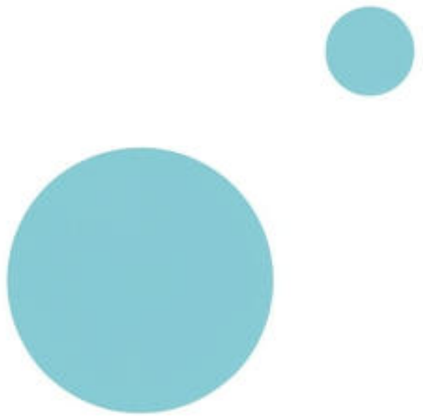
Wasserstoff-Energietechnik

Von physikalisch-chemischen Grundlagen
zur globalen Sektorenkopplung.



Gemini Notebook

Aggregatzustände

> -239,97 °C

Kritische Temperatur
(keine Verflüssigung durch
Druck mehr möglich)



< -252,76 °C

Kryogene Verflüssigung

Reinheitsklassen

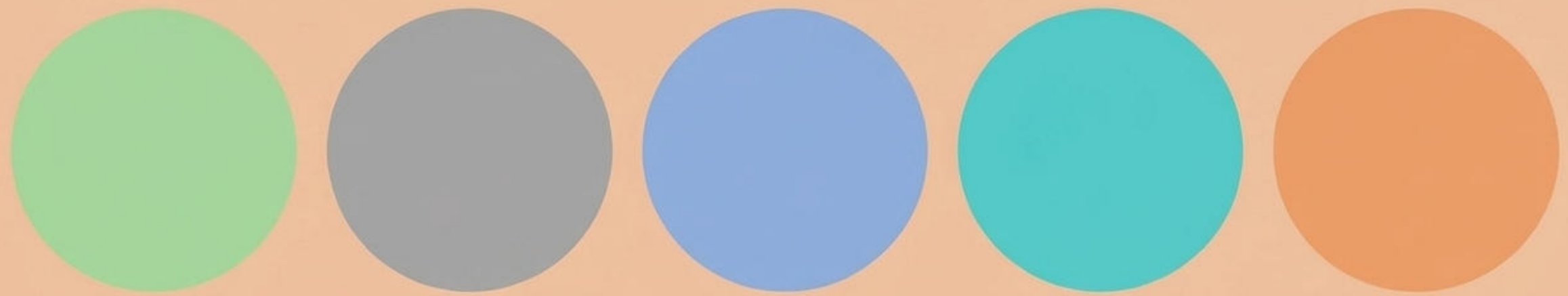
5.0 = 99,999 mol-%
2.0 = 99,000 mol-%

Permeations-Hierarchie

Eisen (höchste Permeation)
PP (Polypropylen)
HDPE
PVC (geringste Permeation)

Gemini Notebook

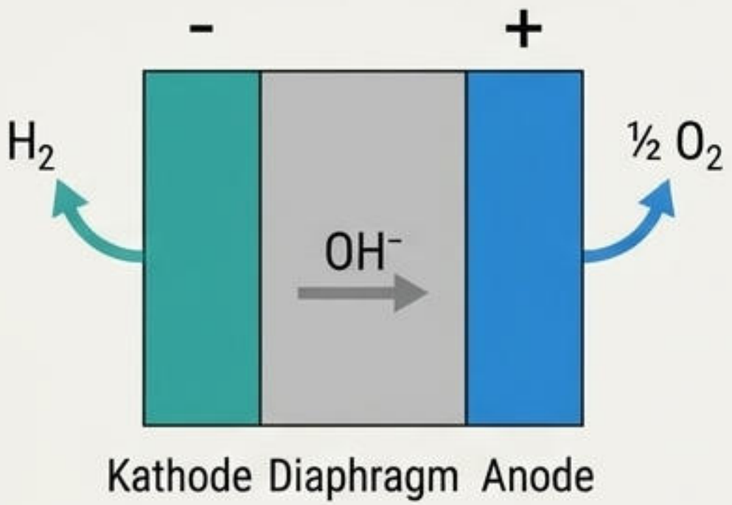
Die H2-Farbenlehre



Grün	Grau	Blau	Türkis	Orange
EE-Strom + Wasser	Erdgas	Erdgas	Methan	Biomasse / Abfall
Technologie: Elektrolyse	Technologie: Dampfreformierung	Technologie: Dampfreformierung	Technologie: Pyrolyse	Technologie: Pyrolyse/Fermentation
Nebenprodukt: O_2	Nebenprodukt: CO_2 (Emission)	Nebenprodukt: CO_2 (Abgespalten, CCS/CCU)	Nebenprodukt: Fester Kohlenstoff (C)	

