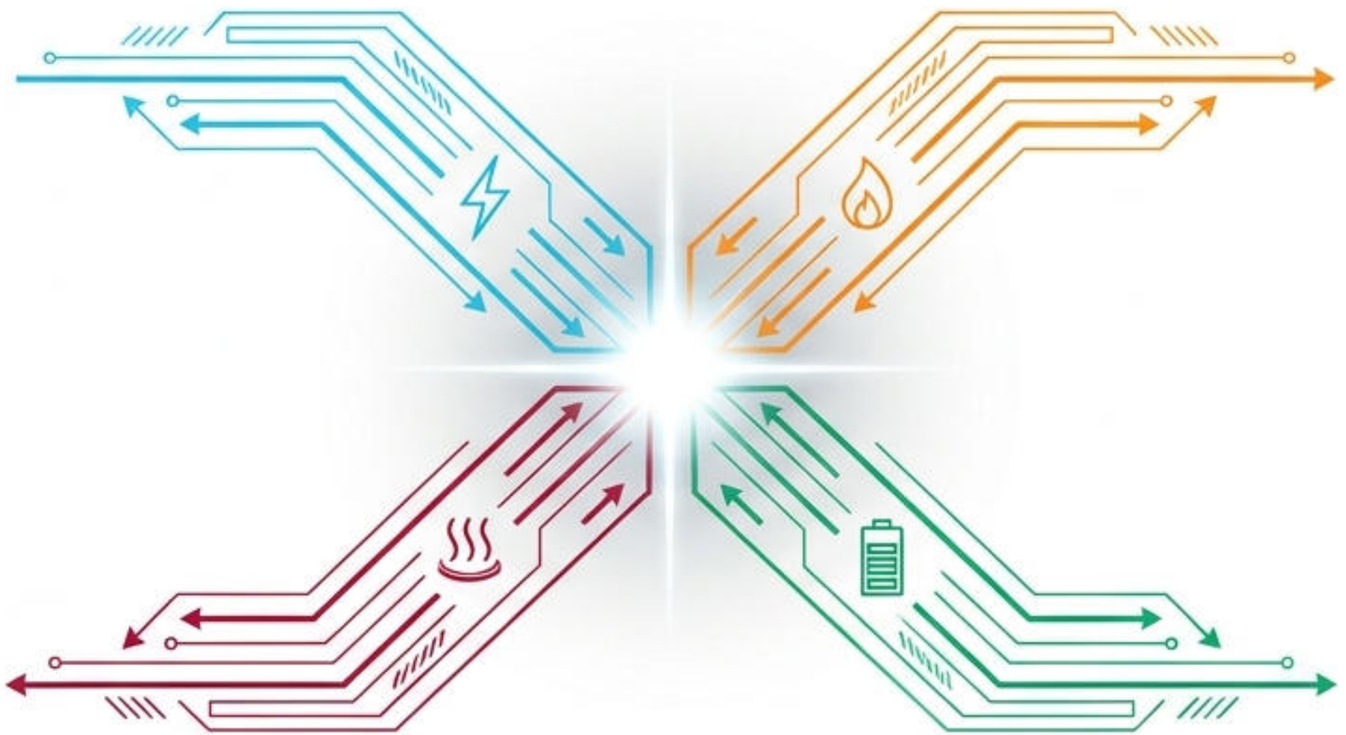
Transport, Speicherung und Verteilung in der Energiewirtschaft

Von historischen Infrastrukturen zur sektorengekoppelten Synergie (Quelle: GLEW4)

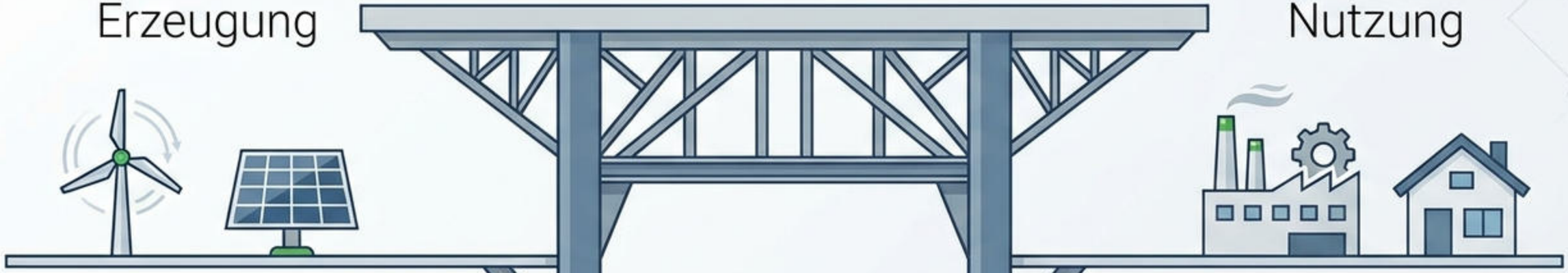


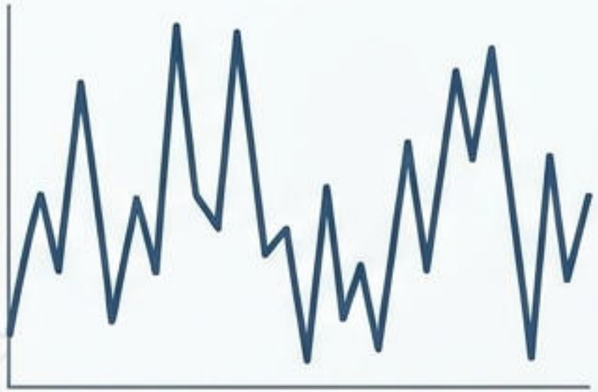
Gemini Notebook

Das Trilemma der Energieversorgung

Erzeugung

Nutzung

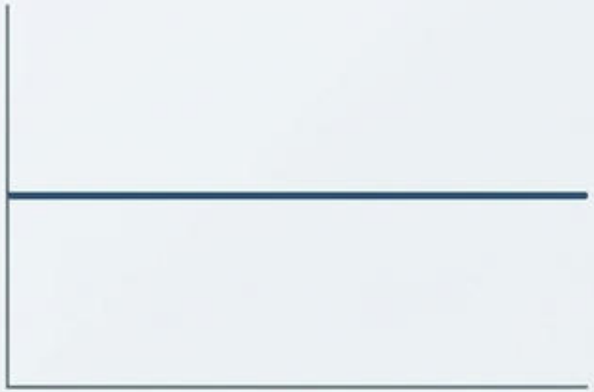




Fluktuierender Anfall von Strom (Solar/Wind) – nicht grundlastfähig ohne Puffer.

