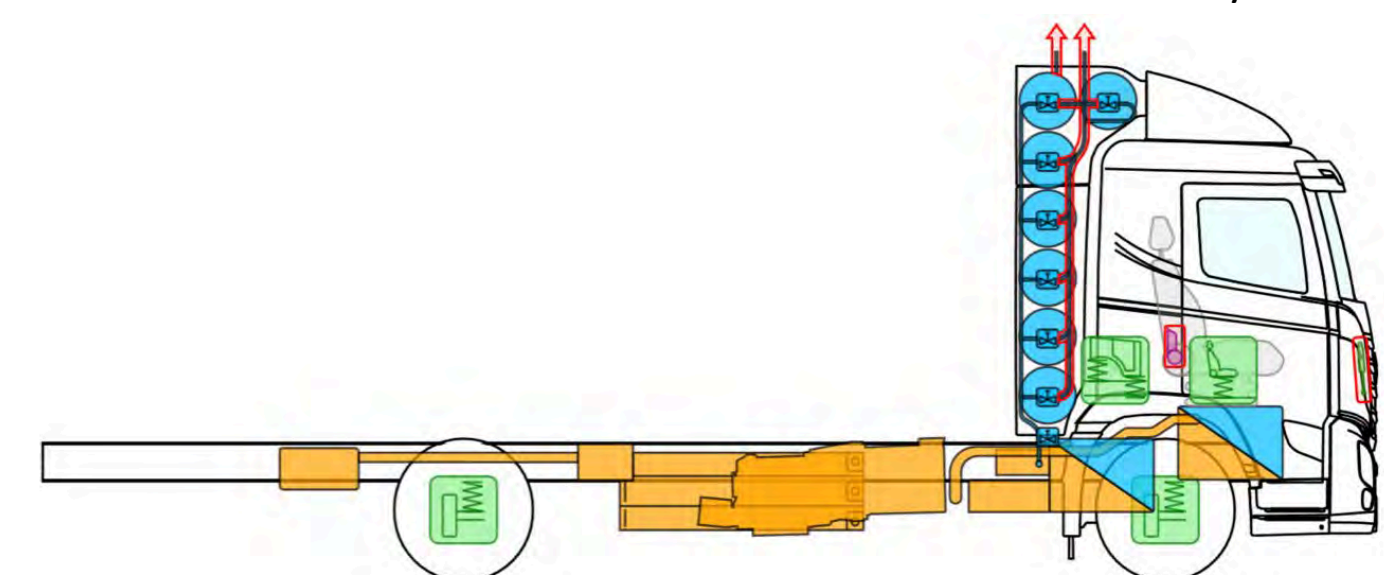
