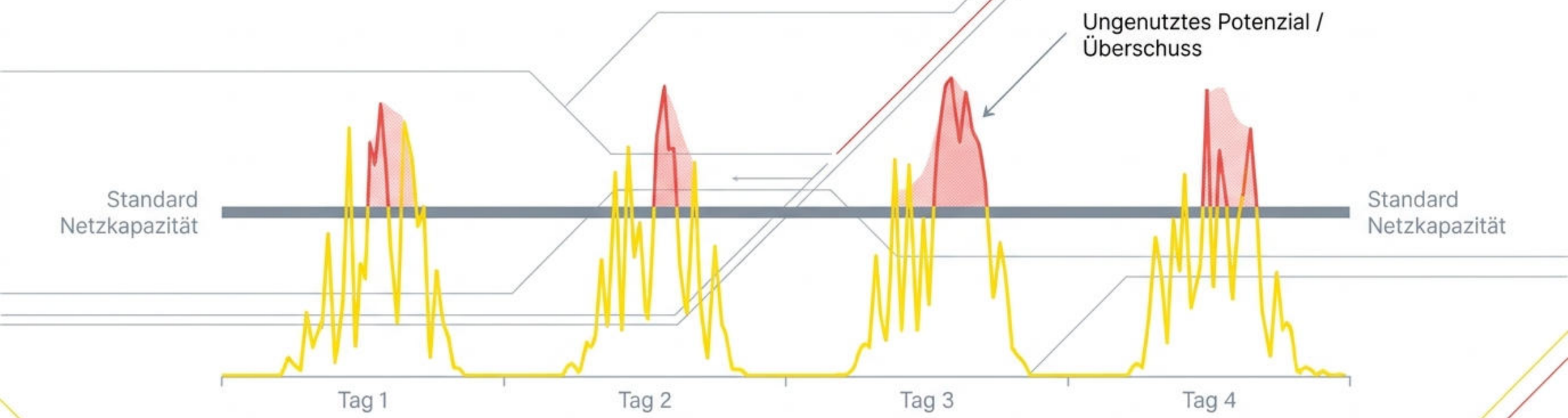
Die Architektur der Energiewende durch Sektorenkopplung

Technologien, Wirkungsgrade, Kosten und systemische Potenziale

Gemini Notebook

Volatile erneuerbare Energien überlasten starre Netzstrukturen



Die Herausforderung:
Extrem volatile Energiebereitstellung (PV und Windkraft) führt zu Überschüssen.

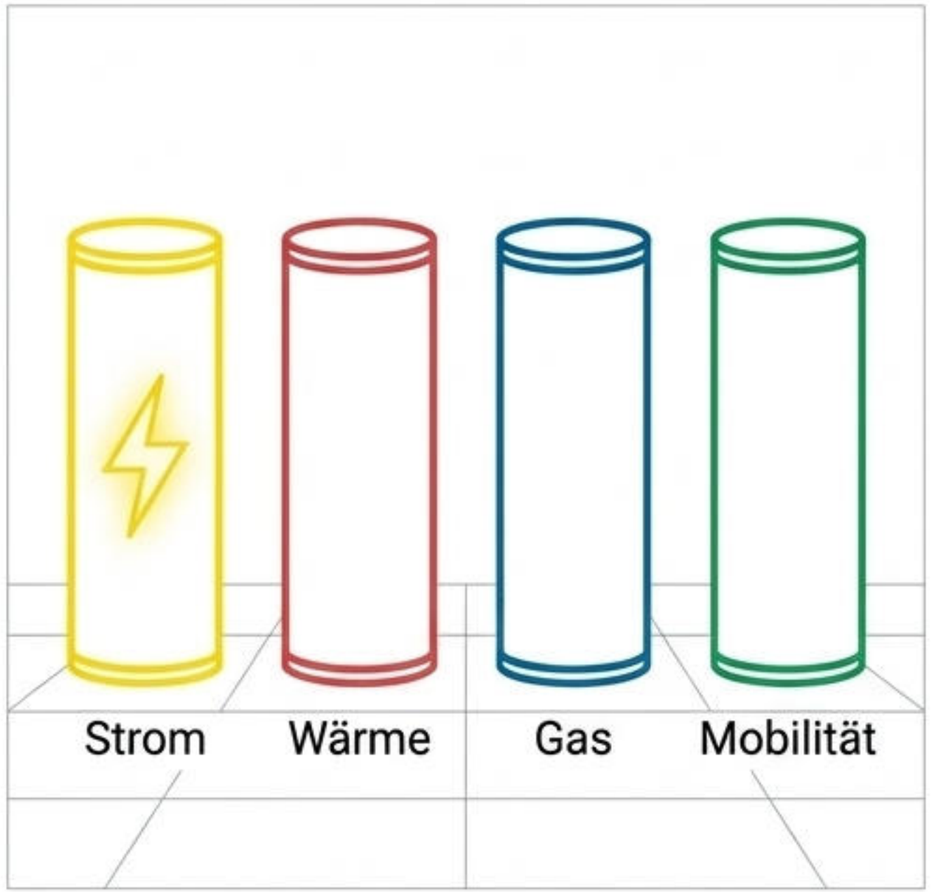
Der Netzengpass:
Orts- und zeitspezifischer Zubau verursacht Herausforderungen in regionalen Verteil- und Übertragungsnetzen.

Die Konsequenz:
Erneuerbarer Strom muss jederzeit in andere Sektoren übertragen und gespeichert werden können, um die Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erreichen.