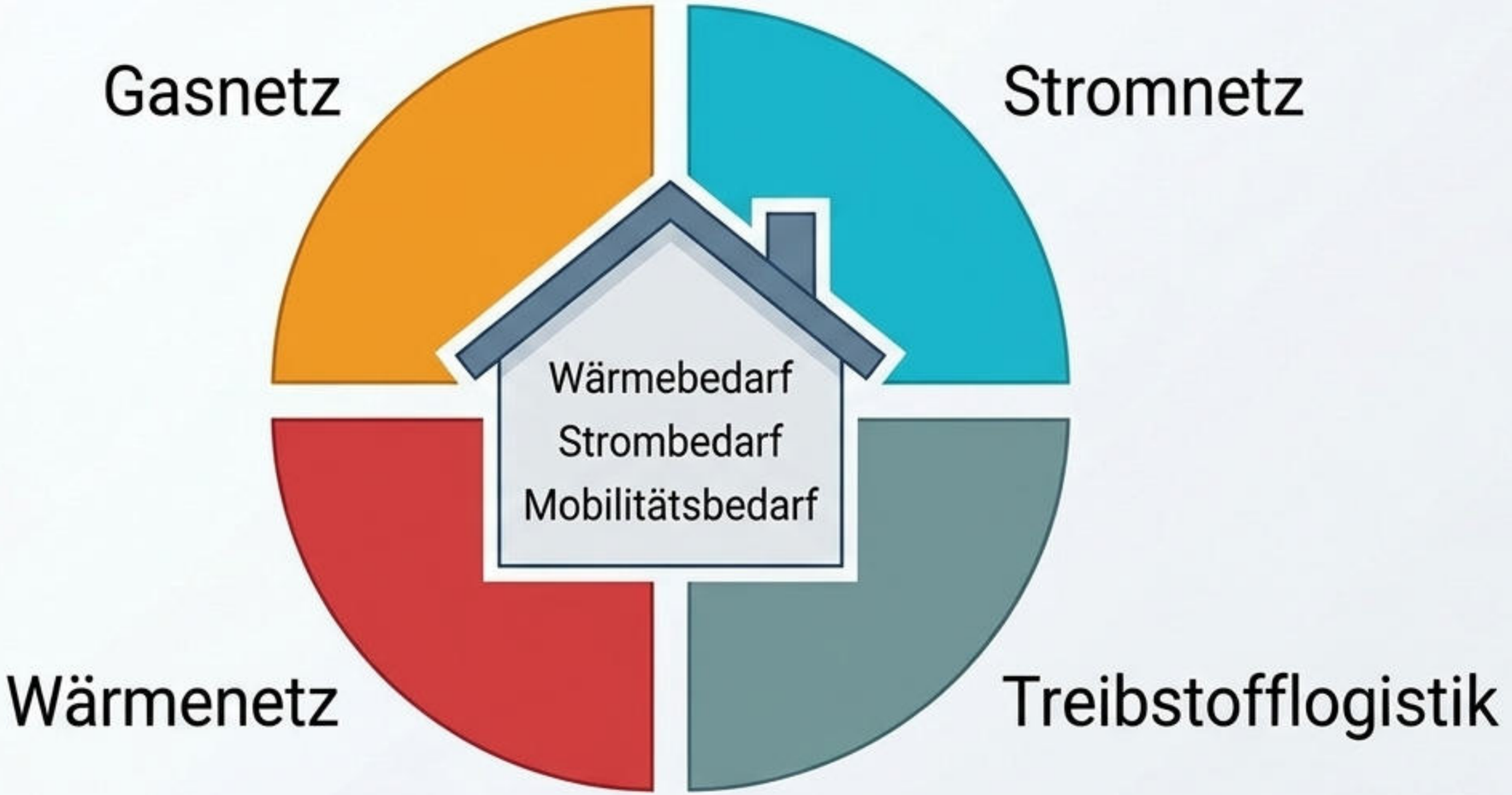
Infrastruktur

Ohne Transport, Verteilung und Speicherung zur örtlichen und zeitlichen Verknüpfung ist Versorgungssicherheit nicht erreichbar. Ein Verzicht auf klassische Back-up-Strukturen erzwingt einen Netzumbau.



Gemini Notebook

Die historischen Silos der Energiewirtschaft

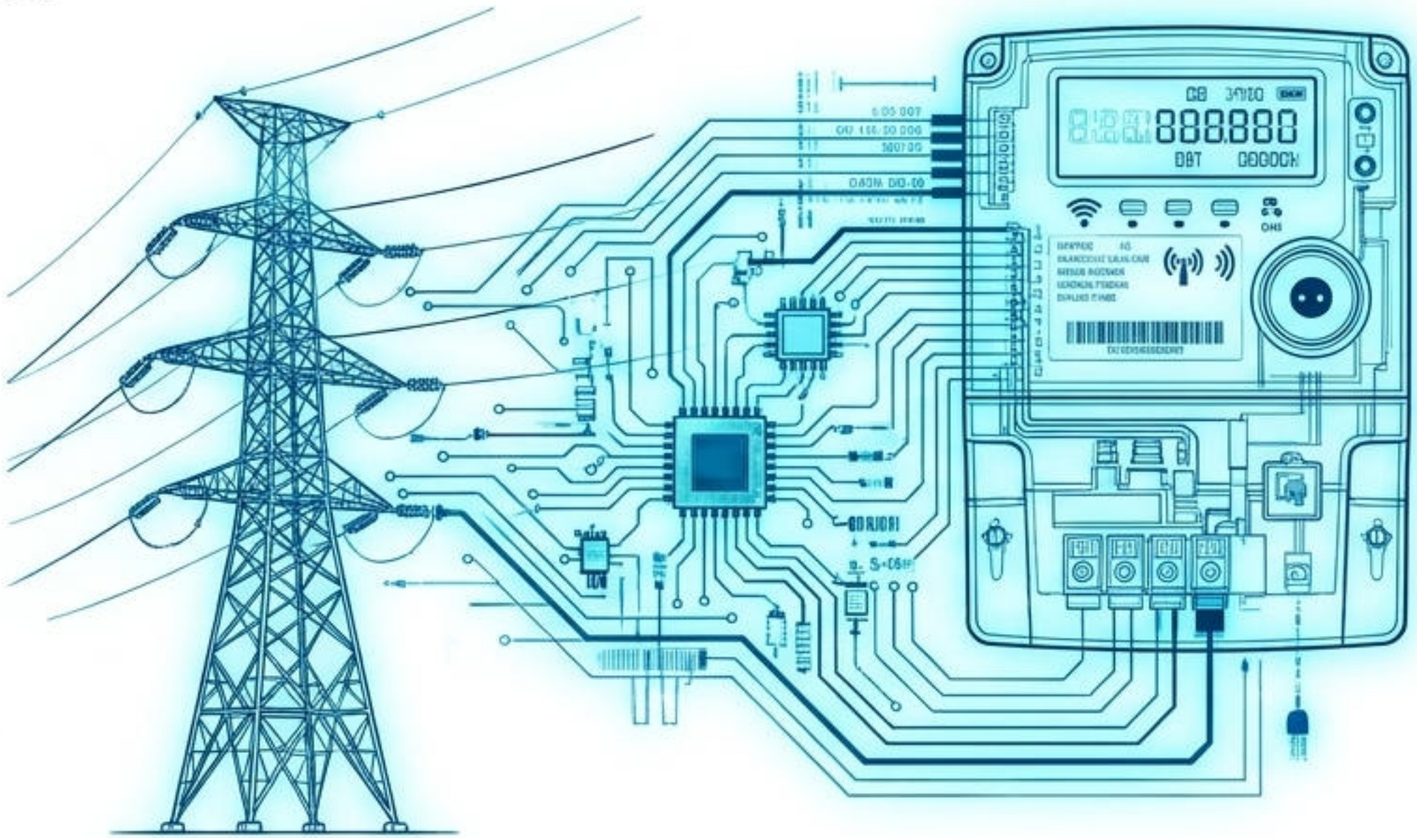


Historisch gewachsene, getrennte Verteilung.
Das Ziel der Energiewende ist die Überwindung dieser Grenzen.

Gemini Notebook

Kapitel 2: Das Stromnetz

Übertragungs- und Verteilnetze im europäischen Verbund



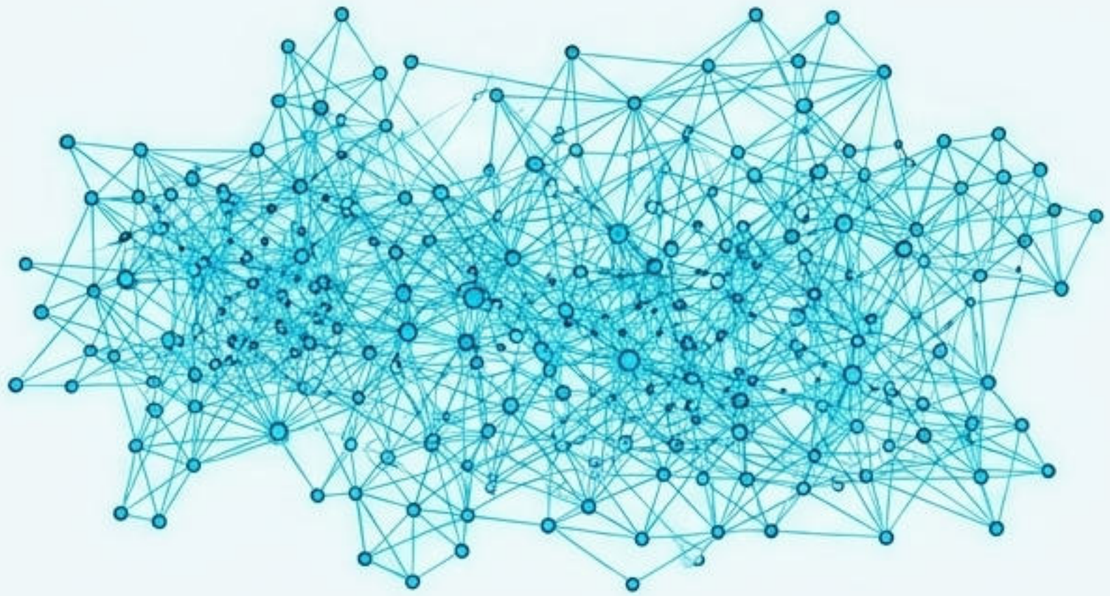
Gemini Notebook

Dimensionen und Transportphysik

Skalierung



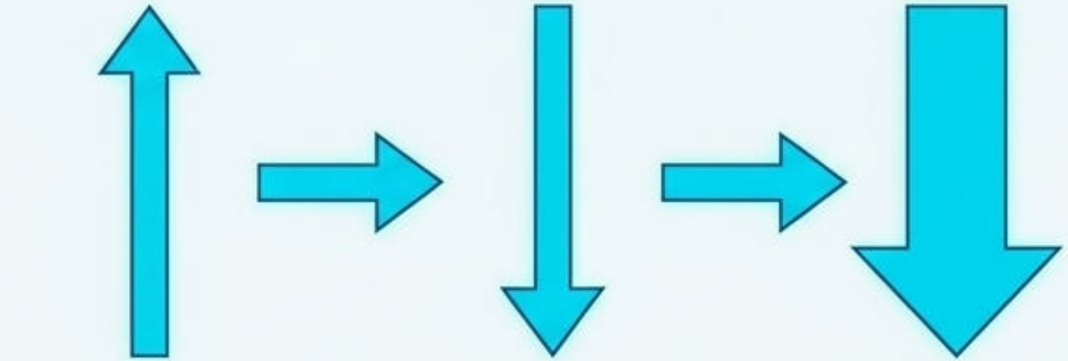
Übertragungsnetz (HöS): 35.000 km (2% der Netzlänge). Überregionaler Transport. 4 Betreiber (Amprion, 50Hertz, Transnet BW, TenneT).