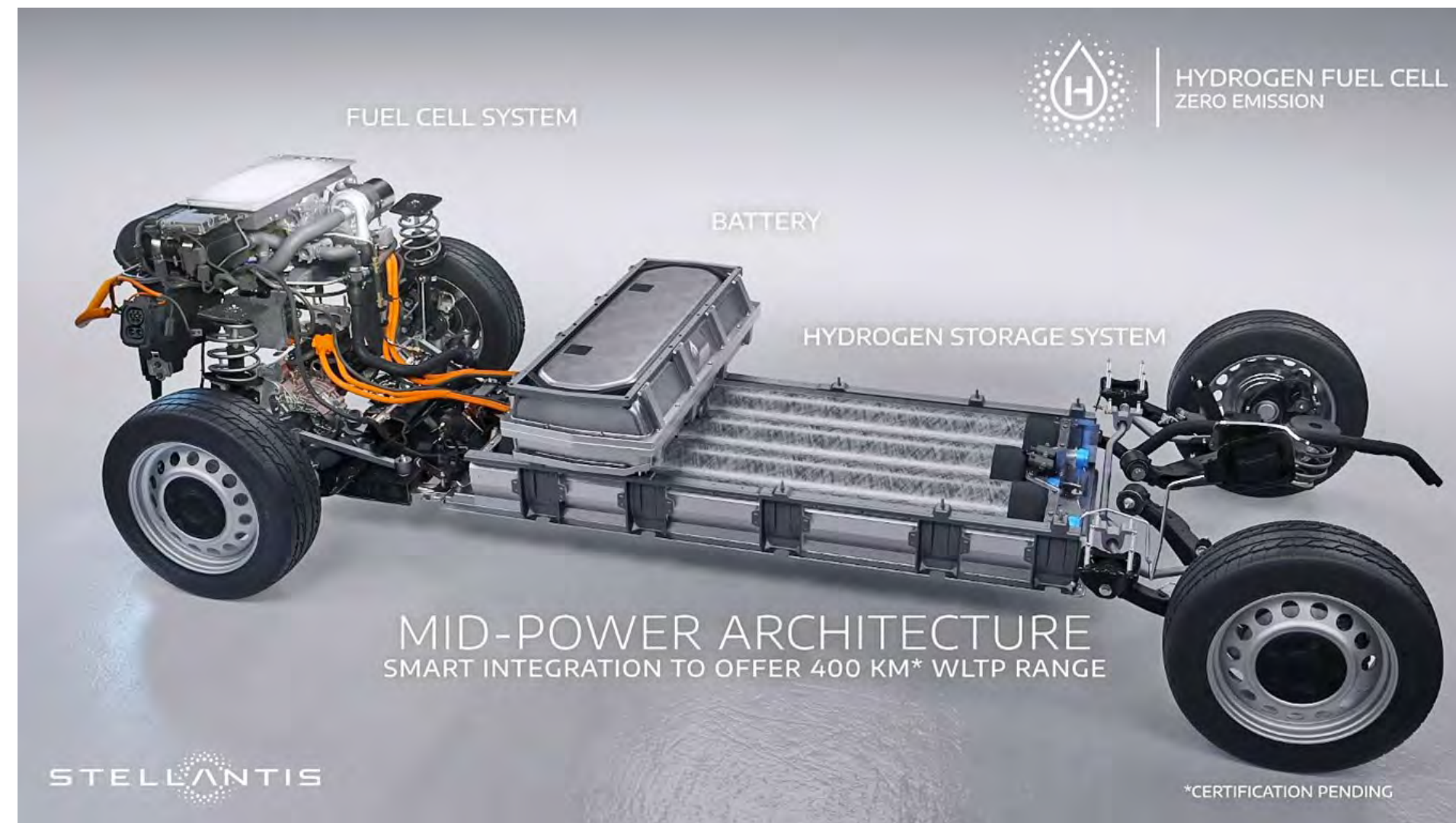


