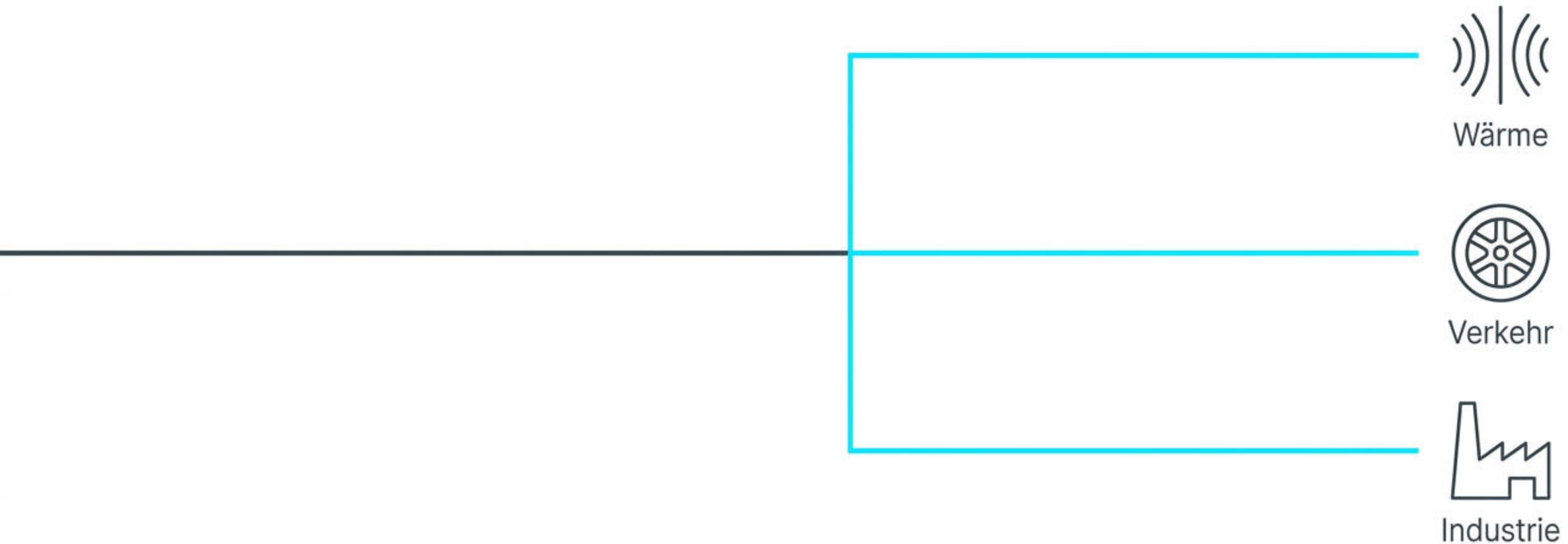
Die Architektur des integrierten Energiesystems

Technologien, Netzdienlichkeit und Regulation (§14a EnWG) in der Sektorenkopplung