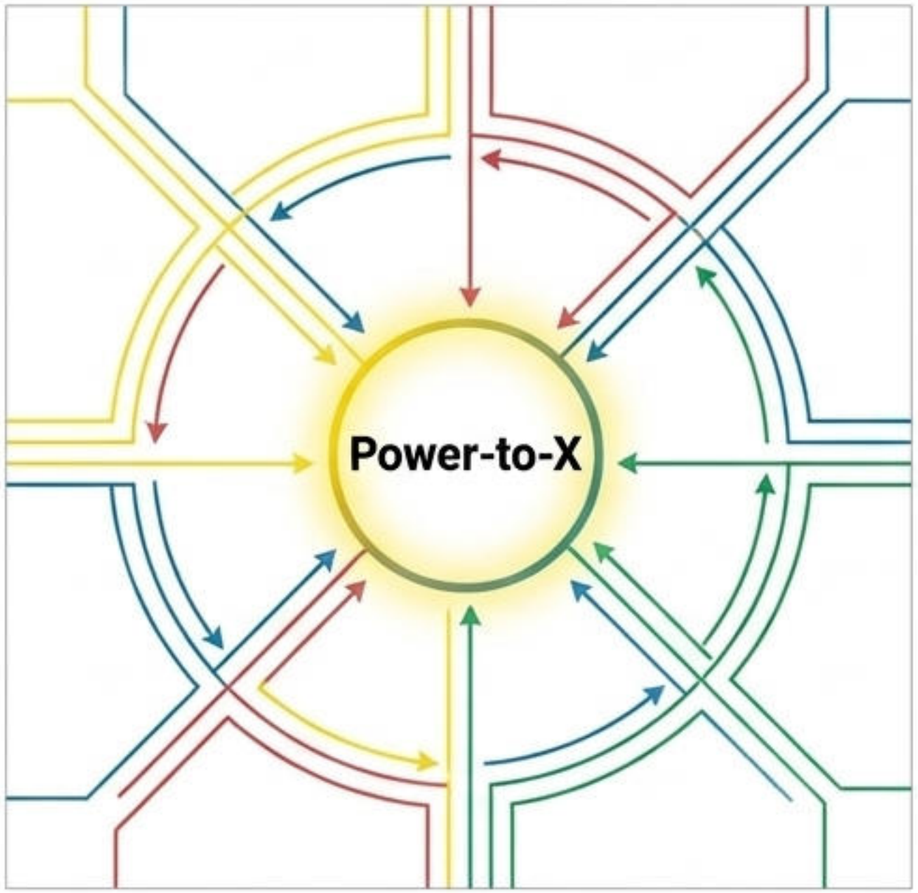
Gemini Notebook

Sektorenkopplung vernetzt isolierte Verbraucher zur intelligenten Speicherung

Status Quo



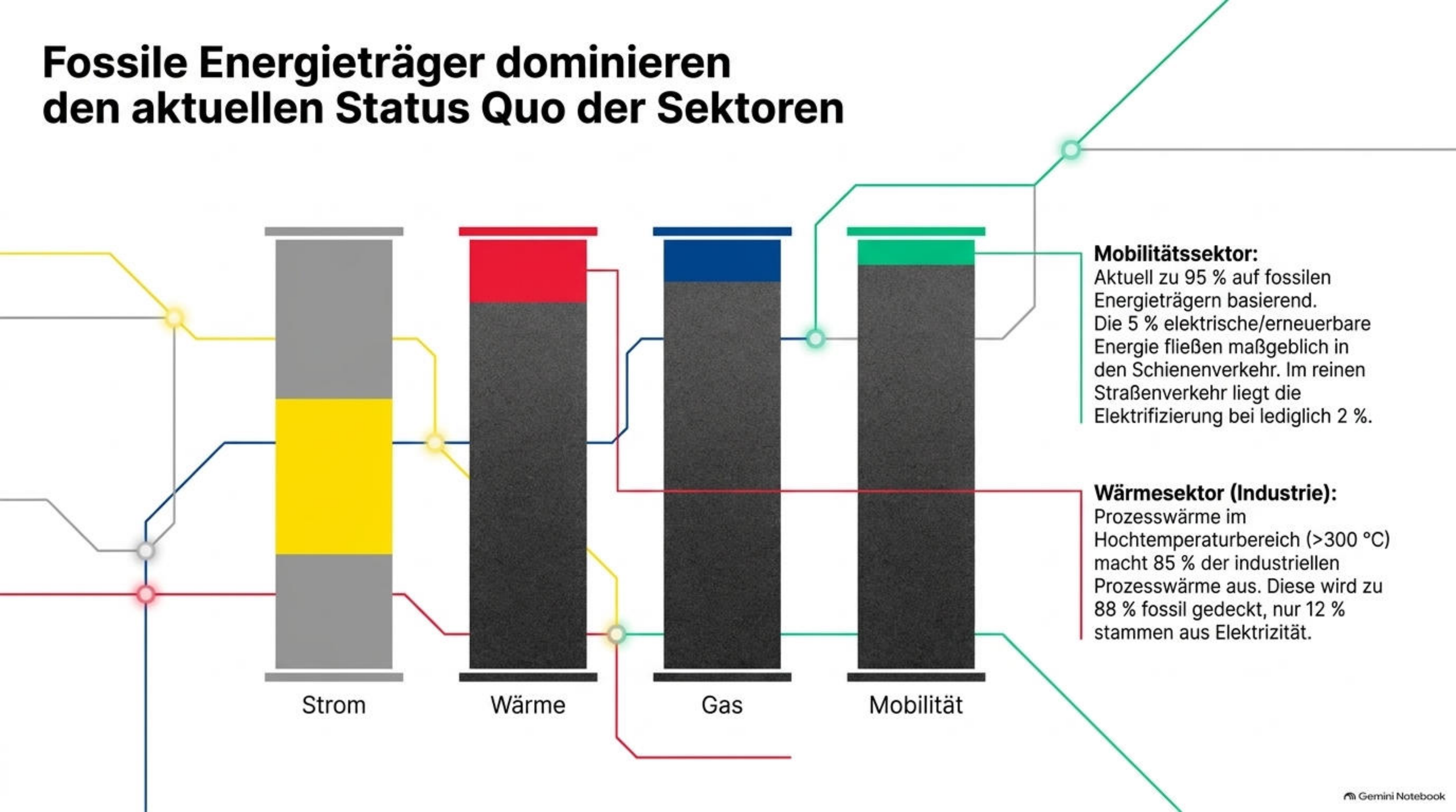
Sektorenkopplung



- **Definition:** Die systematische Verbindung der Sektoren Strom, Wärme, Gas und Mobilität.
- **Ziel 1 (Speicherung):** Überschüssige elektrische Energie wird durch Wandlung in anderen Sektoren gespeichert.
- **Ziel 2 (Integration):** Maximierung des Anteils erneuerbarer Energien im Gesamtsystem.
- **Ziel 3 (Effizienz):** Effizientere Nutzung von Primärenergie über Branchengrenzen hinweg.

Gemini Notebook

Fossile Energieträger dominieren den aktuellen Status Quo der Sektoren