Verteilnetz (HS/MS/NS): 1,6 Mio. km (98% der Netzlänge). Kleinteilige Endnutzerverteilung. 874 Betreiber.

Transportphysik

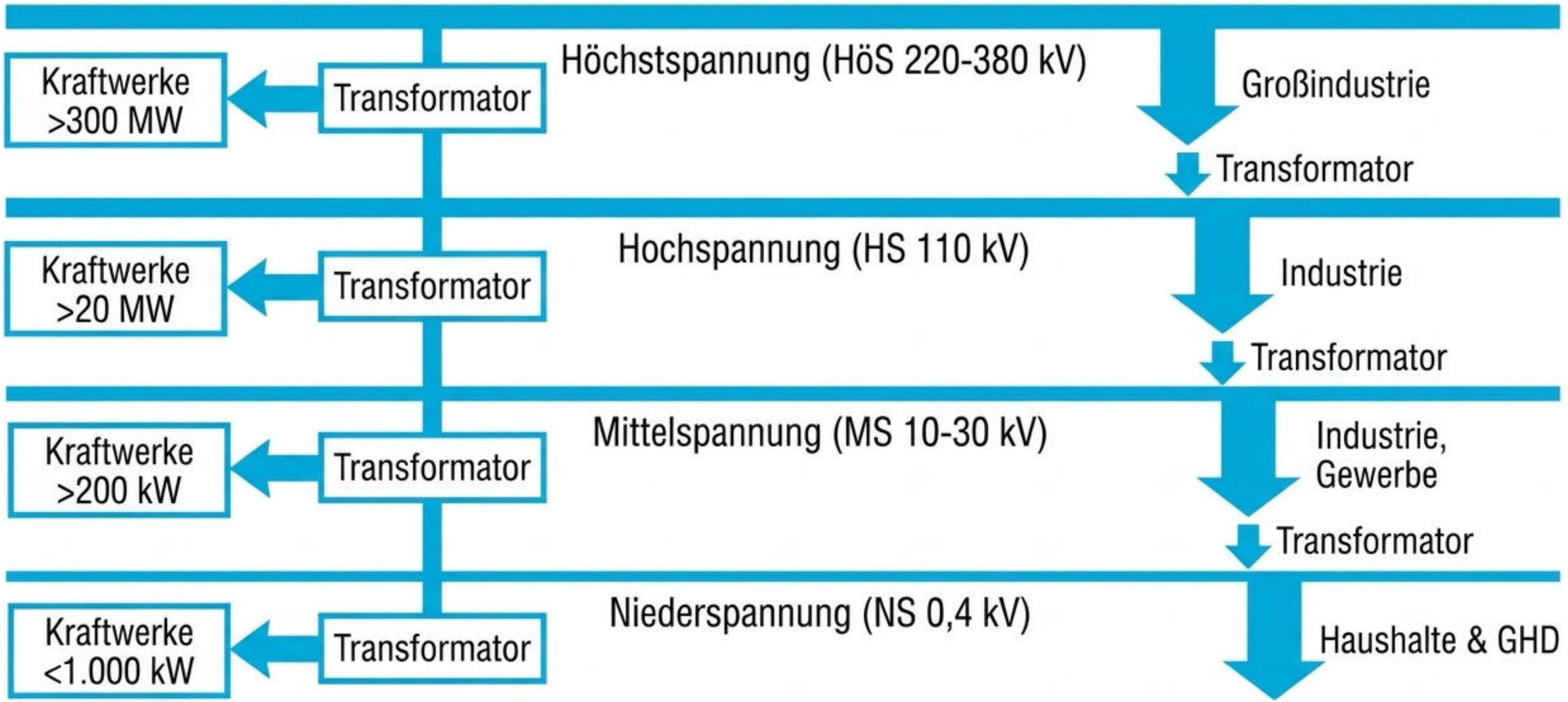
$$P_{verlust} \sim I^2 \cdot R$$



Minimierung von Verlustarbeit durch Spannungsmaximierung.

Gemini Notebook

Die Kaskade der Spannungsebenen



Gemini Notebook

Das europäische Verbundnetz & HGÜ

Verbundnetz (AC)

34 ENTSO-E Länder, 41 Regelzonen.

→ Frankreich/Tschechien: Kernenergie (Export)

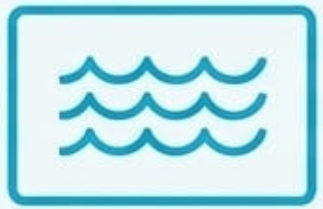
→ Norwegen: Wasserkraft (Sommer-Export)

← Italien: Gas/Öl (Import)

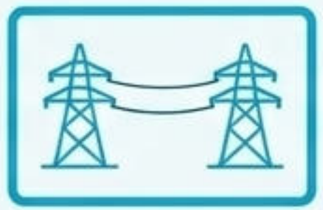
↔ Deutschland: Fluktuierende Erneuerbare (Wechselnd)

HGÜ (Hochspannungsgleichstromübertragung)

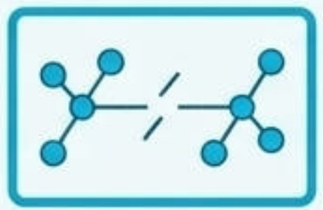
Elimination von Blindstrom für speziellen Transport.



Seekabel > 30 km
(z.B. Offshore Wind)