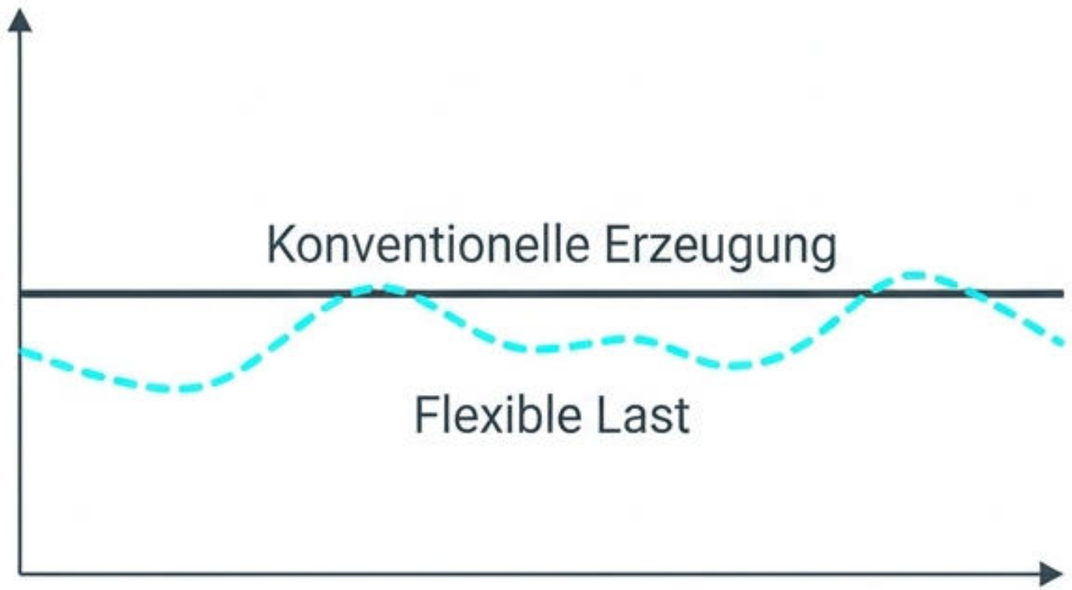


Gemini Notebook

Der fundamentale Paradigmenwechsel der Energiewirtschaft

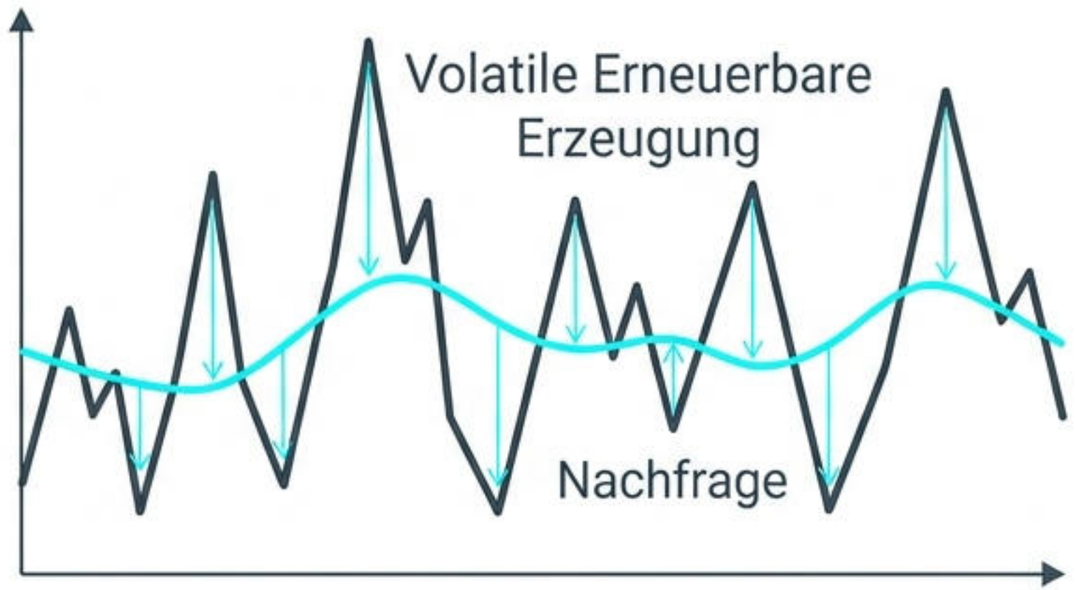
Von der nachfrageorientierten Erzeugung zur erzeugungsorientierten Nachfrage

Vergangenheit



Status Quo: Erzeugung folgt der Last.
Fossile Kraftwerke regeln die Residuallast aus.