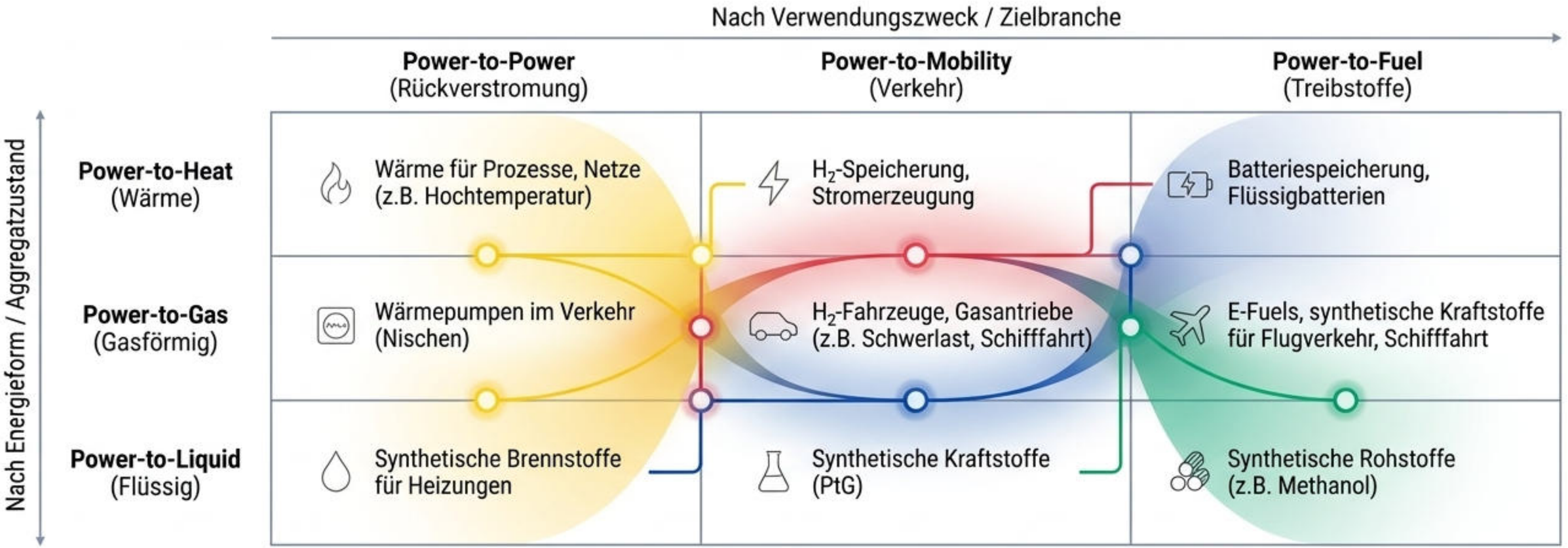


Mobilitätssektor:
Aktuell zu 95 % auf fossilen Energieträgern basierend. Die 5 % elektrische/erneuerbare Energie fließen maßgeblich in den Schienenverkehr. Im reinen Straßenverkehr liegt die Elektrifizierung bei lediglich 2 %.

Wärmesektor (Industrie):
Prozesswärme im Hochtemperaturbereich (>300 °C) macht 85 % der industriellen Prozesswärme aus. Diese wird zu 88 % fossil gedeckt, nur 12 % stammen aus Elektrizität.

Gemini Notebook

Power-to-X dient als universelles Bindeglied zwischen den Energieformen



Fließende Grenzen: Die Abgrenzungen der Technologien sind nicht starr (z. B. überschneiden sich Power-to-Mobility und Power-to-Fuel fließend).