Gemini Notebook

Wasserbasierte Elektrolyseverfahren

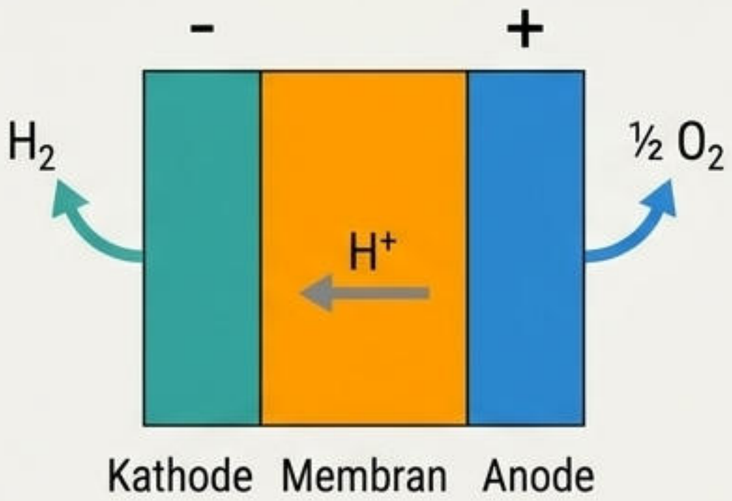


Alkalische Elektrolyse (AEL)

Ladungsträger: OH^-

Wirkungsgrad: 70 %

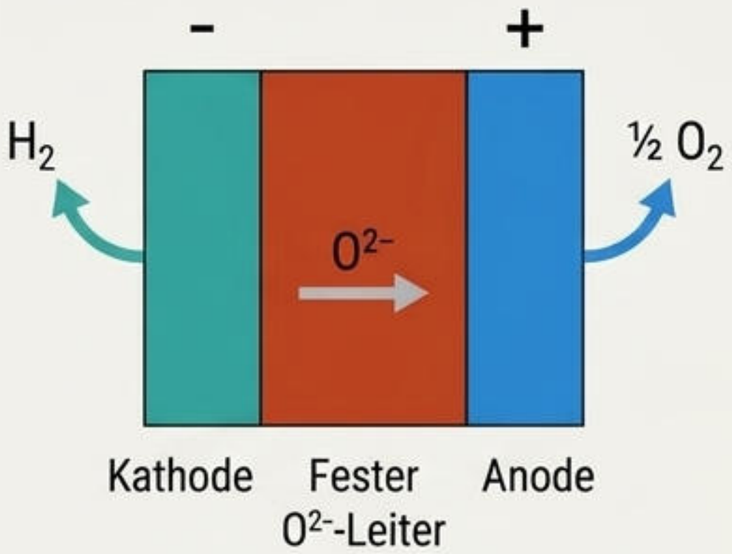
Ausgereift, industrieller Maßstab, unkritische Materialien



Proton-Exchange-Membran (PEMEL)

Ladungsträger: H^+

Hochrein, dynamisch (für fluktuierende EE-Stromquellen), nutzt Iridium



Hochtemperaturelektrolyse (HTEL)