Zukunft

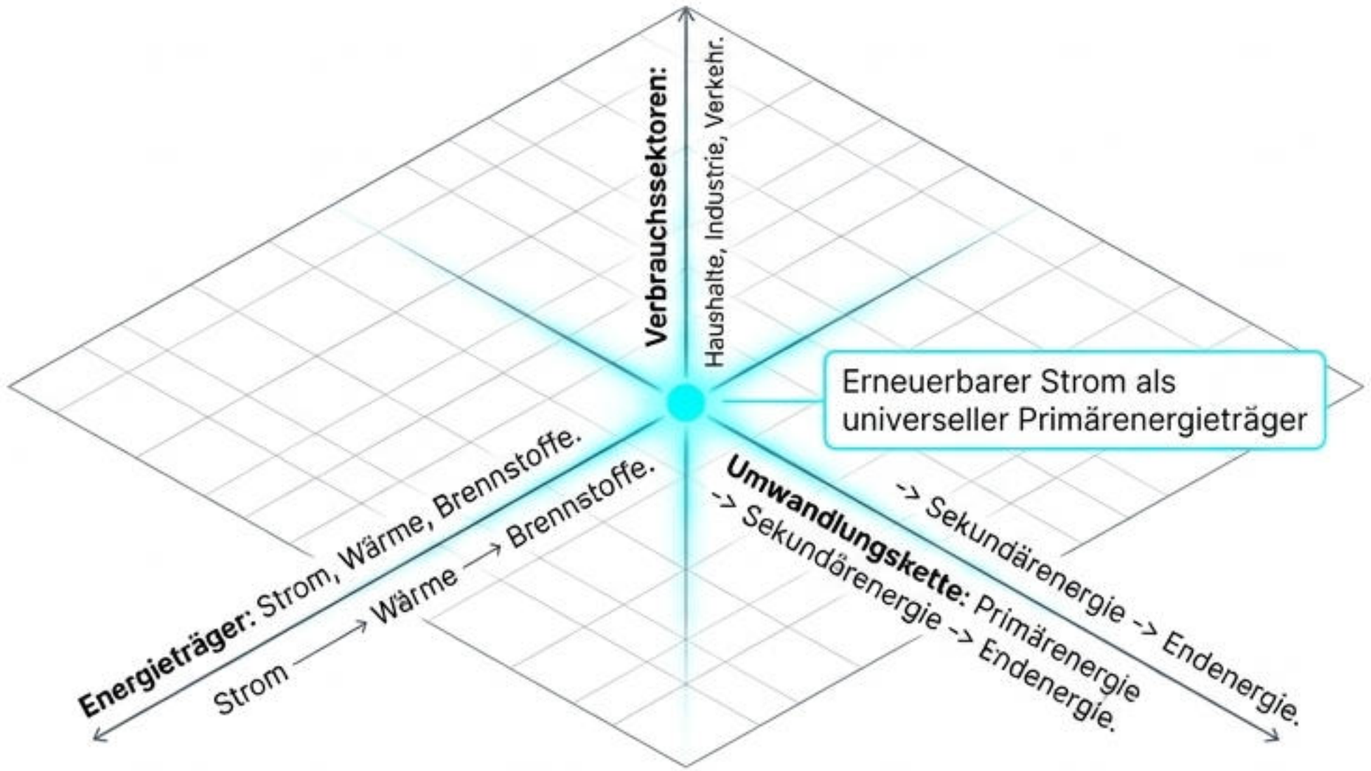


Neue Realität: Last muss der Erzeugung folgen.
Volatile erneuerbare Energien erfordern maximale Systemflexibilität.

Gemini Notebook

Definition und Dimensionen der Sektorenkopplung

Ein holistischer Ansatz zur Dekarbonisierung durch erneuerbaren Strom



Das Konzept:
Vernetzung ehemals isolierter Sektoren (Strom, Wärme, Verkehr, Industrie), um diese gemeinsam zu optimieren.

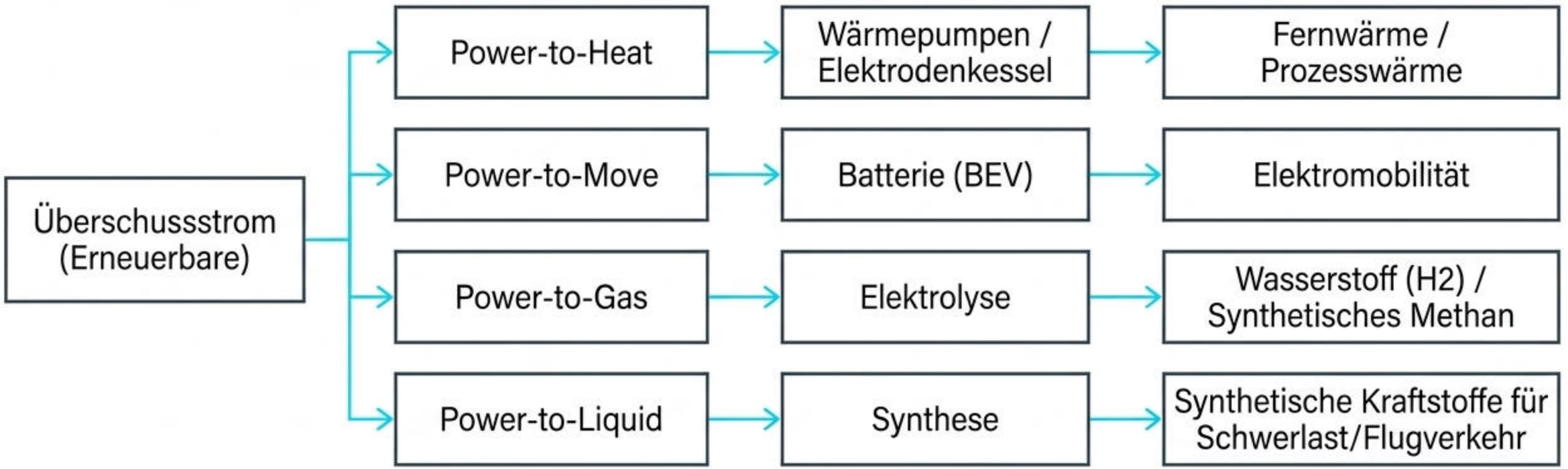
Der Zweck:
Substitution fossiler Brennstoffe durch erneuerbar erzeugten Strom (Elektrifizierung).