Abbildung: Hyundai

⁽¹⁾ Roland Berger Studie „Wasserstoff“

Einsatz in der Mobilität

Wasserstoff-Lieferfahrzeuge (OPEL Vivaro-e hydrogen)

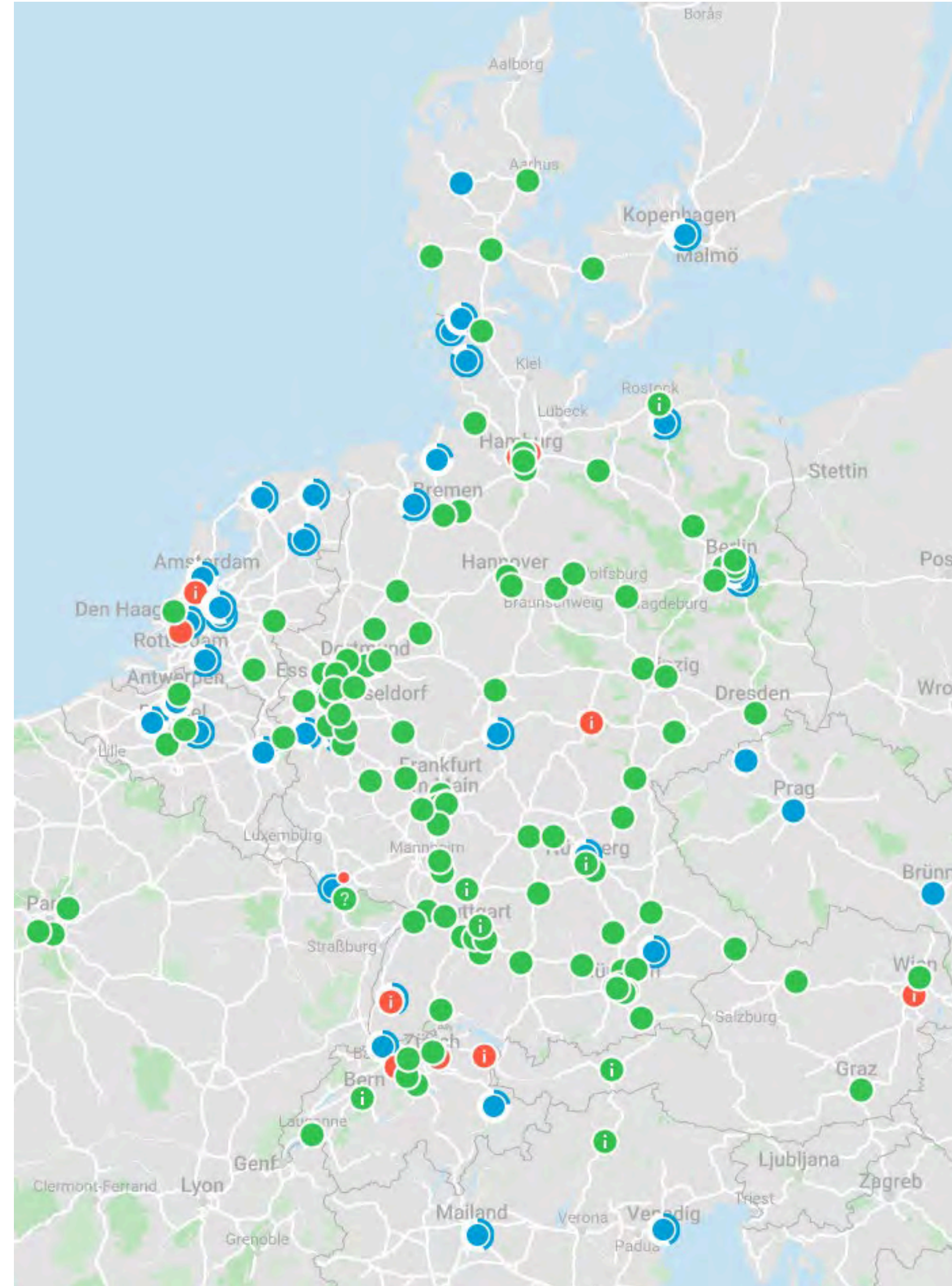


„Dieses Antriebssystem verbindet alle Vorzüge von Null-Emissionen, hoher Reichweite und kurzem Tankstopp.“

- Brennstoffzelle: 45kW_{el}
- Batterie: 10,5 kWh Li-Ionen Plug-in für Lastspitzen und Rekuperation mit 50 km rein elektrische Reichweite.
- H₂-Tank: Mit 700 bar in 3 Minuten Wasserstoff für mehr als 400 Kilometer Reichweite (WLTP¹) tanken.

Einsatz in der Mobilität

Wasserstoff-Tankstellen (Infrastruktur)



H₂-Tankstellen in Deutschland:
Stand 2021: 100
Plan 2030: 1.000



Introducing Airbus ZEROe

Turboprop



<100
Passengers



Hydrogen
Hybrid Turboprop
Engines (x 2)