Überlandleitungen > 600 km

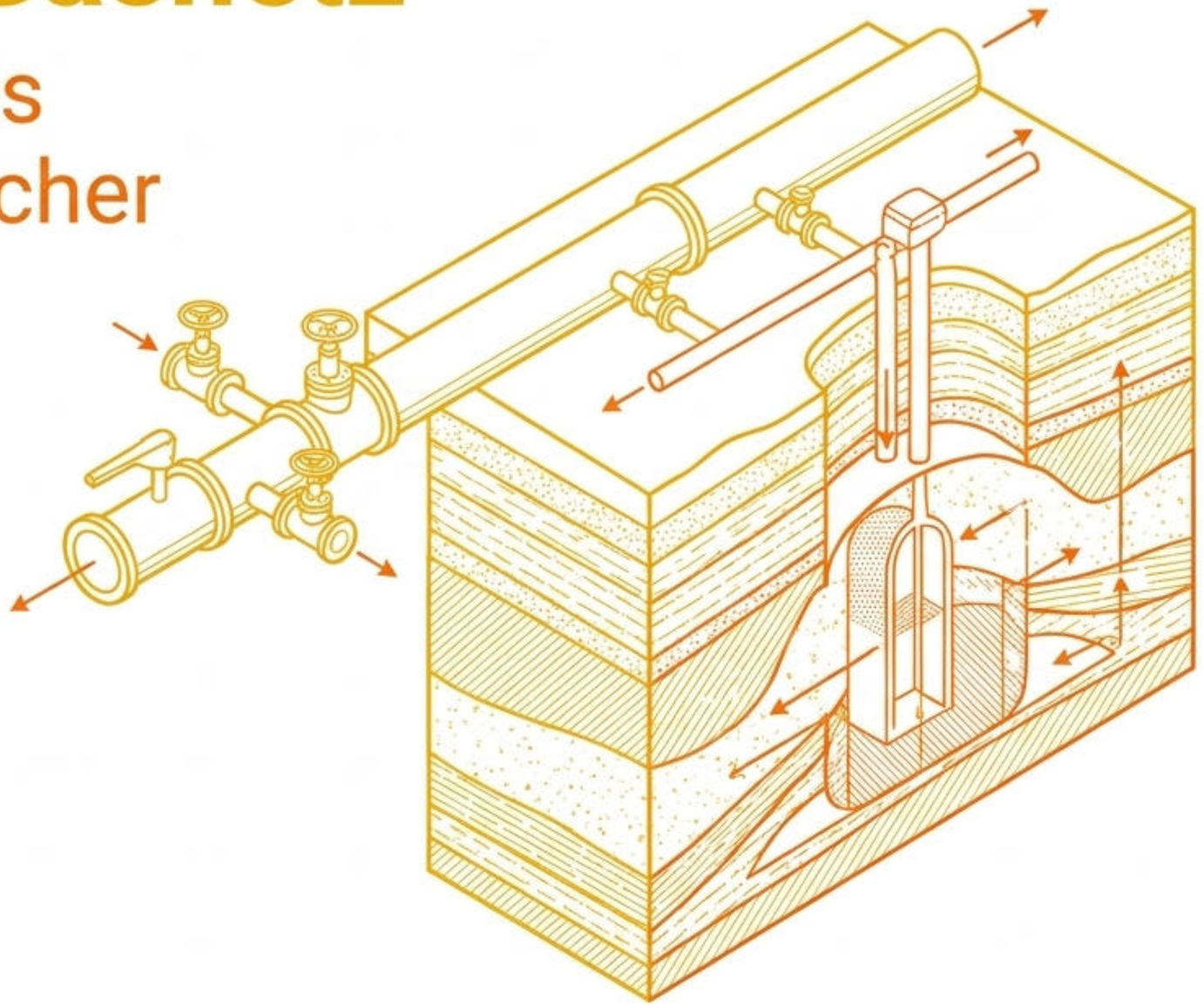


Verknüpfung nicht synchronisierter Verbundnetze

Gemini Notebook

Kapitel 3: Das Gasnetz

Druckstufen, Pipelines und gigantische Speicher



Gemini Notebook

Anatomie des Gasnetzes: Die Druck-Kaskade

Fernleitung (100 bar onshore / 200 bar offshore)

Distanz: bis 6.000 km. Durchmesser: bis 1,4 m. Verdichteranlagen alle 100-200 km (0,1 bar/km Druckverlust).

↓

Übergabestation

Regionaler Transport (bis 80 bar)

Odorierung (Geruchsstoff für Lecksuche) & Energierückgewinnung durch Expansionsturbinen.

↓

Übergabestation

Regionale Verteilung (Hochdruck 1-100 bar, Mitteldruck 0,1-1 bar).

↓

Übergabestation

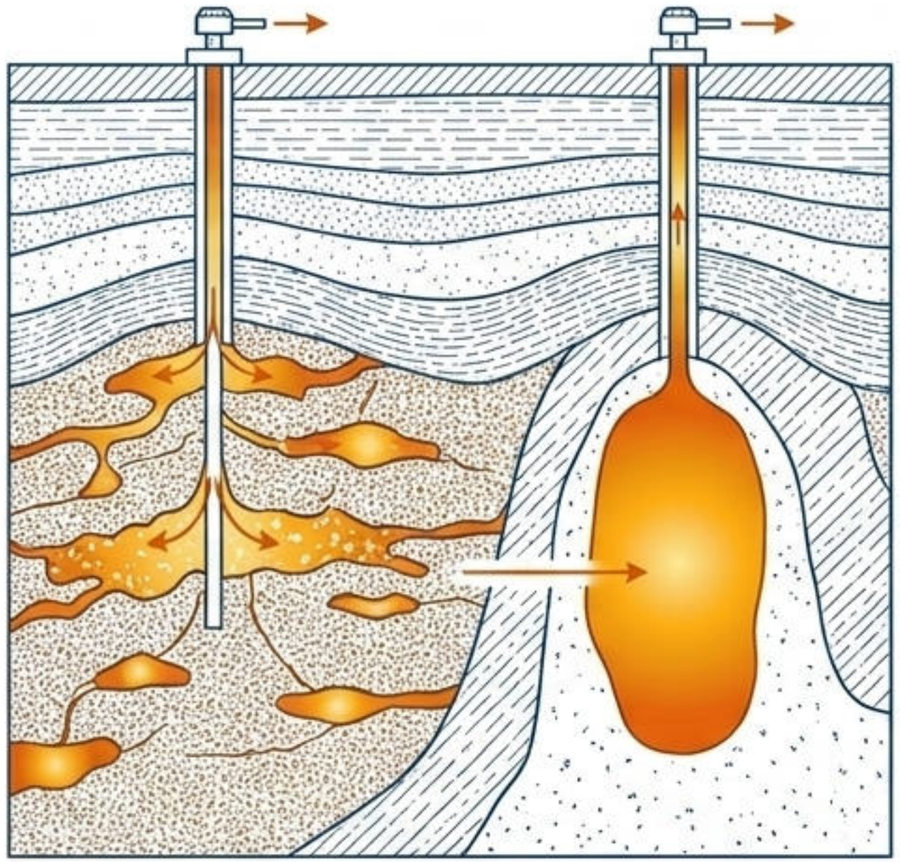
Ortsverteilung (Niederdruck 25-100 mbar)

Haushalte & GHD

Gemini Notebook

Das Gasnetz als gigantischer Speicher

Physische Speicher

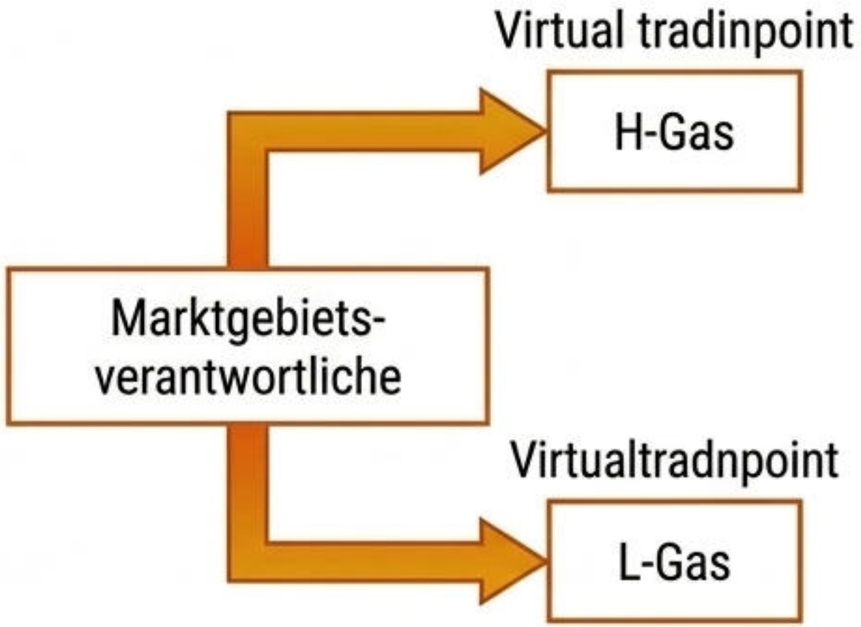


Porenspeicher Kavernenspeicher

~30 Mrd. m³
nutzbares Gas in ca. 60 Untertagespeichern.