Der Nebeneffekt:
Erschließung funktionaler Energiespeicher außerhalb des Elektrizitätssektors zur Netzstabilisierung.

Gemini Notebook

Power-to-X (PtX) als technologische Brücke

Die physikalische Umwandlung von Strom in Wärme, Mobilität und chemische Speicher



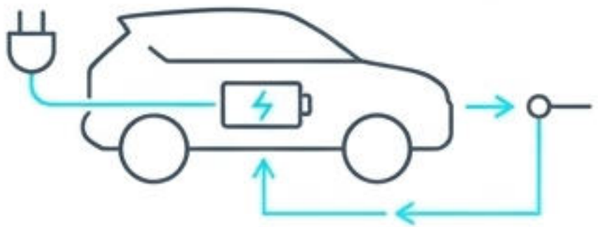
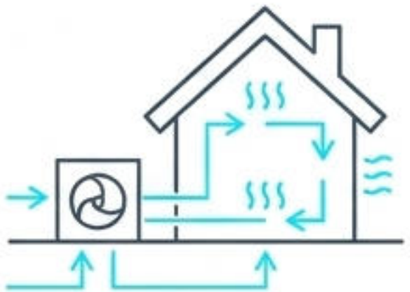
Direkte Stromnutzung: (PtHeat, PtMove)
Höchste Effizienz, kurzfristige Flexibilität.

Indirekte Stromnutzung: (PtGas, PtLiquid)
Niedrigere Effizienz, aber essenziell für saisonale Langzeitspeicher (kalte Dunkelflaute).