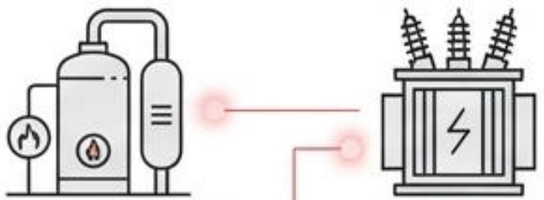
Zusatzmedien: Power-to-Solid & Power-to-Chemicals sind weitere wesentliche Zielmedien (z.B. für die stoffliche Nutzung in der chemischen Industrie).

Die Rolle der Wandlung: Jede X-Technologie befähigt volatile Anlagen, Strom dauerhaft stofflich oder thermisch zu speichern.

Gemini Notebook

Power-to-Heat realisiert die schnellste und verlustärmste Kopplung





Wärme

Gebäudeebene

Wärmepumpen: Hocheffiziente Kopplung von Strom, Umweltenergie und Wärmesektor.

Speicherkapazität: Große thermische Gebäudespeicher eignen sich hervorragend für flexible Stromeinspeisungen.

Industrie & Wärmenetze

Elektrodenkessel: 5 bis 90 MW Leistung. Transformatorfreier Anschluss an die Mittelspannung. Investition: 150 bis 350 €/kW.

Elektrokessel (Heizstab-basiert): 10 kW bis 15 MW Leistung. Investition: 75 bis 200 €/kW.

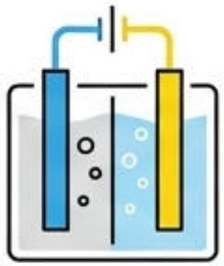
Brennstoffzellen-BHKW (Power-to-Heat & Power): 1 bis 100 kW. Bieten gleichzeitige Wärme- und Strombereitstellung (Versorgungssicherheit). Aktuell meist über Erdgas/Reformer betrieben.

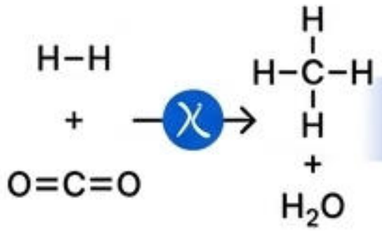
PtH-Anlagen ermöglichen die aktive Teilnahme am Primär- und Sekundärenergiemarkt (Regelenergie).

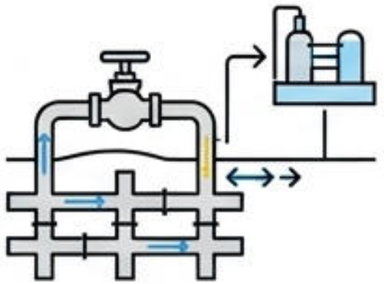
Gemini Notebook

Power-to-Gas überführt Elektrizität in speicherbare Moleküle









1. Input

Erneuerbarer Strom + Wasser.

2. Wasserelektrolyse (H_2)

Teillastfähige Systeme produzieren flexibel Wasserstoff. Gesamtwirkungsgrad der H_2-Bereitstellung: 55 % bis 65 %. Wasserstoff steht zur Verdichtung/Verflüssigung bereit.

3. Methanisierung (CH_4)

Unter katalytischer Einbindung von CO_2 wird synthetisches Erdgas erzeugt.

4. Integration

Einspeisung in das bestehende Erdgasnetz, Speicherung oder Weiterverarbeitung zu flüssigen Kohlenwasserstoffen (Power-to-Liquid).