220 TWh
thermische Kapazität (sichert deutsche Versorgung für 2–3 Monate).

Markt & Handel

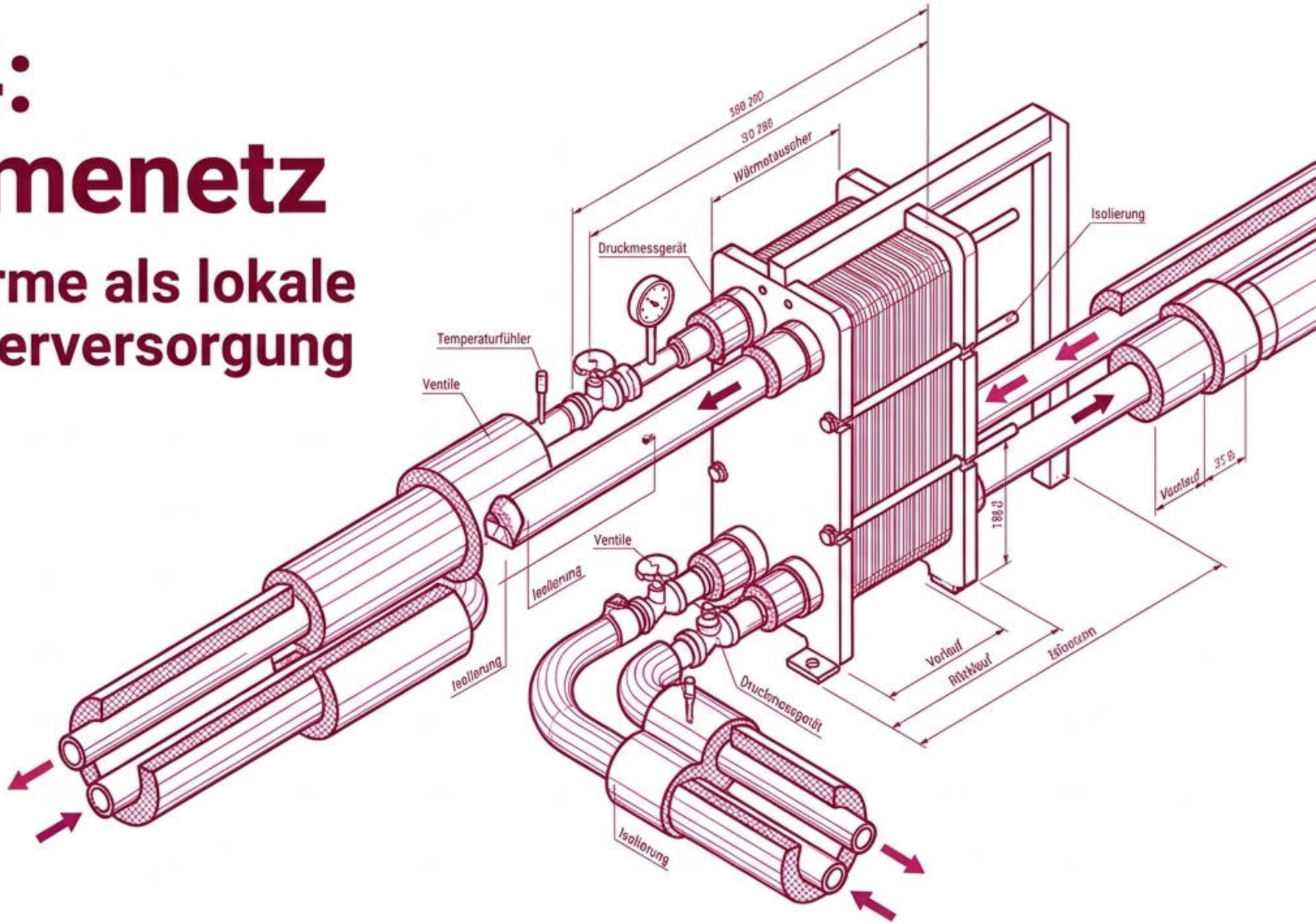


Handel erfolgt kapazitätsfrei. Gemanagt durch über 800 regionale Gasversorger und 16 Fernleitungsnetzbetreiber.

Gemini Notebook

Kapitel 4:
Das Wärmenetz

Fern- & Nahwärme als lokale Letztverbraucherversorgung



Gemini Notebook

Topologie der Wärme & Das Zweileitersystem

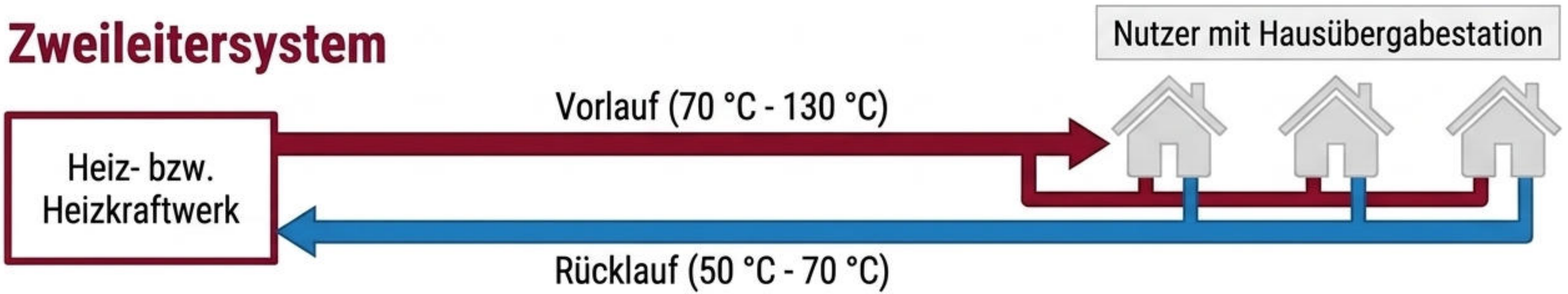
Topologie (Lokale Inselnetze)



Im Gegensatz zu Strom/Gas ein Netz aus “Inseln”.
25.000 km Trassenlänge auf 1.400 Einzelnetze verteilt.

87.384 GWh/a Einspeisung (71% aus KWK).
14% Leitungsverluste.

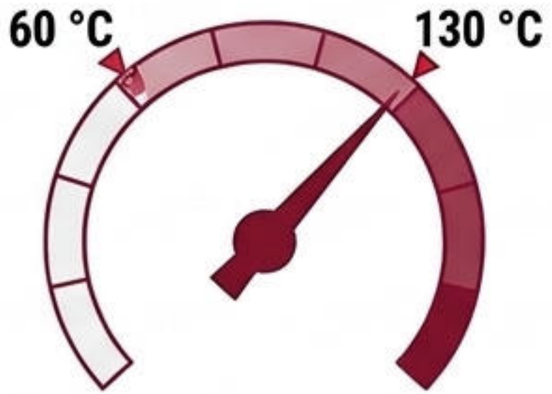
Zweileitersystem



Gemini Notebook

Thermische und hydraulische Systemgrenzen

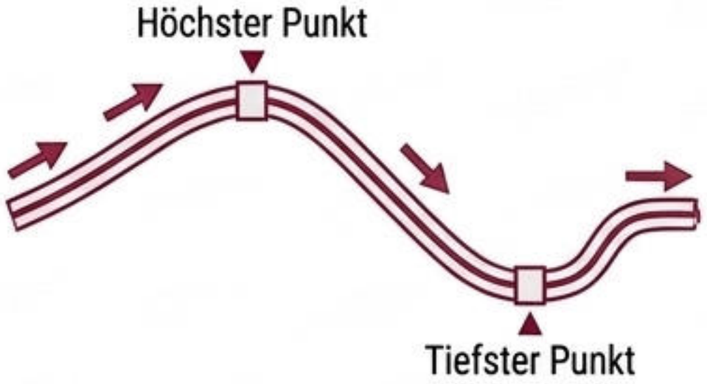
Temperatur-Grenzen



Maximal: 130 °C. Limitiert durch die Polyurethan-Dämmung der Kunststoffmantelrohre.

Minimal: 60 °C am Hausanschluss. Zwingend für den Legionellenschutz im Brauchwasser.

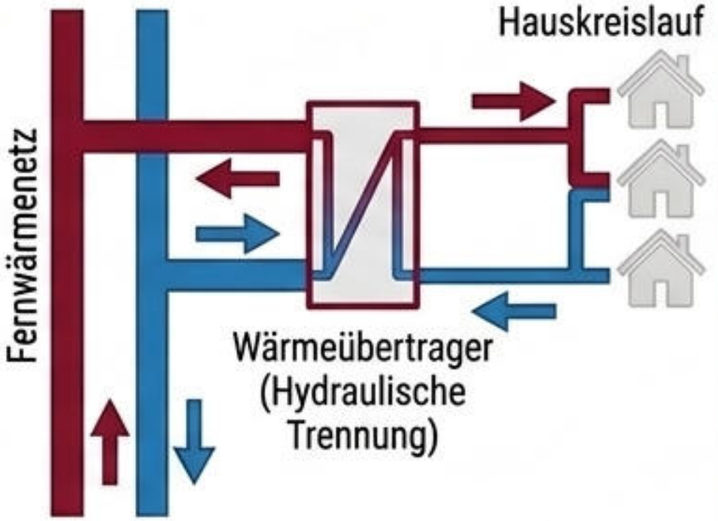
Druck-Management



Nenndruck (PN): Maximaldruck am tiefsten geodätischen Punkt (Druckstoß-Sicherheit).

Ruhedruck: Druck am höchsten Punkt + Sattdampfdruck (verhindert Ausgasen bei Pumpenausfall).

Die Hausübergabestation (Indirekte Übergabe)



Schützt den Hauskreislauf vor dem hohen Druck und den hohen Temperaturen des Fernwärmenetzes.