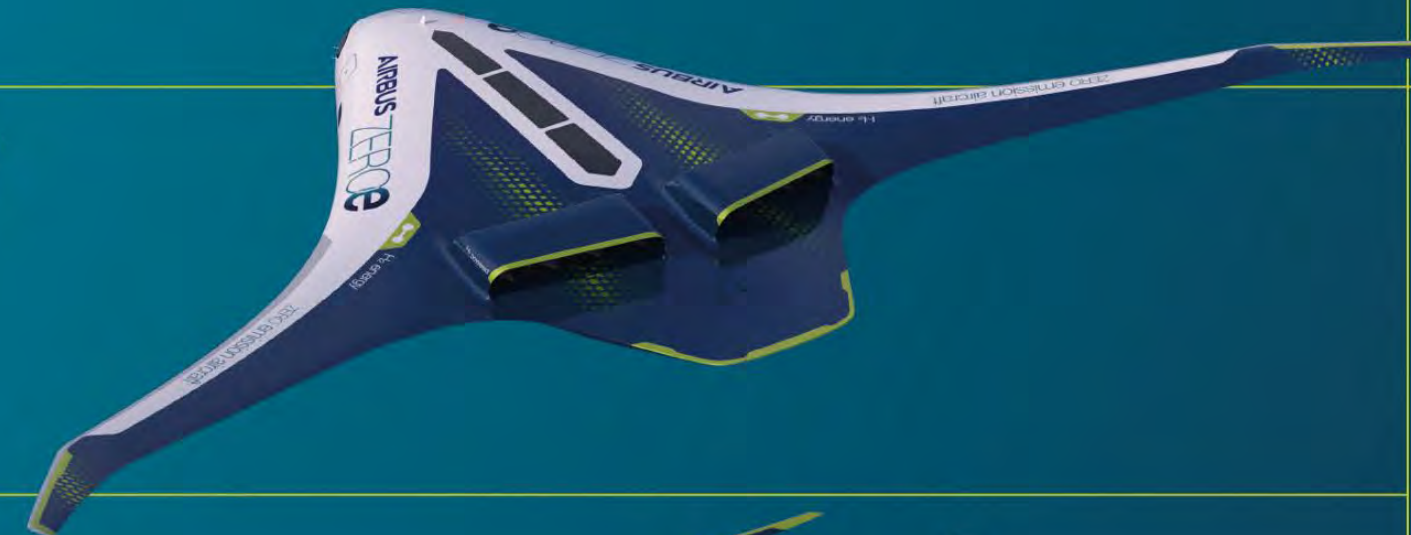


1,000+nm
Range



Liquid Hydrogen
Storage & Distribution
System

Blended-Wing Body



<200
Passengers



Hydrogen
Hybrid Turbofan
Engines (x 2)