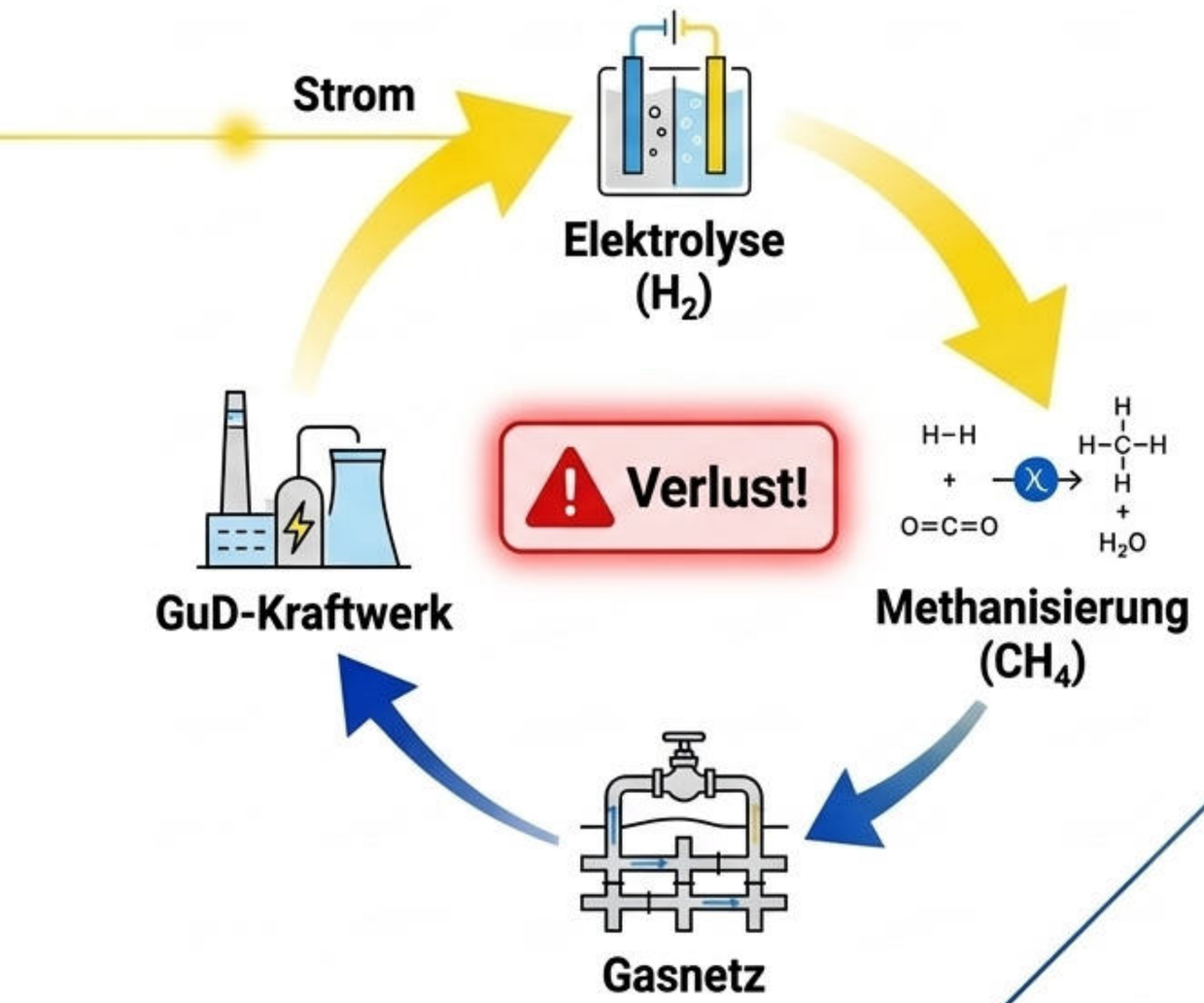
Gemini Notebook

Elektrolyse-Technologien unterscheiden sich signifikant in Kosten und Reife

	Alkalische Elektrolyse (AEL)	Polymer-Elektrolyt-Membran (PEMEL)	Feststoff-Oxid-Elektrolyse (SOEL)
Wirkungsgrad	bis 79 %	bis 79 %	Hochtemperatur, in Entwicklung
Investitionskosten	1.000 bis 1.200 €/kW	1.500 bis 2.300 €/kW (deutlich kostenintensiver)	voraussichtlich > 2.500 €/kW
Ausgangsdruck	50 bis 100 bar	bis 350 bar	N/A
Marktstatus	Etabliert ✅	Kommerziell verfügbar ✅	Vor Markteintritt ⏳

Gemini Notebook

Längere Wandlungsketten reduzieren den Gesamtwirkungsgrad drastisch



Power-to-Liquid (PtL): Verflüssigung von Gasen oder Synthetisierung langkettiger Kohlenwasserstoffe zur Produktion flüssiger Treibstoffe.

Power-to-Power (PtP): Die längste Wandlungskette der Sektorenkopplung.

Der **Effizienzverlust**: Elektrochemische Akkumulatoren erreichen bis zu 80 % Wirkungsgrad. Wird Strom jedoch methanisiert und über ein GuD-Kraftwerk rückverstromt, fällt der Wirkungsgrad auf lediglich 25 % bis 30 %.

Fazit: Der Umweg über Moleküle ist energetisch teuer und sollte für Sektoren reserviert werden, die sich nicht direkt elektrifizieren lassen.

Gemini Notebook

Power-to-Mobility bietet drei technische Pfade mit starken Effizienzunterschieden

Direkte Elektrifizierung (Akkumulatoren)

Prinzip: Direkte Nutzung von Strom im Fahrzeug.

Charakteristik: Kürzeste Kette, höchster Wirkungsgrad (bis zu 80 %).

Brennstoffzelle (Wasserstoff)

Prinzip: Power-to-Gas (H2) -> Power-to-Tank.

Charakteristik: Rückverstromung im Fahrzeug. Der Wirkungsgrad der Brennstoffzellen-basierten Nutzung liegt bei ca. 60 %.

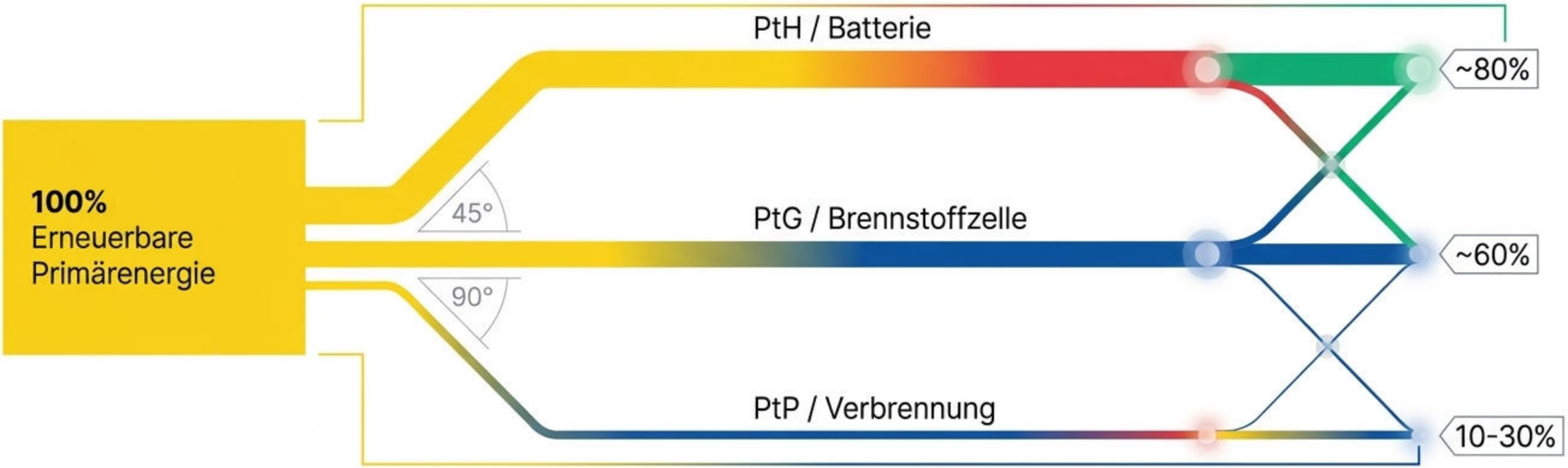
Verbrennungsmotor (Methan / H2)