Gemini Notebook

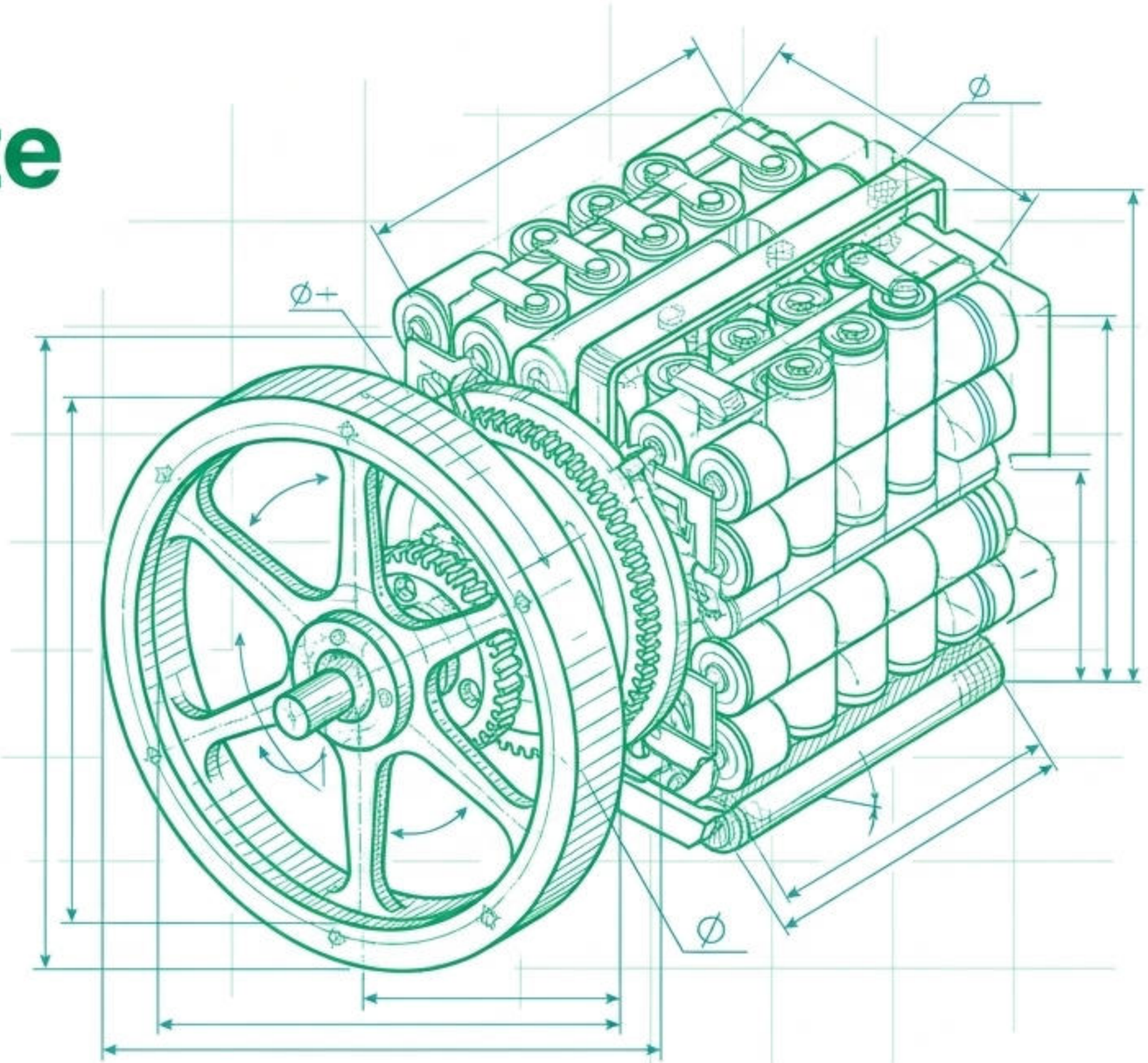
SYNTHESE-MATRIX: Die Netze im Vergleich

	Stromnetz	Gasnetz	Wärmenetz
Trassenlänge	1,6 Mio. km	~530.000 km	~25.000 km
Transportmedium	Elektronen	CH4 Moleküle	Heißwasser / Dampf
Speicherfähigkeit	Minimal (benötigt externe Puffer)	Gigantisch (220 TWh, Monate)	Gering (kurzfristiger thermischer Puffer)
Topologie/ Reichweite	Kontinentales Verbundnetz	Kontinentales Netz (druckbasiert)	Lokale, getrennte Inselnetze
Hauptverlustquelle	Ohm'scher Wärmeverlust	Druckverlust (0,1 bar/km)	Wärmeverlust an Umgebung (14%)

Gemini Notebook

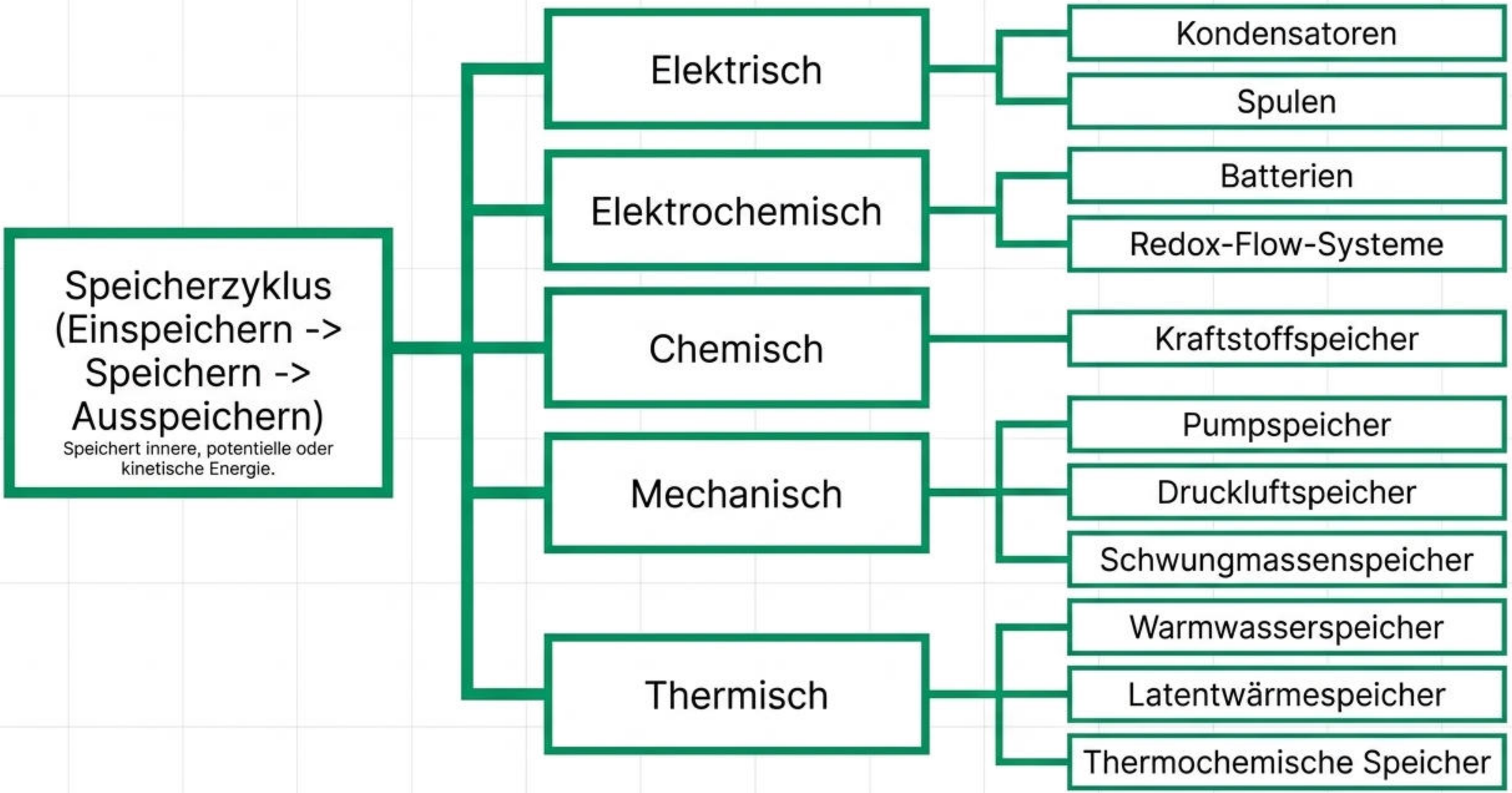
Kapitel 5: Sektorenintegrierte Energiespeicher