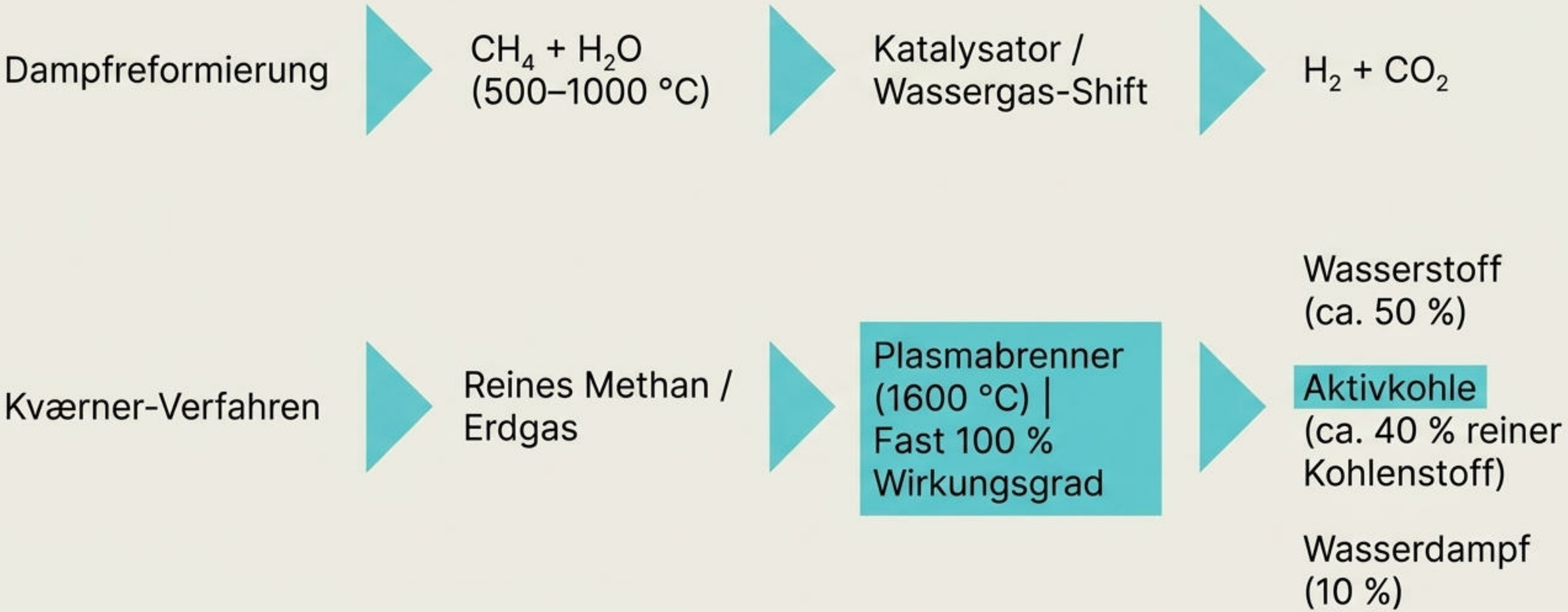
Ladungsträger: O^{2-}

Nutzt Wasserdampf (> 1000 °C)