Prinzip: Power-to-Gas (CH4/H2) als Kraftstoff im Verbrennungsantrieb.

Charakteristik: Aufgrund der geringen Motorwirkungsgrade nur ca. 10 % Gesamtwirkungsgrad. Zudem können durch hohe Temperaturen und Lufteinbindung umweltschädliche Stickoxide (NOx) entstehen.

Gemini Notebook

Die thermodynamische Wirkungsgrad-Kaskade diktiert die Priorisierung

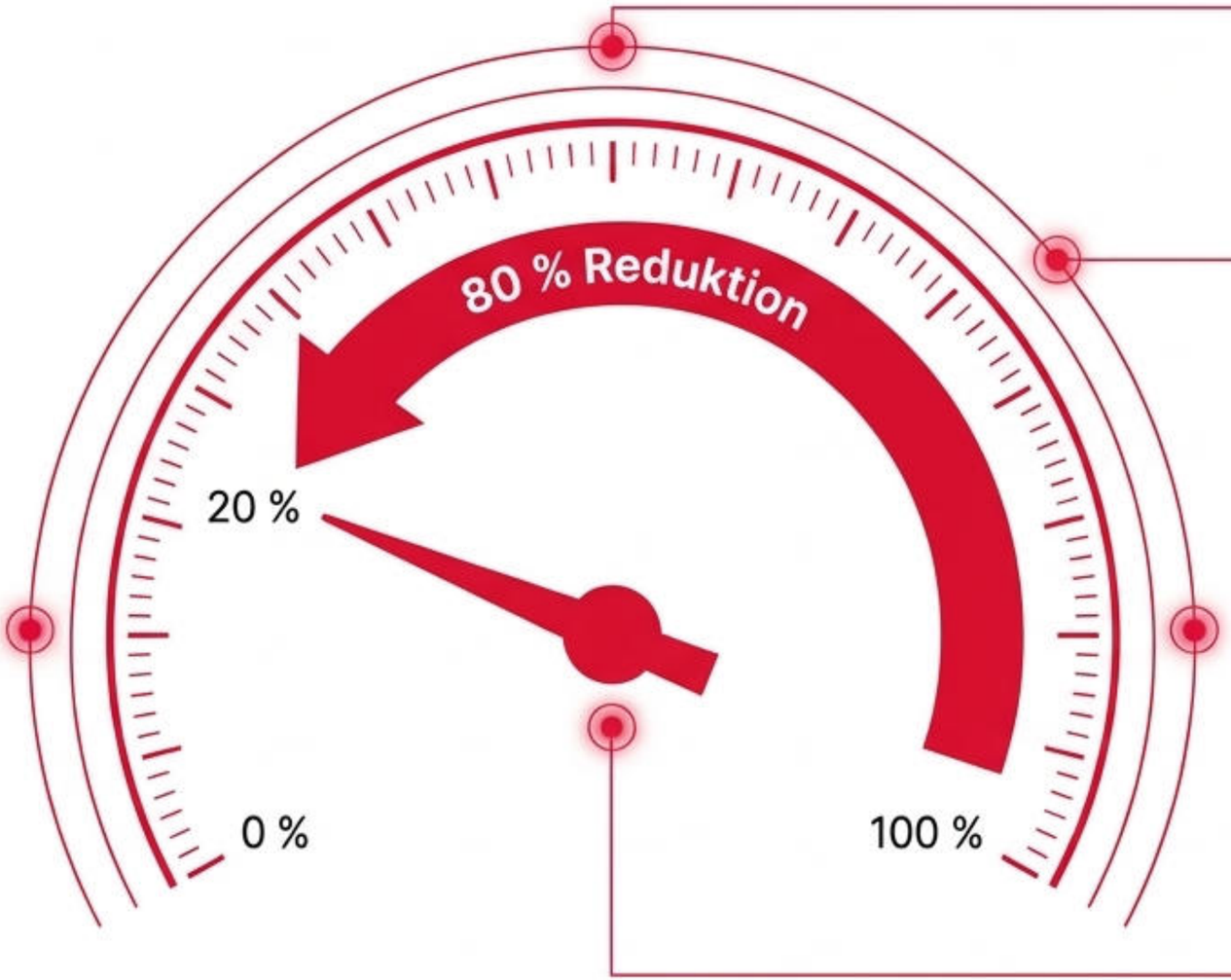


Physikalisches Gesetz:
Jeder Wandlungsschritt in der Power-to-X Kette kostet Energie.