2,000+nm
Range



Liquid Hydrogen
Storage & Distribution
System

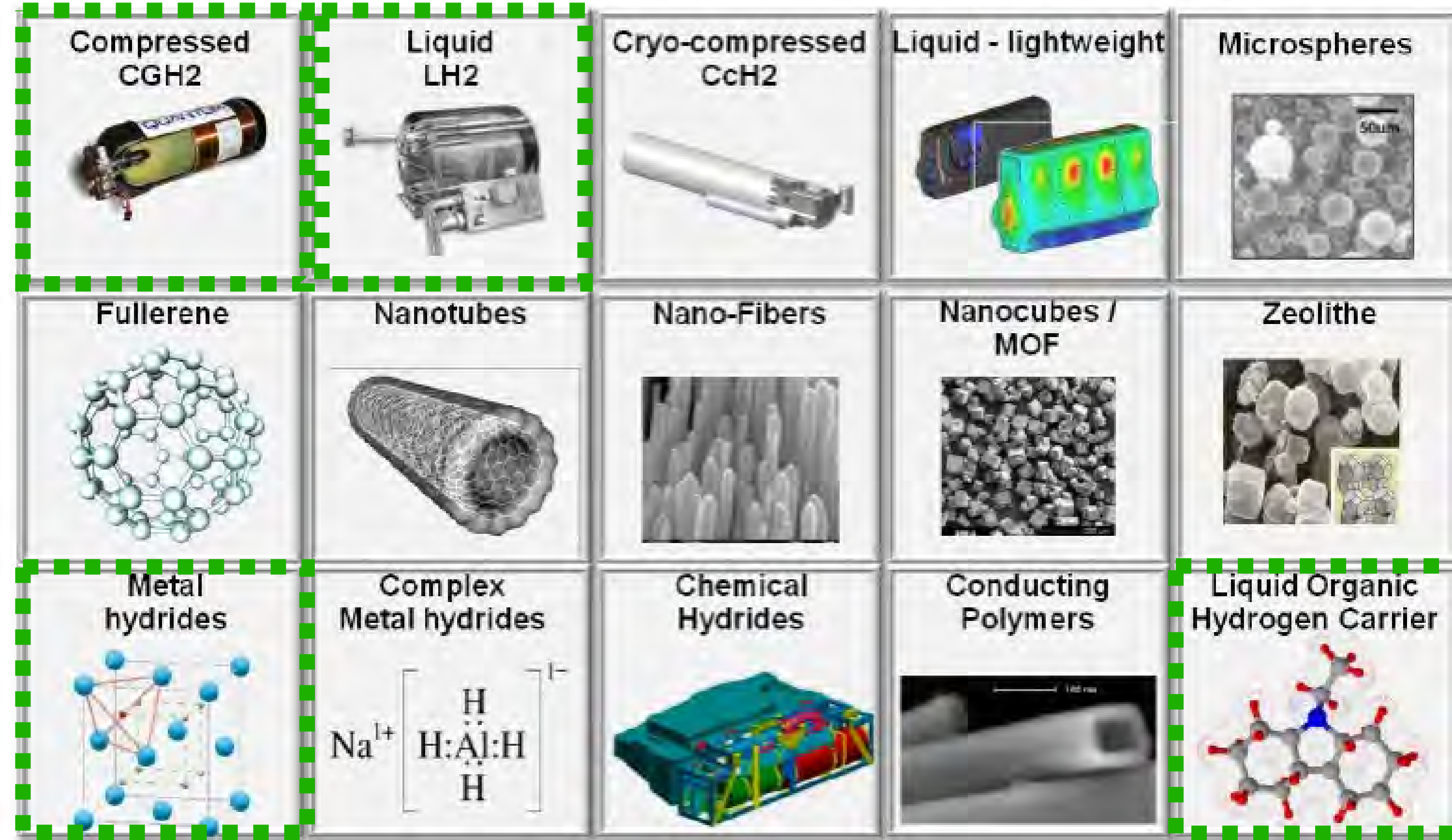
Turbofan



AIRBUS

Definition der Speichertechnologien

Verschiedene Arten der Speicherung



Es werden folgend näher betrachtet:

Abbildung: Jürgen von Wild (BMW)

1. CGH_2 : Druckspeicher (compressed gaseous hydrogen)
2. LH_2 : Flüssigwasserstoff (liquid hydrogen, kryogen)
3. MHS: Metallhydride (bei Adsorption)
4. LOHC: Flüssige organische H_2 -Träger

Definition der Speichertechnologien (12/17)

Druckspeicher (Tests nach ISO15869)

Testbezeichnung	Typ1	Typ2	Typ3	Typ4
Materialtest (Metall)	x	x	x	
Materialtest (Polymer)				x
Harzeigenschaften		x	x	x
Druckwechsel (20°C)	x	x	x	x
Leckage vor Bersten	x	x	x	x
Beflammungstest	x	x	x	x
Beschusstest mit 7,62mm	x	x	x	x
Chemikalieneinwirkung		x	x	x
Fehlertoleranzen		x	x	x
Beschleunigter Stresstest		x	x	x
Druckwechsel (+85/-40°C)		x	x	x
Falltest (1,8m)			x	x
Permeationstest				x
Flaschenhalstorsion				x
H ₂ Zyklisierung				x