Höchster Wirkungsgrad, lange Anlaufzeiten

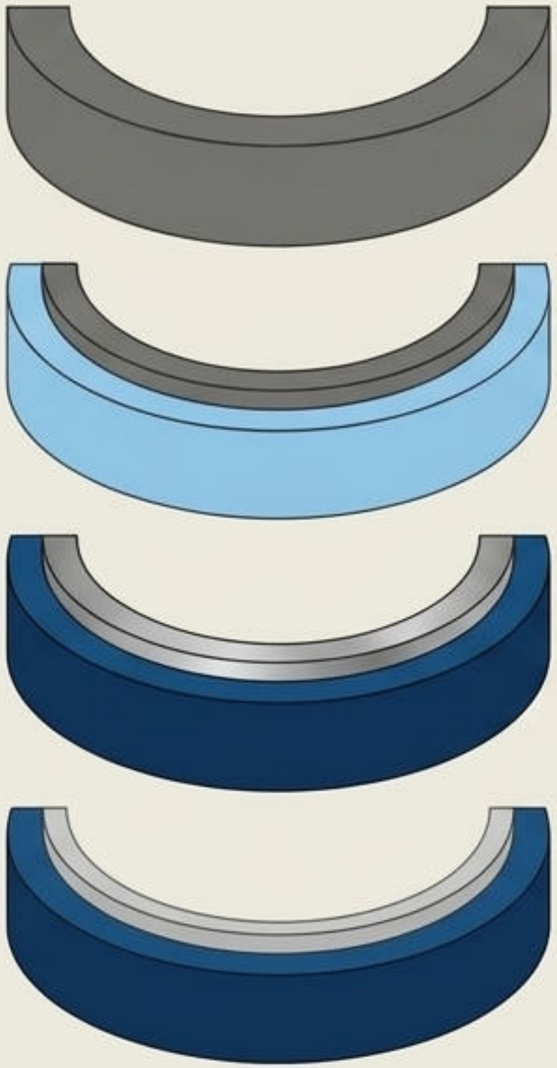
Gemini Notebook

Thermochemische Kohlenwasserstoff-Routen



Gemini Notebook

Mobile Speichertechnologien



Typ-1: Reiner Stahl (bis 300 bar).
Sehr schwer.

Typ-2: Stahl + Glas-/Kohlefaser-Ummantelung (bis 1000 bar statisch).

Typ-3: Aluminium-Inliner + Voll-Carbon-Mantel (350–700 bar). Standard für aktuelle Fahrzeuge.

Typ-4: Kunststoff-Inliner (Polyamid/PE) + Carbon-Mantel. Maximale Gewichtsreduktion.

Flüssigspeicher (Kryogen)

Speicherung bei -253 °C.

1 Liter flüssig = 840 Liter gasförmig.

Nachteil: 30 % Energieverlust durch Kühlung & Boil-off-Effekte.

Gemini Notebook

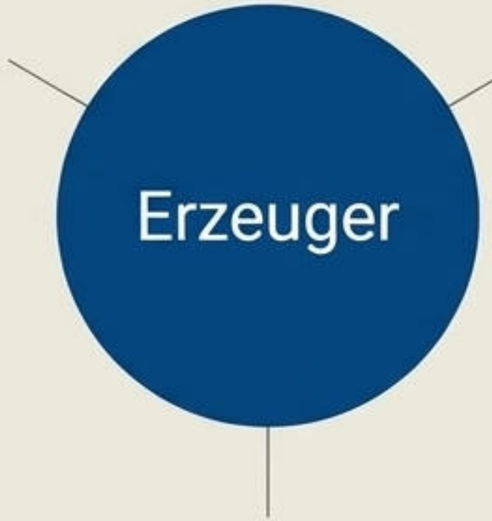
Stationäre Großspeicher



Gemini Notebook

Transport-Modalitäten und Infrastruktur

Global (Schiff)
Transport als Ammoniak oder LOHC.
Toxizitäts-Herausforderungen (NH_3)
vs. Petrochemie-Infrastruktur.



Regional (Lkw / Bahn)
Trailer mit Druckflaschen (Gas) oder
Kryotanks (Flüssig) für die “letzte
Meile”.

Nationales Rückgrat (Pipelines)

Ist-Stand: ~400 km

Bedarf: ~6.000 km



Lösung: Umnutzung des Erdgasnetzes spart Investitionskosten.
Reference the geographic layout concept for a potential hydrogen distribution network.

Gemini Notebook

Die Wasserstofftankstelle

Anlieferung / Erzeugung

Trailer (200 bar) oder On-Site Elektrolyse (50 bar)