Gemini Notebook

Die Dezentralisierungs-Treiber: E-Mobilität und Wärmepumpen

Hohes Flexibilitätspotenzial trifft auf kritische Verteilnetzbelastung

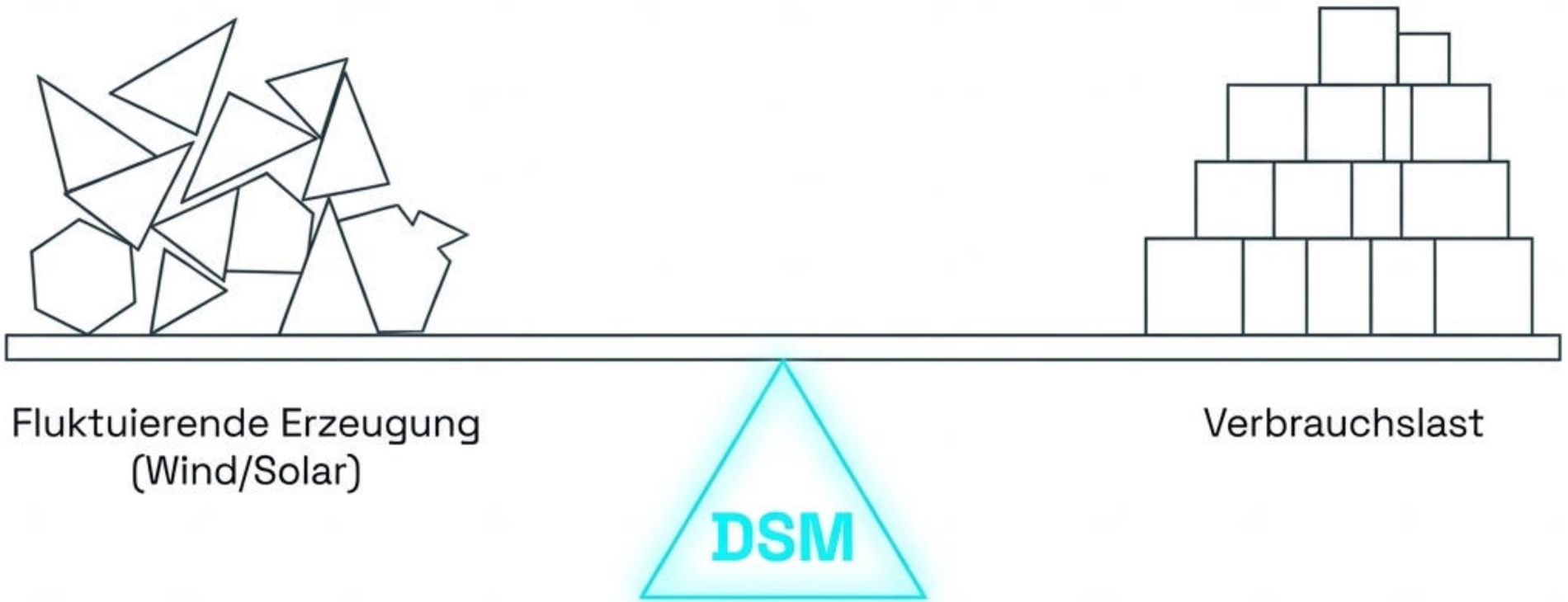
Elektromobilität	Wärmepumpen
	
• **Profil:** Hohe punktuelle Ladeleistung, hohes Speicherpotenzial (Vehicle-to-Grid). • **Herausforderung:** Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge (Feierabend-Peak).	• **Profil:** Hohe Effizienz (JAZ), wetterabhängige Dauerlast, thermische Trägheit (Gebäude als Speicher). • **Herausforderung:** Dauerhafte Netzbelastung in Kälteperioden.

Empirie (Bayer & Pruckner): Ungesteuertes Laden von EVs am Wohnort führt zu einem Anstieg des jährlichen Stromverbrauchs um 78%. Die Integration von dezentraler Photovoltaik und Heimspeichern (BESS) ist zwingend erforderlich, um Transformator-Limits zu entlasten.

Gemini Notebook

Demand Side Management (DSM) als Lösungsraum

Die aktive Steuerung der Verbrauchsseite zur Stabilisierung des Systems



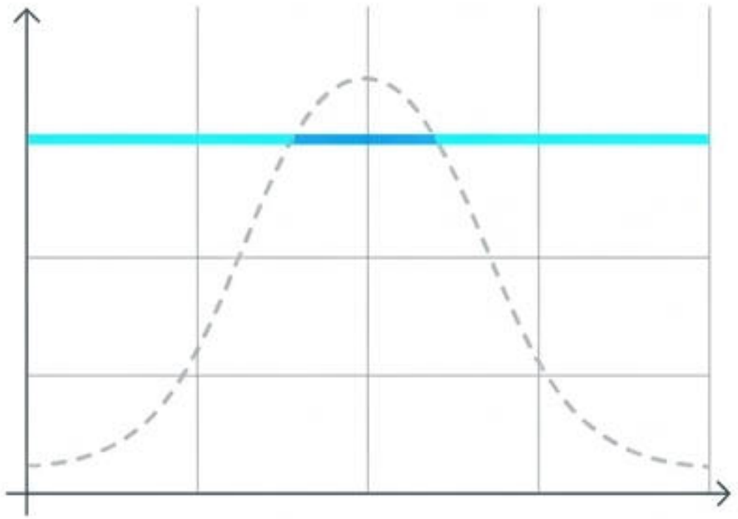
Die Implementierung von Strategien und Maßnahmen, um die Energieverbrauchsmuster von Endverbrauchern anzupassen und zu steuern. Ziel ist es, Angebot und Nachfrage auszugleichen, Netzausbaukosten zu minimieren und CO2-Emissionen zu senken.

Gemini Notebook

DSM-Kategorien und Eingriffsstrategien

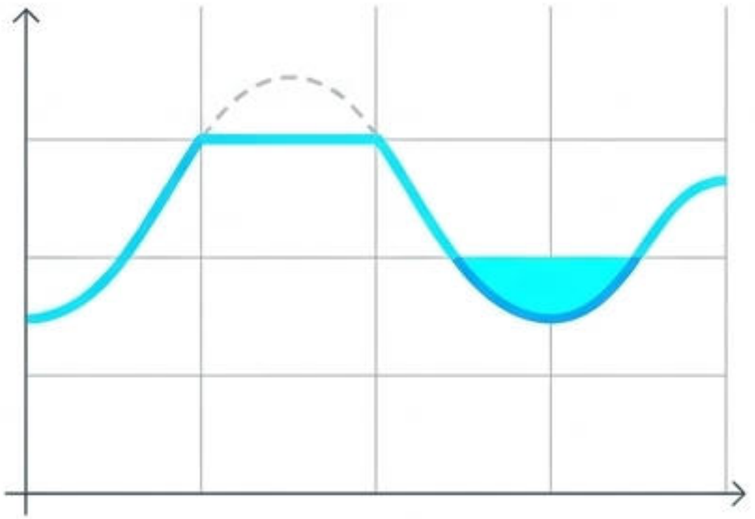
Von Preissignalen bis zu physischen Lastverschiebungen

Peak Clipping (Spitzenkappung)



