Die Illusion der Energie

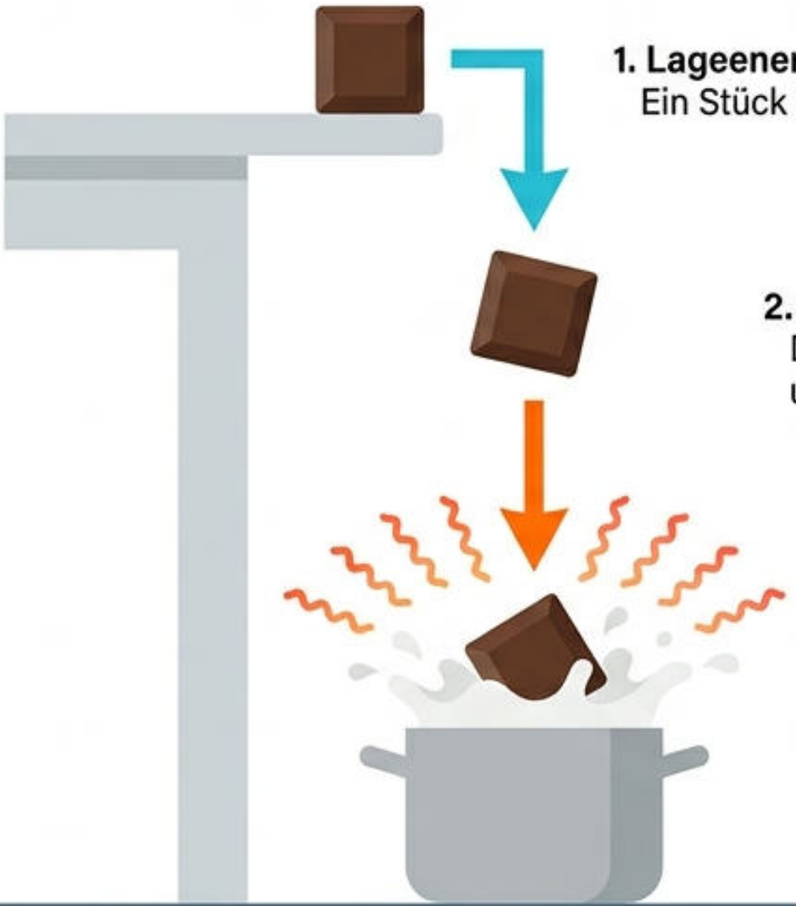
Die monumentale Aufgabe des Netzabgleichs: Physik, Daten und die Dimensionierung volatiler Systeme

Eine detaillierte Vorlesungspräsentation zum Ausgleich volatiler Angebots- und Nachfrageschwankungen.

Gemini Notebook

Die physikalische Realität: Energie wird niemals erzeugt.

In physikalischen Zusammenhängen ist Energie die Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten. (Zustandsgröße).



1. Lageenergie (Potenziell):
Ein Stück Schokolade liegt auf der Tischkante.

2. Bewegungsenergie (Kinetisch):
Das Stück fällt, wird schneller, verliert potenzielle und gewinnt kinetische Energie.

3. Wärmeenergie (Verlust):
Beim Aufprall in den Milchtopf und dem endgültigen Stillstand am Boden wird die gesamte Restenergie letztlich in Wärmeenergie umgewandelt und an die Umgebung abgestrahlt.

Die Energieform wird gewandelt, niemals verbraucht. Sofern sie nicht in Masse übergeht, bleibt die Summe im geschlossenen System exakt erhalten.

Gemini Notebook

Der Wirkungsgrad (η) und das Gesetz des Verlusts

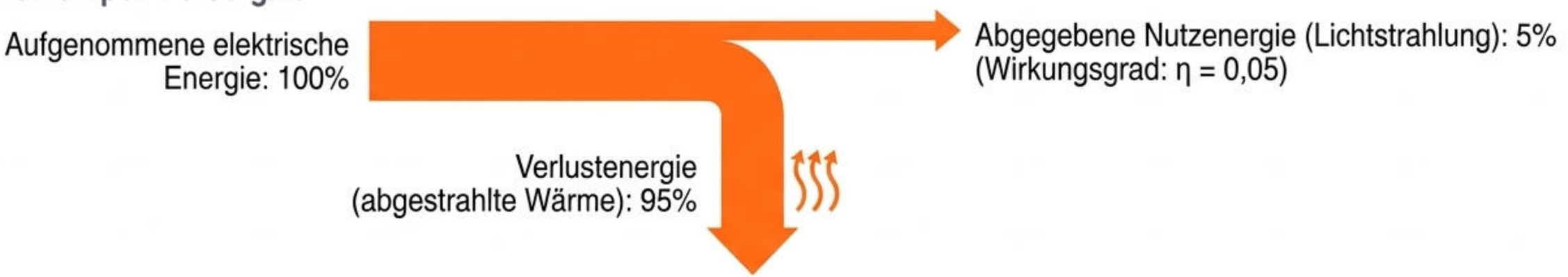
Jeder technische Prozess, der eine Energieform wandelt, ist verlustbehaftet. Die Verlustenergie (meist Reibung/Verformung) wird als Wärme abgestrahlt.