Niederdruckspeicher

Kompression

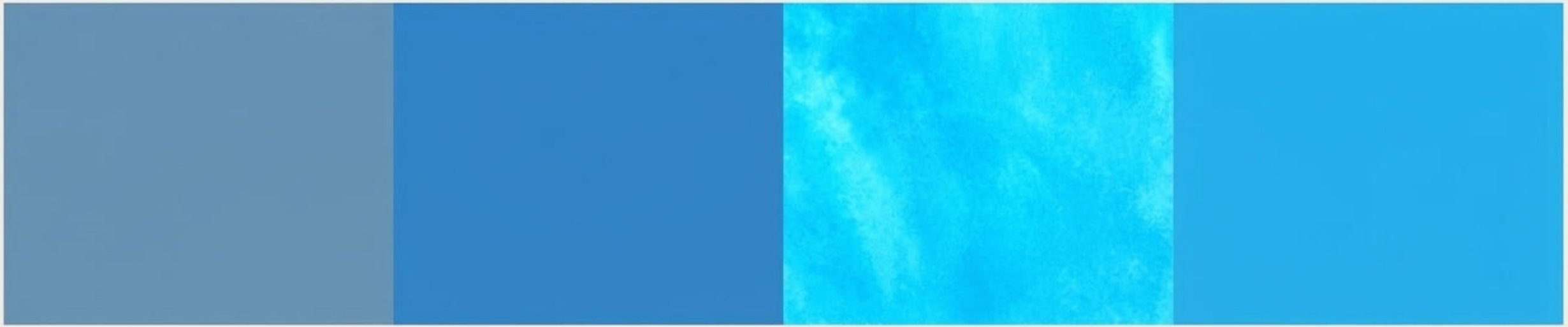
Verdichtung auf 900 bar (Kaskadenspeicherung) oder direkter Booster-Einsatz

Temperatursturz

Herunterkühlen auf exakt -40 °C

Abgabe (Dispenser)

Betankung in 3–10 Minuten. 350 bar (Bus/Lkw) vs. 700 bar (PKW)



Gemini Notebook

Sektorenkopplung: Industrie & Chemie

Stahlindustrie

Eisenerz + Koks → Eisen + CO_2
(Konventionell)

$Fe_3O_4 + 4\ H_2 \rightarrow 3\ Fe + 4\ H_2O$ (H2-Route)

Resultat: Höhere Eisenqualität, 0 % CO_2, nur Wasserdampf

Chemische Industrie

Ammoniak (NH_3)

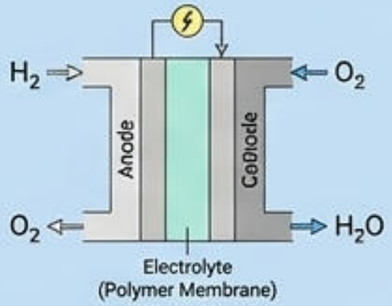
Weltbedarf 175 Mio. Tonnen.
Essenziell für Düngemittel.

Methanol

Katalytische Hydrierung von Kohlenmonoxid ($CO + H_2$).
Grundstoff für E-Fuels.

Gemini Notebook

Brennstoffzellen-Typologie

	PEMFC (Polymer-Elektrolyt)	SOFC (Oxidkeramisch)	AFC (Alkalisch)
			
Temperatur:	50–180 °C	700–1.000 °C	60–90 °C
Elektrolyt:	Polymermembran	Oxidkeramik	Kalilauge
Vorteil:	Gute Kaltstarte-igenschaft, kompakt	Höchster Wirkungs-grad, toleriert Erdgas, kein Edelmetall	Etabliert
Einsatz:	Mobilität (Fahrzeugantriebe)	Kraftwerke, stationäre KWK	Raumfahrt, U-Boote

Gemini Notebook

Mobilitätssektor: Druck als limitierender Faktor

350 bar

Schwerlastverkehr & ÖPNV

Lkw, Busse, Züge (Vorteil: Viel Bauraum für Tanks, geringerer Druck reicht aus).

Gabelstapler (Etabliert, keine Säuregefahr, kurze Betankung).

700 bar

PKW & Individualverkehr

Extremer Bauraummangel erzwingt 700 bar.