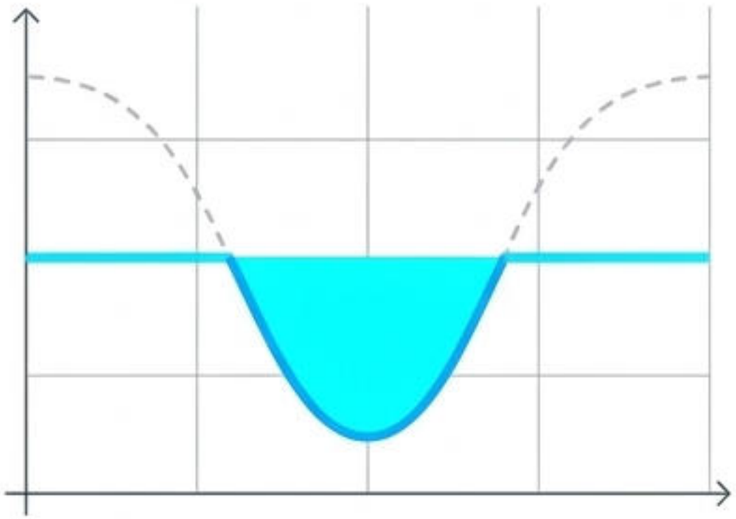
Reduktion der Maximallast zur Vermeidung von Infrastruktur-Überlastung.

Load Shifting (Lastverschiebung)



Verschiebung energieintensiver Prozesse (z.B. EV-Laden, Industrieprozesse) in Off-Peak-Zeiten.

Valley Filling (Lastanhebung)



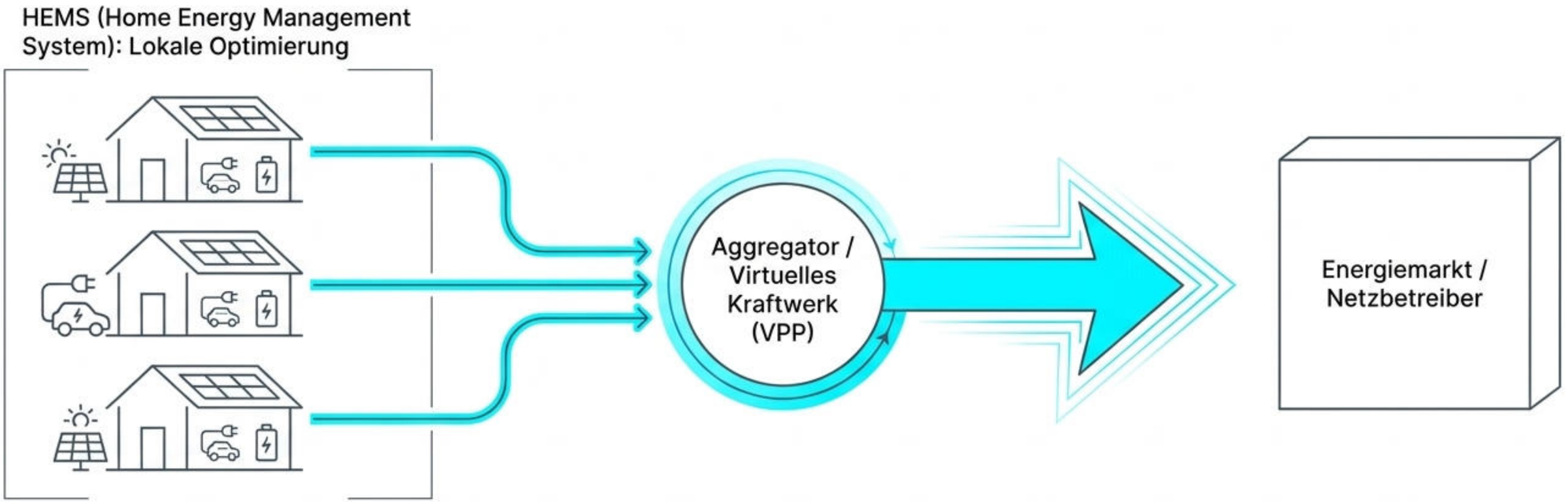
Gezielte Nutzung von Überschussstrom (z.B. durch Power-to-Heat / Speicherladungen).

Strategie-Kategorien: Preisbasiertes DSM (dynamische Tarife) vs. Anreizbasiertes/Steuerndes DSM (Verträge für Lastabwurf, VPPs).

Gemini Notebook

Vom passiven Verbraucher zum aktiven Prosumer

HEMS, Aggregatoren und das Virtuelle Kraftwerk (VPP)



Das Problem: Einzelne Haushaltslasten sind zu klein und fragmentiert für den direkten Strommarkt.

Die Lösung: **Aggregatoren** bündeln dezentrale Energieressourcen (DERs) über Software-Plattformen zu steuerbaren, virtuellen Großkraftwerken.