Notwendigkeit und Herausforderungen der Sektorenkopplung

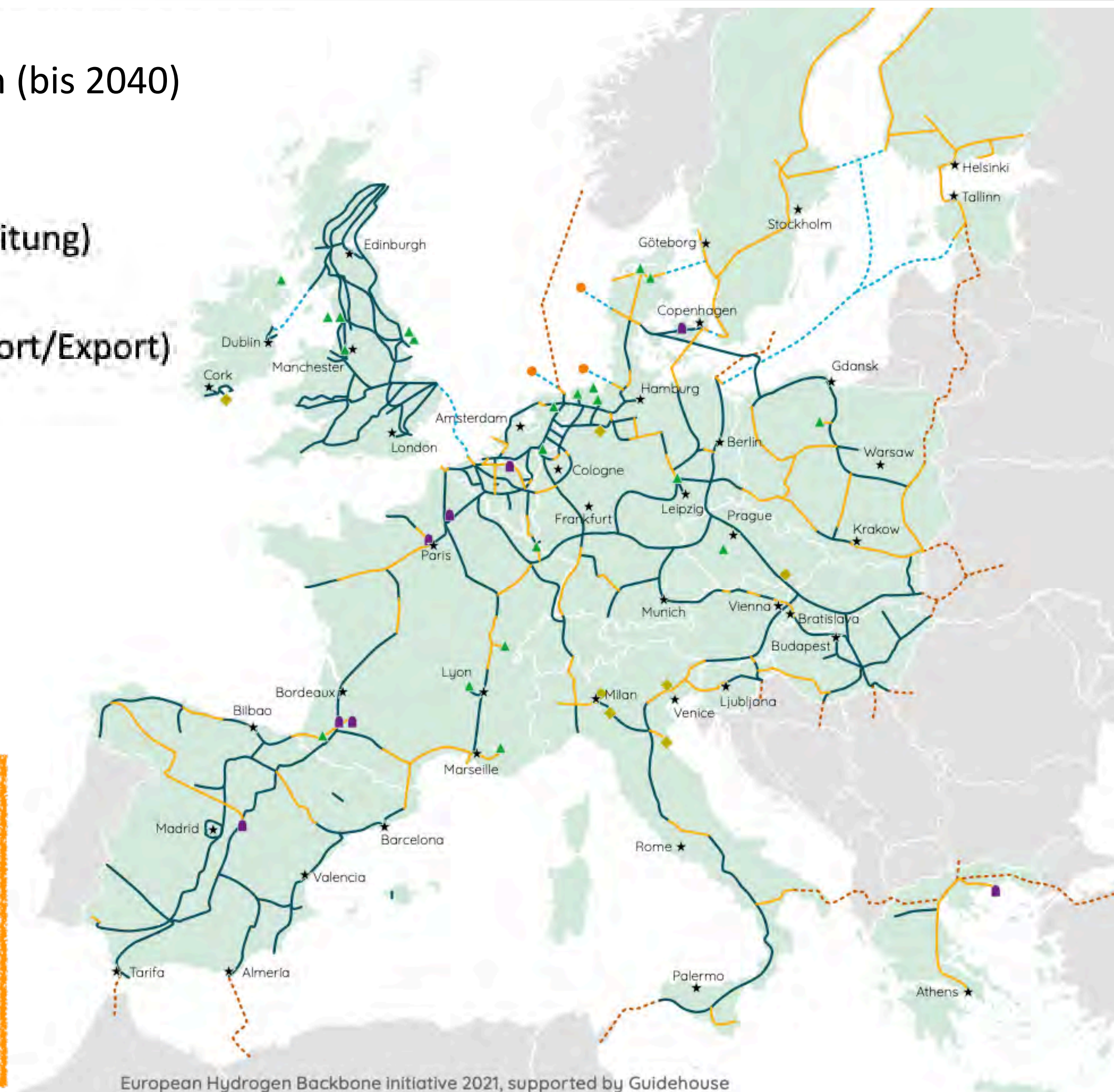
Transport von H₂ im Erdgasnetz (Planung bis 2040)

Wasserstoff-Versorgungsleitungen (bis 2040)