Technisches System (Allgemein)



Aufgenommene Energie (100%) = Abgegebene Energie + Verlustenergie.

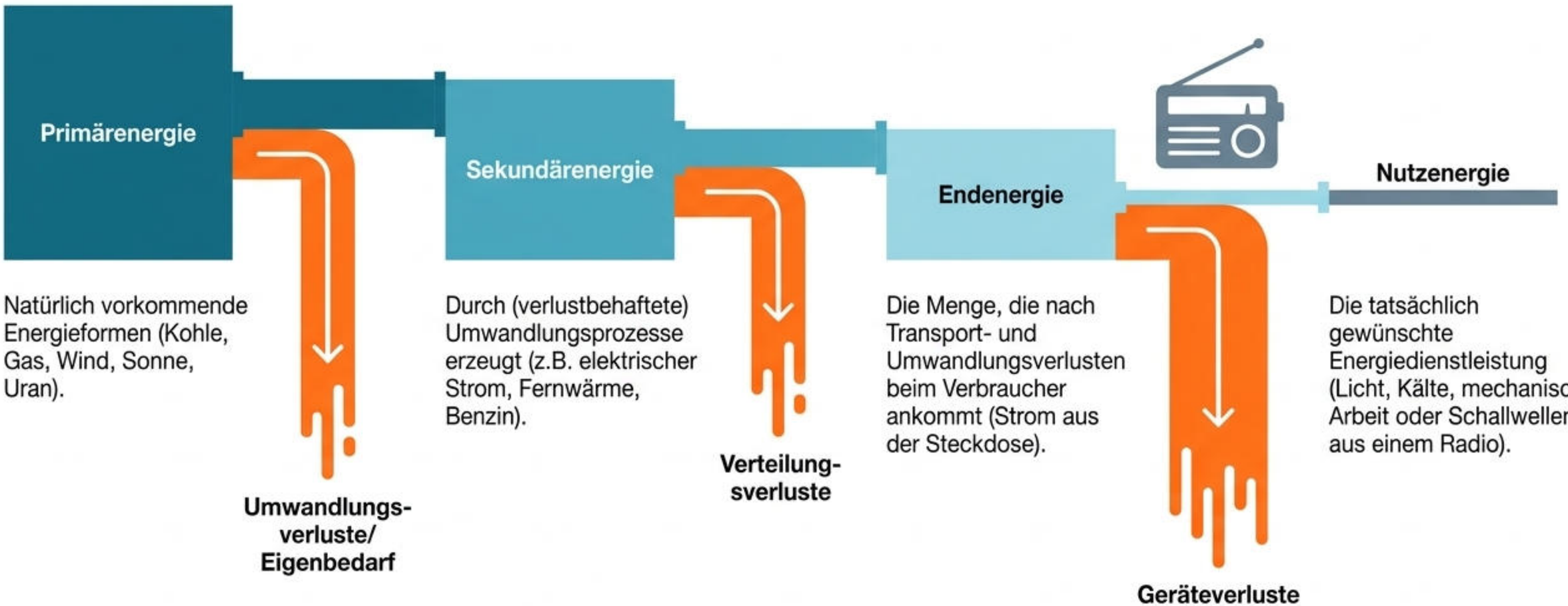
Das Glühlampen-Paradigma



Die Summe aus End- und Verlustenergie ist immer exakt gleich der Ausgangsenergie.