Die Pufferung von Zeit und Physik



Gemini Notebook

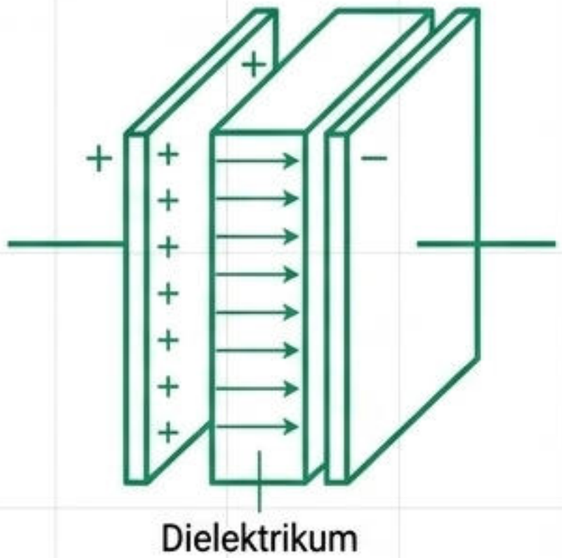
Taxonomie der Speichertechnologien



Gemini Notebook

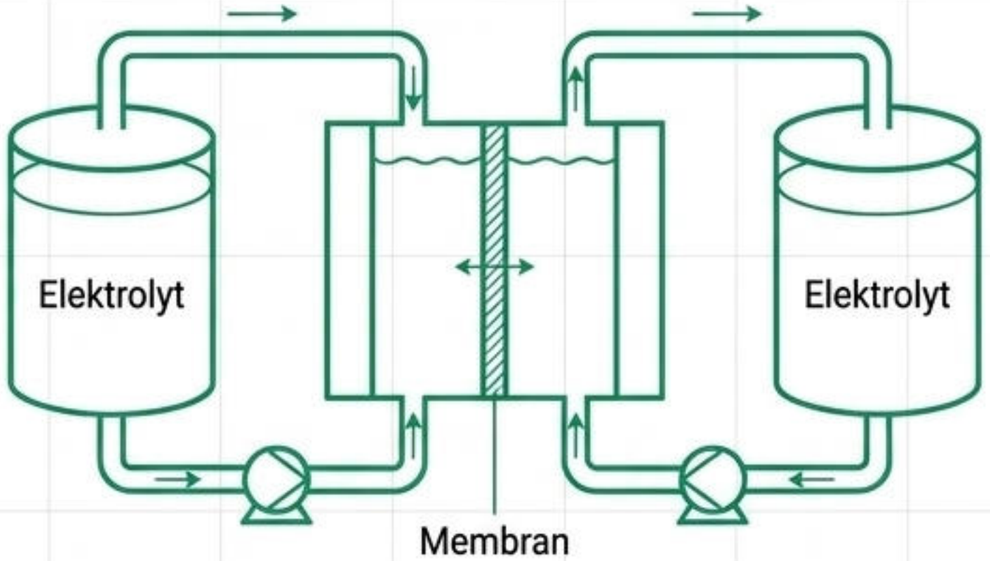
Elektrisch & Elektrochemisch: Leistung vs. Skalierbarkeit

Der **Kondensator** (Elektrisch)



Physik: Direkte Speicherung elektrischer Ladung im elektromagnetischen Feld.
Eigenschaft: Extrem schnelle Be-/Entladung, 90-95% Wirkungsgrad, bis zu 1 Mio. Zyklen. Sehr geringe Energiedichte.
Eigenschaft: Extrem schnelle Beniltladung,
Einsatz: Kurzfristige Regelleistung, Pitch-Control in Windkraftanlagen.

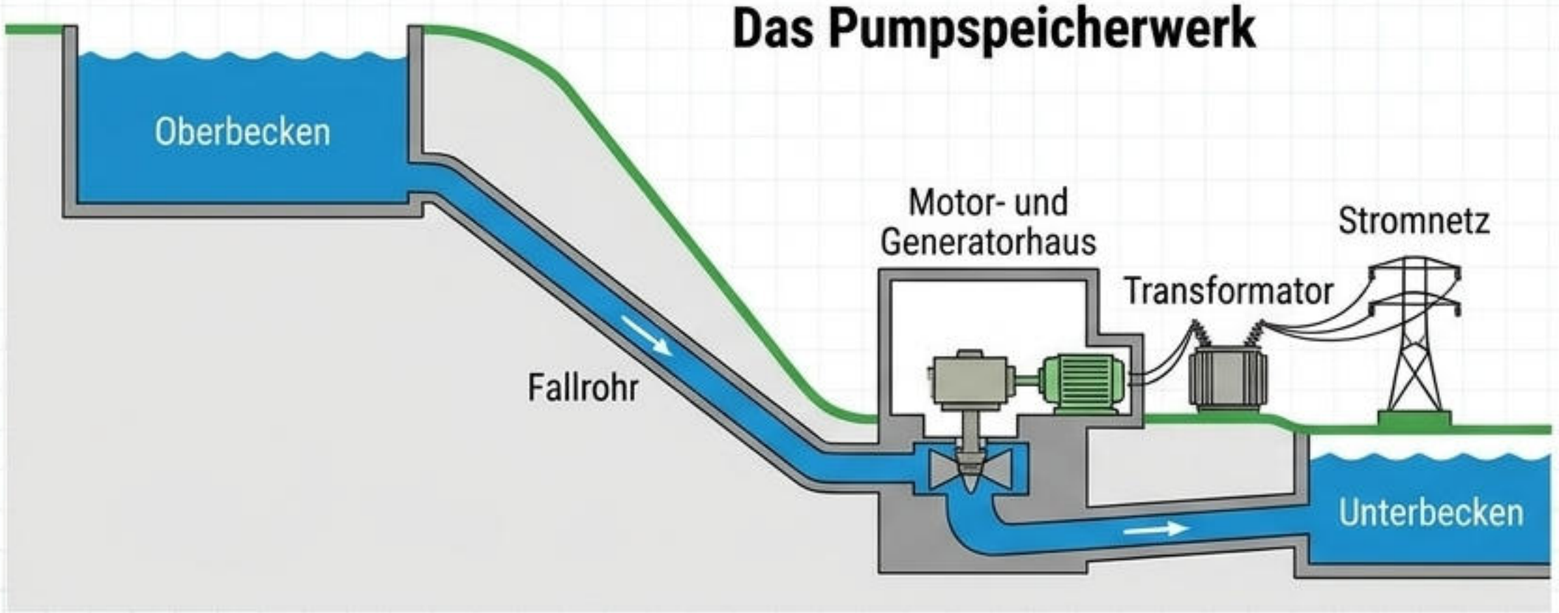
Die **Redox-Flow-Batterie** (Elektrochemisch)



Physik: Speicherung erfolgt nicht in festen Elektroden, sondern in flüssigen Elektrolyten (z.B. Vanadiumsulfat).
Eigenschaft: Leistung (Zelle) und Kapazität (Tankvolumen) sind völlig unabhängig voneinander skalierbar.
Einsatz: Mittel- und Langzeitspeicher, industrieller Lastspitzenausgleich.

Gemini Notebook

Mechanische Großspeicher & Performance-Matrix



Wirkungsgrad: ~83%.

Erprobteste Form der großtechnischen Energiespeicherung.

Nachteil: Erheblicher Eingriff in Natur und Topografie.

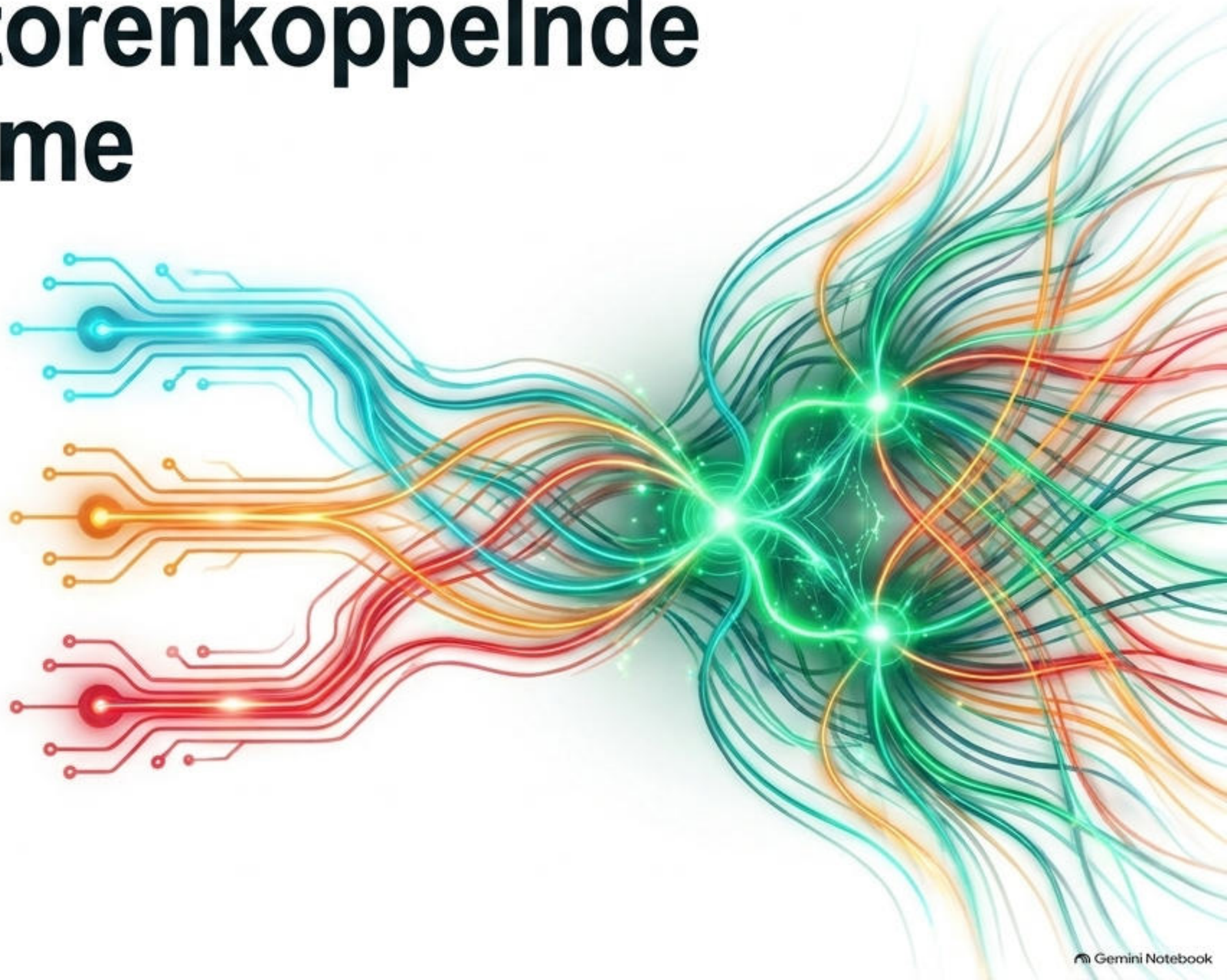
Matrix der Speicher-Performance (Auswahl)