Die Konsequenz für das System:
Direkte Elektrifizierung (Power-to-Heat und batterieelektrische Power-to-Mobility) muss aufgrund physikalischer Einschränkungen im ersten Schritt priorisiert werden, um Primärenergie effizient zu nutzen.

Gemini Notebook

Intelligente Kopplung erschließt gewaltige Einsparpotenziale im Wärmesektor



Der Status Quo:
Der Wärmesektor (Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme, Kälte) verantwortet 55,85 % des deutschen Endenergiebedarfs.

Das Reduktionspotenzial:
Durch die Kombination von Gebäudesanierung (Dämmung) und der Integration von Wärmepumpen / Elektroheizungen lässt sich der Energiebedarf für Raumwärme drastisch senken – eine Reduktion des Bedarfs um bis zu 80 % ist möglich (Raumwärmebedarf sinkt auf 27 % des heutigen Wertes).

Die industrielle Hürde:
Industrielle Prozesswärme >300 °C ist ohne Power-to-Gas in kurzer Zeit kaum auf erneuerbare Energien umzustellen.

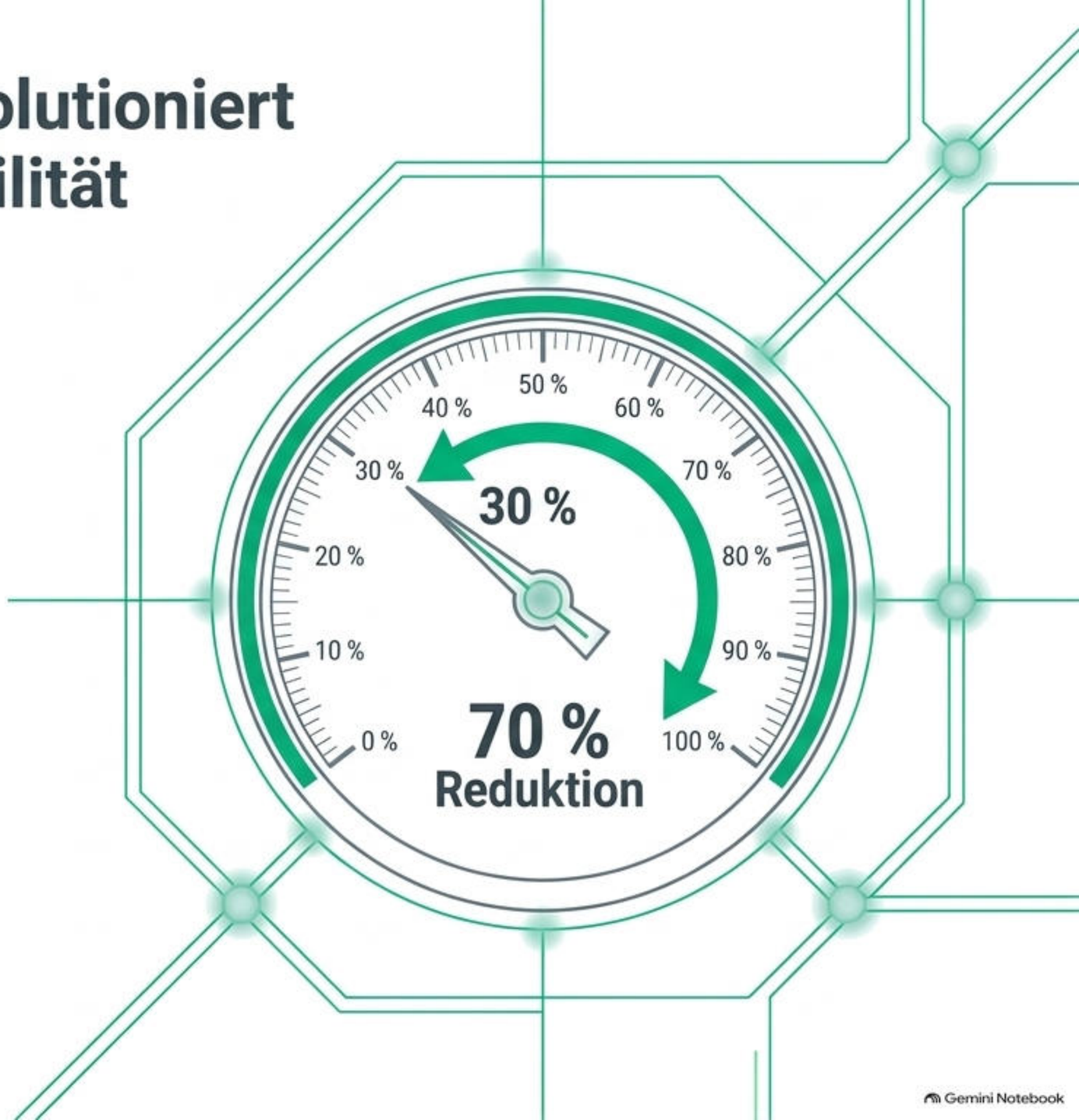
Gemini Notebook

Direkte Elektrifizierung revolutioniert den Energiebedarf der Mobilität

Der Status Quo:
Mechanische Energie stellt mit 38,62 % den zweitgrößten Endenergiebedarf dar. Im Verkehr werden 94 % über ineffiziente Mineralölprodukte gedeckt (nur 4 % Biokraftstoffe).

Das Reduktionspotenzial:
Der reine Umstieg von thermischen Verbrennungsmotoren auf elektrische Antriebe (Akkumulatoren) führt zu massiven Effizienzgewinnen.