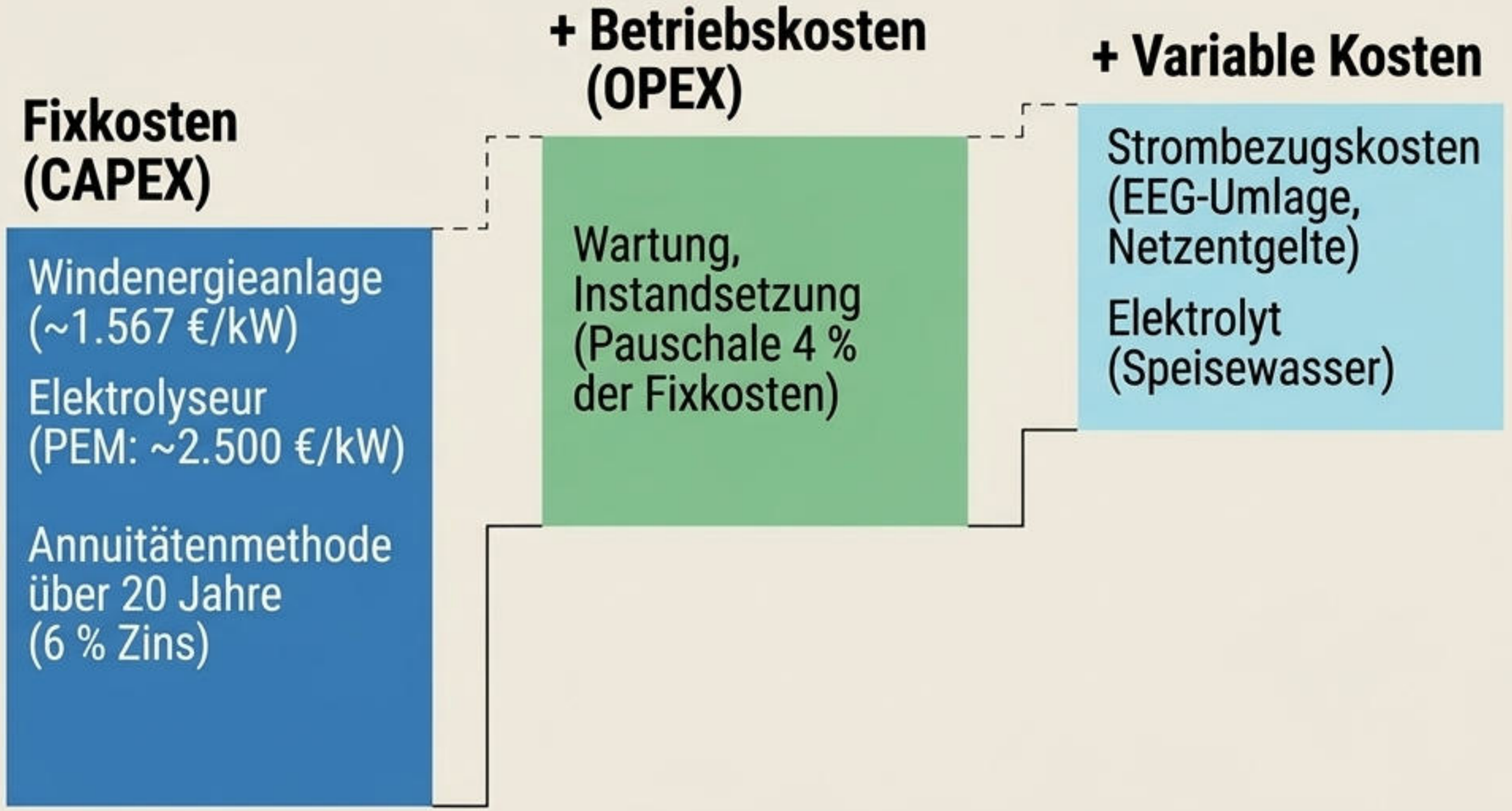
Massive Komplexität bei Betankung (Kompression & Kühlung auf -40°C).

Starke Konkurrenz durch BEVs.

Gemini Notebook

Kostenstruktur einer PtG-Anlage (Wind-zu-Gas)

Die Anlage erfordert zwingend 2.000 bis 3.000 Volllaststunden, um die massiven Fixkosten zu amortisieren.