Technologie	Energiedichte (Wh/kg)	Wirkungsgrad (%)	Lebensdauer (Zyklen)
Kondensator	0,1 - 10	90 - 95	1 Mio.
Redox-Flow-Batterie	16 - 41	70 - 79	7.000 - 15.000
Pumpspeicherwerk	0,3 - 0,4	70 - 82	12.800 - 33.000
Latentwärmespeicher	49 - 97	75 - 90	5.000

Gemini Notebook

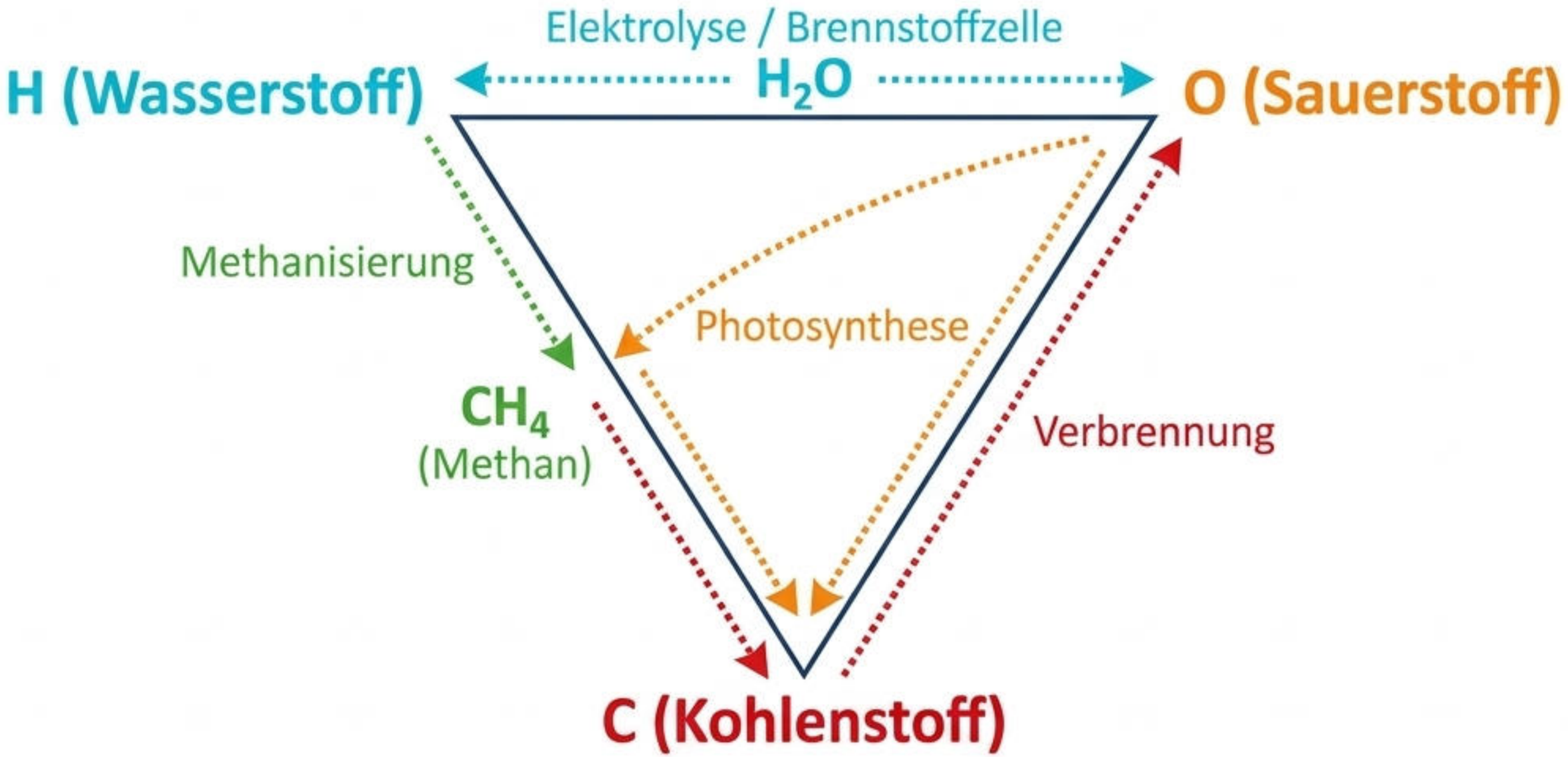
Kapitel 6: Sektorenkoppelnde Speichersysteme

Von isolierten Silos zur System-Synergie



Gemini Notebook

Chemische Speicher als Brücke (Power-to-X)

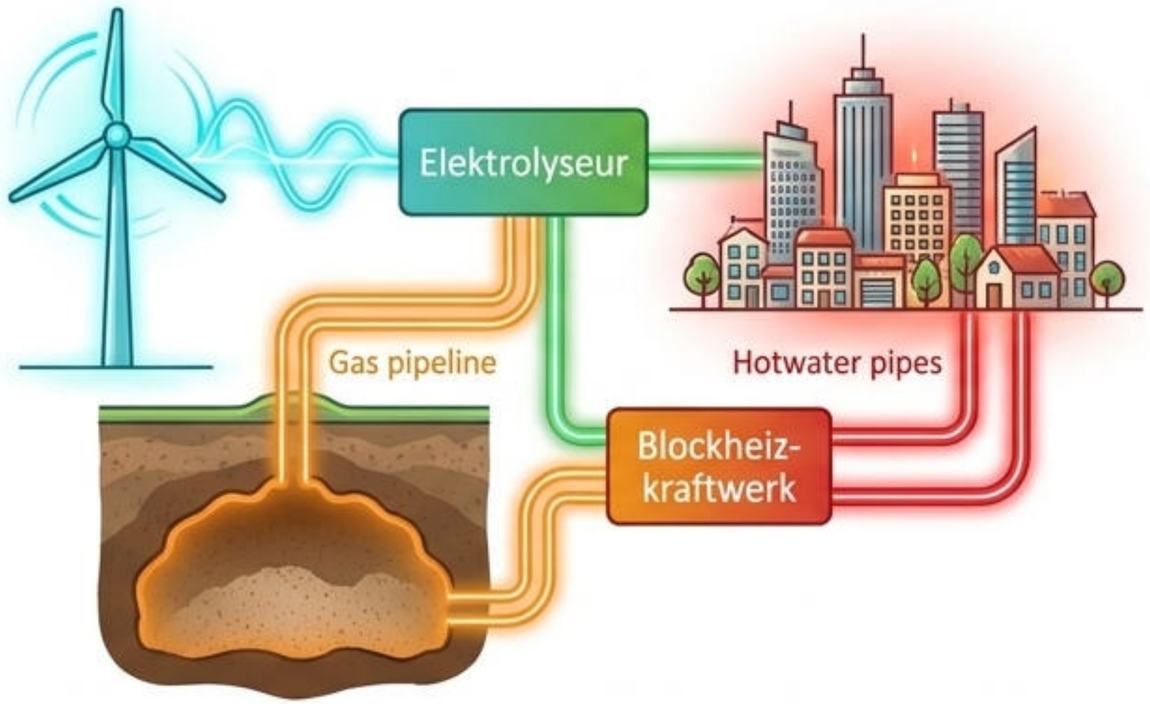


Chemische Speicher überwinden die Sektorengrenzen. Power-to-Gas wandelt Strom in Wasserstoff (Elektrolyse) oder Methan. Dadurch kann elektrische Energie in der massiven Gasinfrastruktur gespeichert und für Wärme oder Mobilität genutzt werden.

Gemini Notebook

Das Smart Grid & Zusammenfassung

Das kommunizierende Ökosystem



Die Zukunft ist kein paralleles Leitungsnetz, sondern ein Smart Grid: Ein kommunizierendes Ökosystem aus Erzeugung, Speicherung und intersektoralem Verbrauch.

Lernziele erreicht

- ☒ Rolle und Eigenschaften von Netzinfrastrukturen (Strom, Gas, Wärme) interpretiert.
- ☒ Technisch-physikalische Grenzen zur Bewertung von Energiekonzepten angewendet.
- ☒ Sektorenintegrierte Speichertaxonomie anwendungsspezifisch erarbeitet.
- ☒ Sektorenkopplung als Lösung für Fluktuation und Versorgungssicherheit verstanden.

Gemini Notebook