Die Perspektive:
Durch weitgehende Elektrifizierung und intermodale Konzepte ist eine Reduktion der Endenergiebedarfs im Verkehr um ca. 70 % (bzw. eine Reduktion auf 47 % des heutigen Bedarfs) erreichbar.



Gemini Notebook

Eine 85-prozentige erneuerbare Vollversorgung verlangt eine Verdreifachung der Stromerzeugung



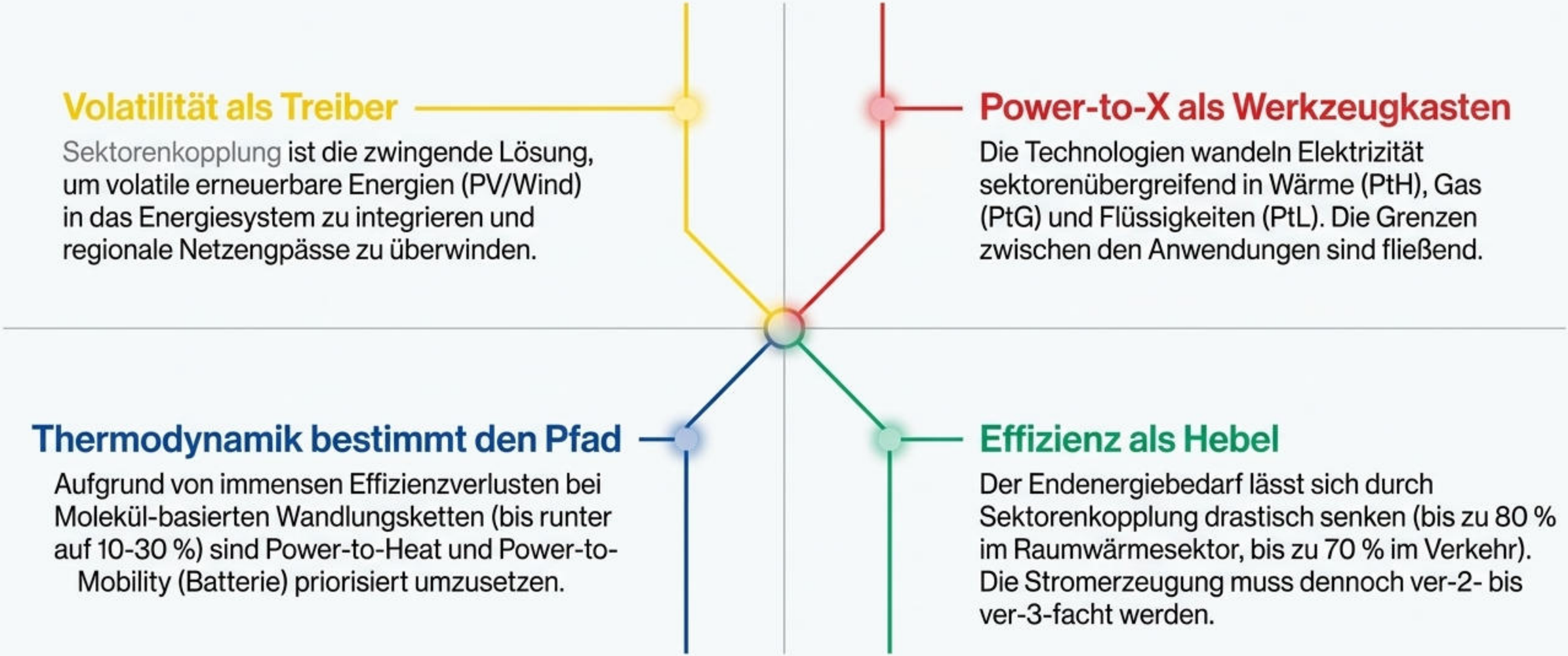
Das Machbare:
Eine regenerative Vollversorgung mit bis zu 85 % erneuerbaren Energien ist technisch realisierbar (mit Biomasse theoretisch bis zu 48 % Anteil am Endenergiebedarf).

Der Engpass:
Der Anteil der Elektrizitätsbereitstellung in Industrieländern liegt aktuell nur bei ca. 20 %. Der Bedarf der gekoppelten Sektoren übersteigt dies dramatisch.

Der Imperativ:
Das Ausbaupotenzial der regenerativen Erzeugung muss unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeit und Umwelt auf das Zwei- bis Dreifache des heutigen Bedarfs skaliert werden.

Gemini Notebook

Strategische Kernaussagen zur Implementierung der **Sektorenkopplung**



Volatilität als Treiber

Sektorenkopplung ist die zwingende Lösung, um volatile erneuerbare Energien (PV/Wind) in das Energiesystem zu integrieren und regionale Netzengpässe zu überwinden.

Power-to-X als Werkzeugkasten

Die Technologien wandeln Elektrizität sektorenübergreifend in Wärme (PtH), Gas (PtG) und Flüssigkeiten (PtL). Die Grenzen zwischen den Anwendungen sind fließend.

Thermodynamik bestimmt den Pfad

Aufgrund von immensen Effizienzverlusten bei Molekül-basierten Wandlungsketten (bis runter auf 10-30 %) sind Power-to-Heat und Power-to-Mobility (Batterie) priorisiert umzusetzen.

Effizienz als Hebel

Der Endenergiebedarf lässt sich durch Sektorenkopplung drastisch senken (bis zu 80 % im Raumwärmesektor, bis zu 70 % im Verkehr). Die Stromerzeugung muss dennoch ver-2- bis ver-3-facht werden.

Gemini Notebook