Gemini Notebook

Wirtschaftlichkeit (Net Present Value)

Ausgaben

Einnahmen

Erlöse aus SNG-Einspeisung
Stromverkauf an Stadtwerke

NPV < 0

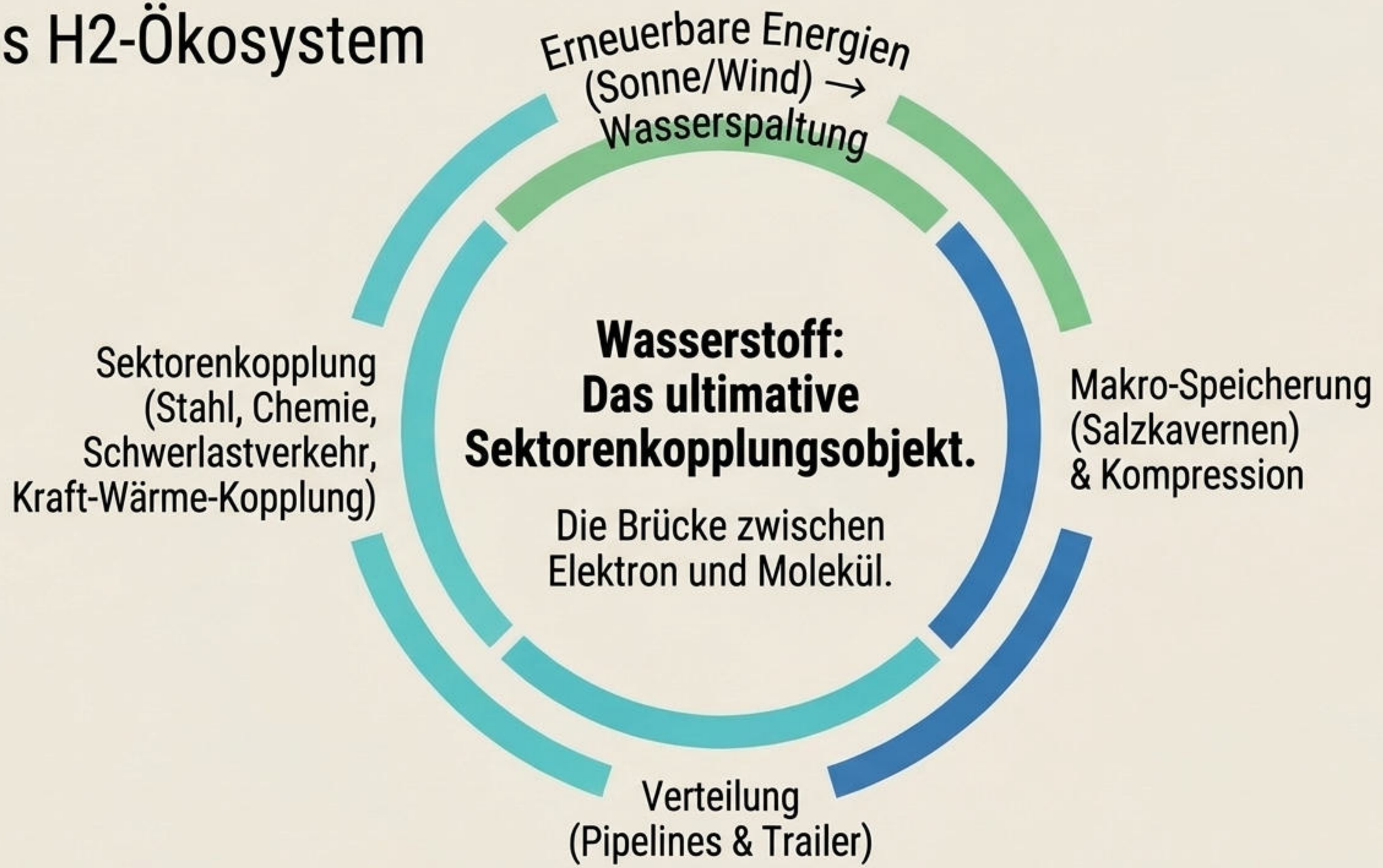
Finanzierungslücke

Kumulierte CAPEX
OPEX & Variable Kosten

Ein marktwirtschaftlicher Betrieb erfordert derzeit Subventionen, Fördermittel oder gestaffelte Geschäftsmodelle, bis Skaleneffekte die Investitionskosten der Elektrolyseure drücken.

Gemini Notebook

Das H2-Ökosystem



Gemini Notebook