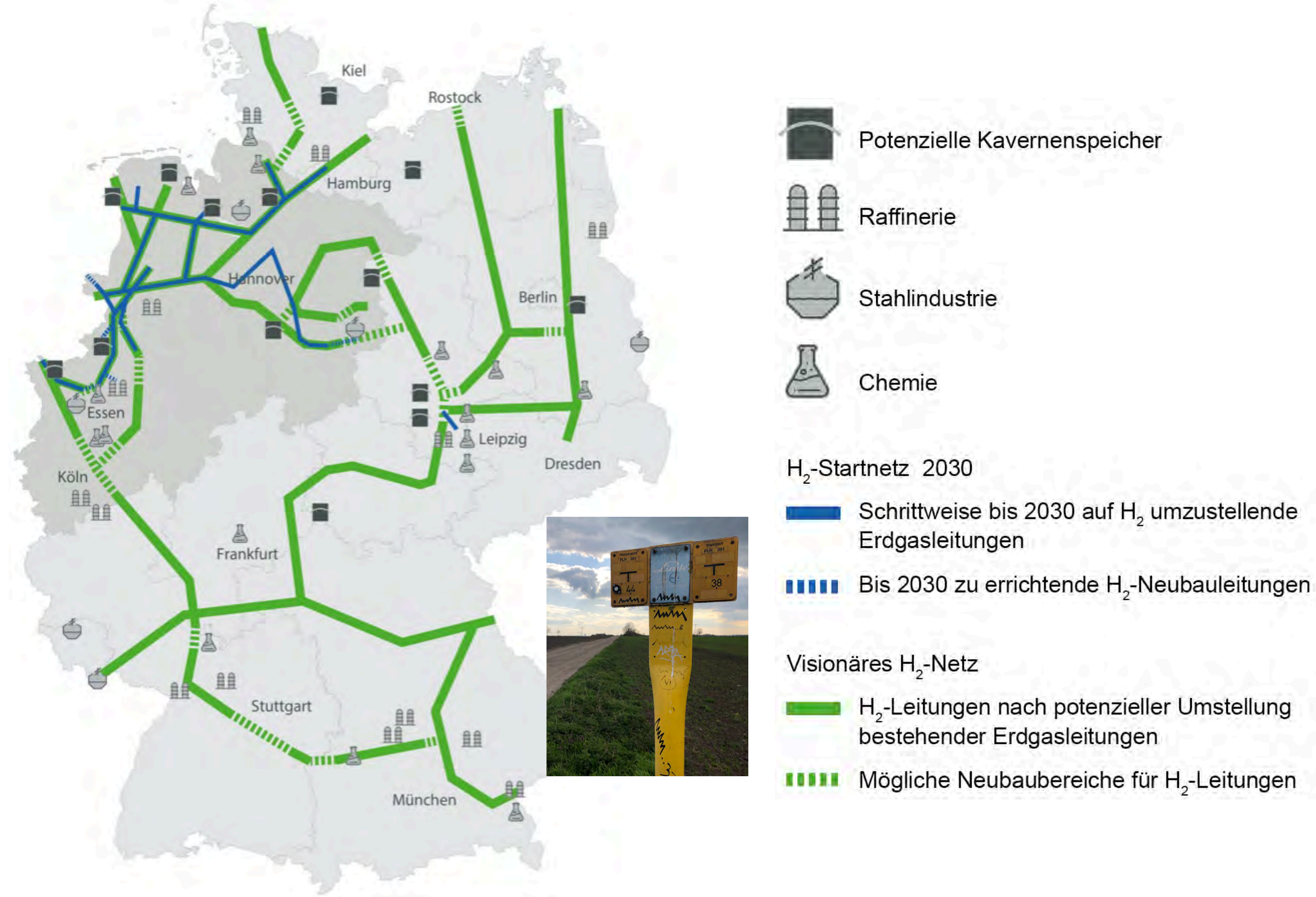
- H₂ Pipeline (Umrüstung Erdgasleitung)
- H₂ Pipeline (Neubau)
- - H₂ Pipeline (Umgerüstet für Import/Export)
- - H₂ Pipeline (Unterwasser)
- ▲ H₂ Speicher (Salzkaverne)
- H₂ Speicher (Aquifere)
- ◆ H₂ Speicher (Leeres Gasfeld)
- H₂ Produktion (Offshore)
- ★ Stadt (zur Orientierung)

Weltweit existieren (2016) insgesamt über 4.500 Kilometer Wasserstoff-Pipelines, die überwiegend von Gaserzeugern betrieben werden. Die längsten Pipelines gibt es in den USA, gefolgt von Belgien sowie Deutschland

Quelle: SHELL WASSERSTOFF-STUDIE – ENERGIE DER ZUKUNFT?
Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂, 2017



Beimischung von H₂ in Erdgas Ausbau des Wasserstoffnetzes (FNB)



Umgang mit H₂ im Anlagenbau und -betrieb

Kennzeichnung von Anlagen (Beispiele)



Hinweise an einer H₂-Tankstelle (efficientics)



Wasserstoff-Speicher in der Industrie (efficientics)



Wasserstoff-Speicher an einer Tankstelle (efficientics)

Die hier abgebildeten Hinweise beruhen auf einer durchgeführten Gefährdungsbeurteilung und können daher je nach Anlage variieren.



Sicherheits- und Warnhinweise an einer Wasserstoffanlage (efficientics)



Vielen Dank für Ihr Interesse!

Ihr Christian Machens

www.wasserstofftraining.de

efficientics – efficient energy consulting

Christian Machens Dipl.-Ing. (FH)
Tschaikowskistrasse 21
D – 04105 Leipzig

Mobil: +49 (0)151 24 155 887
Mail: machens@efficientics.com