Gemini Notebook

Der Zielkonflikt: Marktdienlichkeit vs. Netzdienlichkeit

Das Ampelmodell zur Koordination lokaler Flexibilität

Grüne Phase (Markt)	**Zustand:** Netzkapazitäten frei.	**Aktion:** Marktorientiertes Laden. Prosumer reagieren auf Börsenpreise (z.B. hohe Wind-Einspeisung = billiger Strom).
Gelbe Phase (Prävention)	**Zustand:** Lokale Netzengpässe drohen.	**Aktion:** Anreizbasiertes Verhalten. Lokale Leistungsquoten oder dynamische Netzentgelte lenken den Verbrauch weg von der Spitze.
Rote Phase (Gefahr)	**Zustand:** Akute physische Überlastung (Transformator-Limit).	**Aktion:** Zwingender, ordnungsrechtlicher Eingriff durch den Verteilnetzbetreiber als Ultima Ratio.

Gemini Notebook

Der regulatorische Rahmen: Steuerung nach §14a EnWG

Die Ultima Ratio des Verteilnetzbetreibers zur Sicherung der Infrastruktur

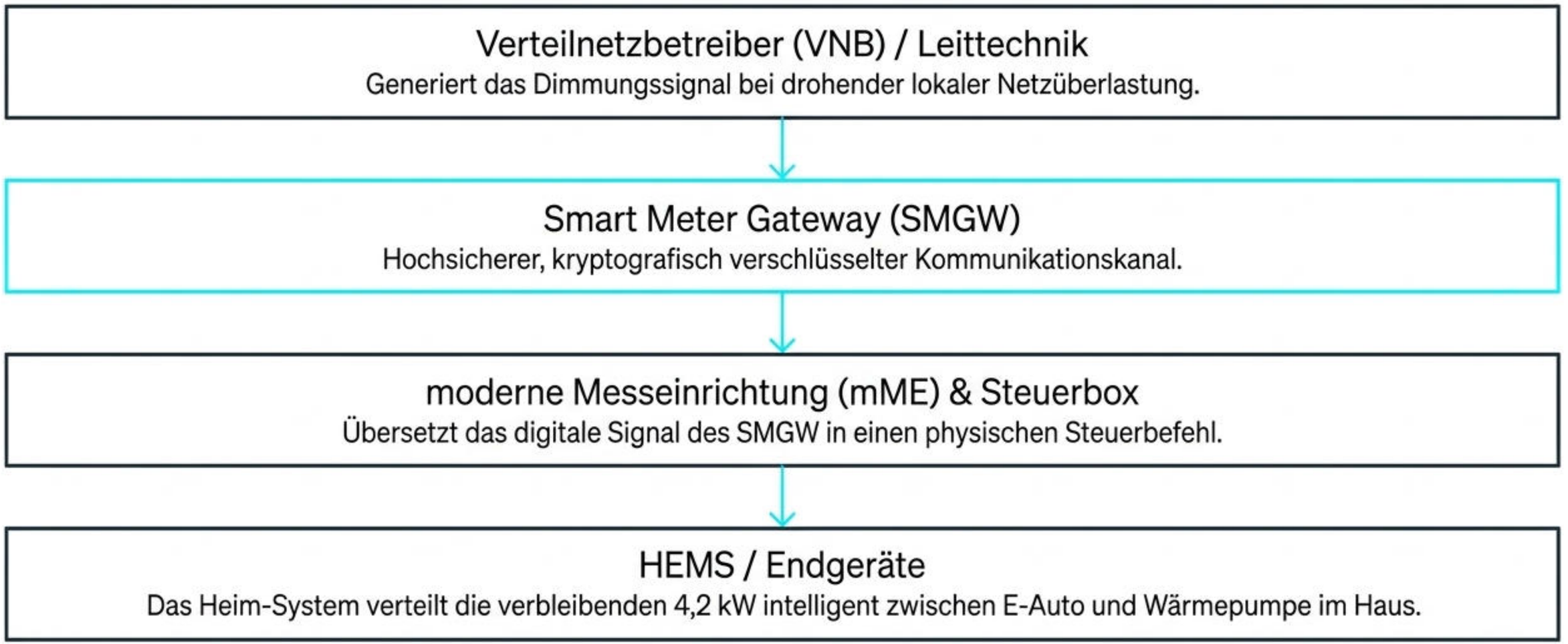


Akademischer Kontext: Nach dem Urteil des Europäischen Gerichtshofs (EuGH C-718/18) wurden die Festlegungskompetenzen zur Ausgestaltung von §14a EnWG vollständig an die Bundesnetzagentur übertragen, um Markteffizienz im Monopolnetz künstlich zu simulieren.

Gemini Notebook

Die digitale Infrastruktur der Sektorenkopplung

Das intelligente Messsystem (iMSys) als Kommunikationskanal



Gemini Notebook

Die verhaltensökonomische Perspektive

Warum Sektorenkopplung ohne den Endkonsumenten scheitert (Sloot et al., 2022)

Stufe 3: Reaktion

Barriere: Gewohnheiten, Angst vor Komfortverlust, ständiger kognitiver Aufwand (manuelles Schalten). → Intervention: Set-and-Forget Automatisierung (HEMS), Echtzeit-Feedback.

Stufe 2: Partizipation

Barriere: Hohe Komplexität von dynamischen Tarifen und DSM-Programmen; geringes Bewusstsein. → Intervention: Nudging, Reduktion der Komplexität, Opt-Out-Standards (Default-Tarife).

Stufe 1: Investition

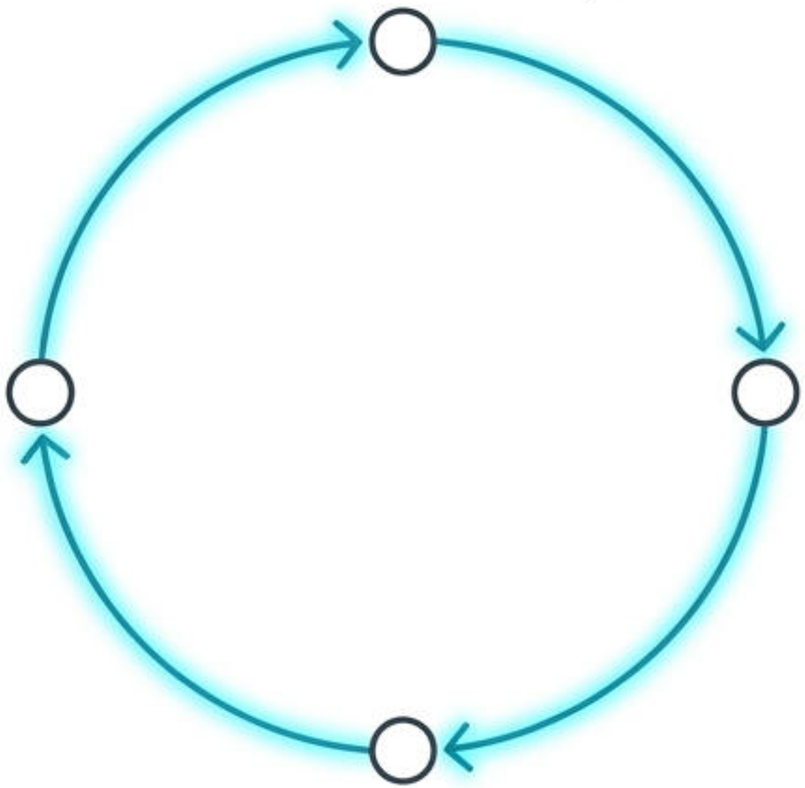
Barriere: Hohe Initialkosten (CAPEX) für PtX-Technologien (EV, Wärmepumpe). → Intervention: Finanzielle Förderung, soziale Normen (Sichtbarkeit im Quartier).

Gemini Notebook

Synthese: Das systemische Paradigma

Die Architektur des Smart Energy Systems

Physik & Technik (Sektorenkopplung & PtX)
Transformiert volatile Elektronen in Wärme, Gas und Mobilität.



Steuerung (DSM & HEMS)
Balanciert das Angebot und die Nachfrage dynamisch aus.

Infrastruktur & Recht (§14a & iMSys)
Sichert das lokale Netz via digitalen Gateways und 4,2 kW Sicherheitslimits.

Mensch & Markt (Verhaltensökonomie)
Liefert die physische Flexibilität durch Investition und automatisierte Teilnahme.

Gemini Notebook

Kernbotschaften der Systemintegration

Vier Prinzipien für das zukünftige Energiedesign



Elektrifizierung ist essenziell.

Sektorenkopplung ist der physikalische Schlüssel zur Dekarbonisierung aller Wirtschaftsbereiche durch PtX.



Verbraucher werden Stabilisatoren.

Demand Side Management (DSM) wandelt ehemals starre Lasten in dynamische, systemdienliche Ressourcen um.



Digitalisierung sichert das Netz.

§14a EnWG und iMSys garantieren die Integrität lokaler Verteilnetze ohne den Ausbau der Erneuerbaren zu stoppen.



Technik bedingt Akzeptanz.

Ohne verhaltensökonomische Anreize (Automatisierung, Opt-out) bleibt das theoretische Flexibilitätspotenzial ungenutzt.

Gemini Notebook