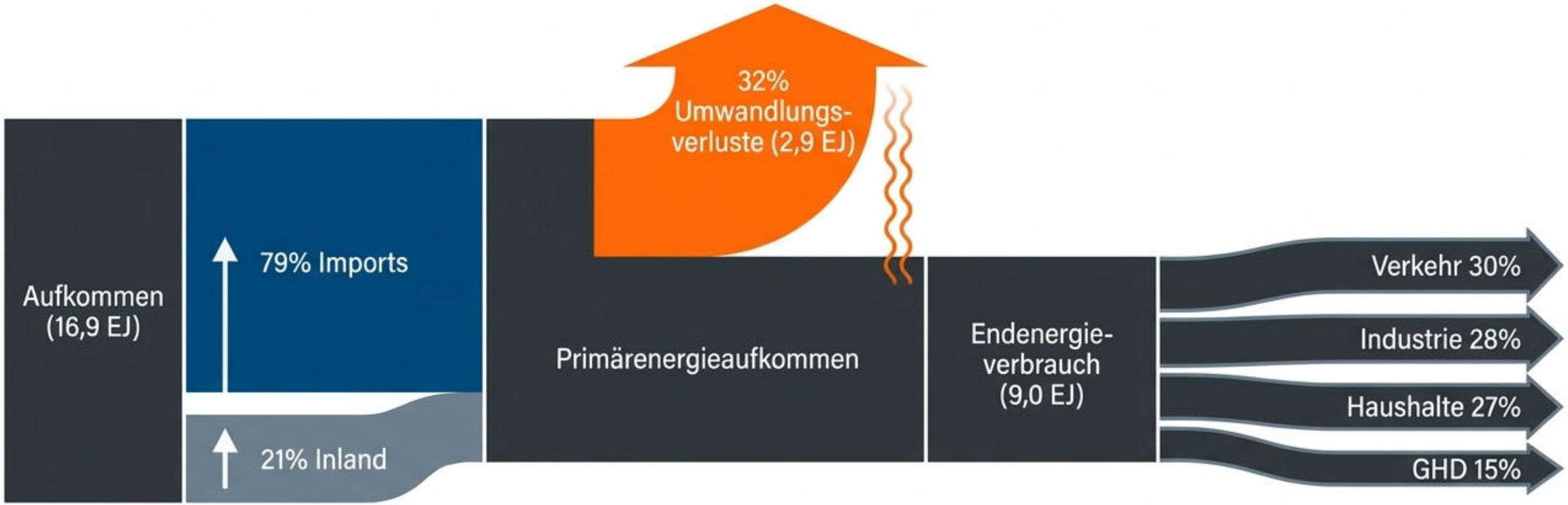
Gemini Notebook

Die Energiekaskade: Vom Rohstoff zur Dienstleistung



Gemini Notebook

Energieflussbild Deutschland: Die Makro-Perspektive (2019)



16,9 E J Gesamtaufkommen:
79 % der Primärenergie werden importiert, nur 21 % im Inland gewonnen.

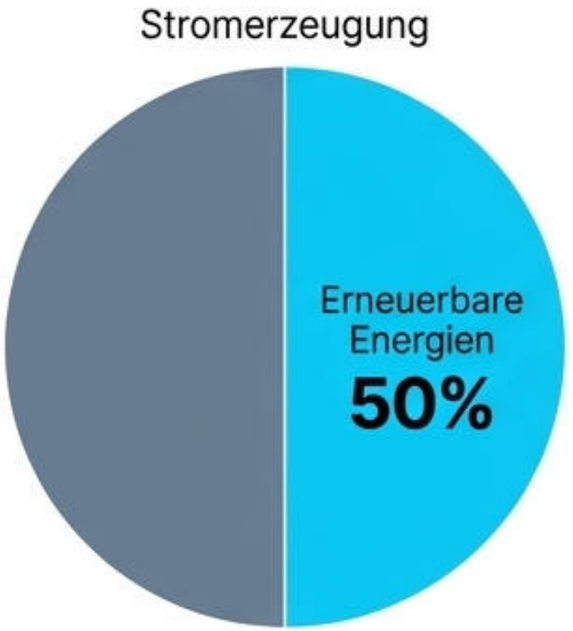
32 % Verlust-Steuer:
Fast ein Drittel (2,9 EJ) des Primärenergieaufkommens geht als Umwandlungsverlust verloren, bevor es den Verbraucher erreicht.

Verbrauchssektoren der Endenergie:
- Verkehr: 30 %
- Industrie: 28 %
- Haushalte: 27 %
- Gewerbe/Handel/Dienstleistungen (GHD): 15 %

Gemini Notebook

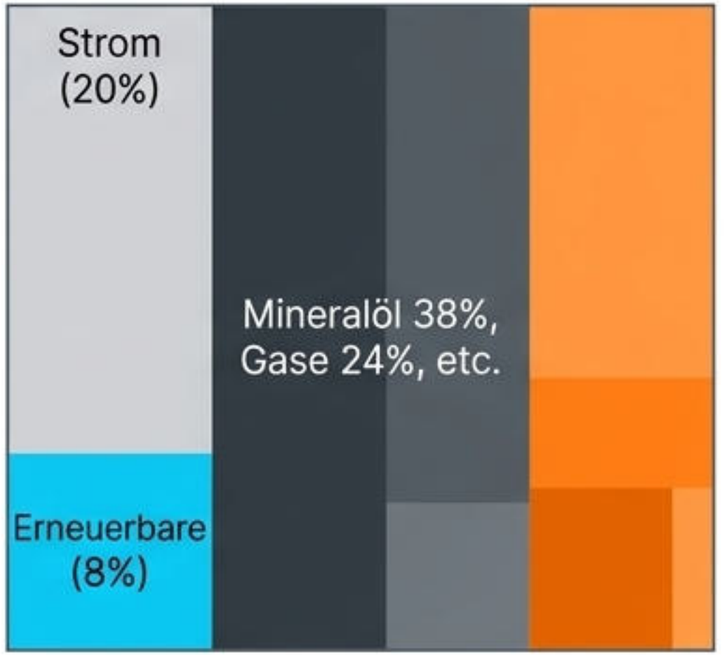
Die Strom-Illusion: Ein Bruchteil des Ganzen

Die öffentliche Wahrnehmung



In der öffentlichen Wahrnehmung dominieren Erfolgsmeldungen: Erneuerbare Energien machen in Deutschland etwa 50 % der Bruttostromerzeugung aus.

Die mathematische Realität (Endenergieverbrauch)



Doch Strom ist nicht gleich Energie.

- Strom deckt nur 20 % des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland.
- Mineralöle (38 %) und Gase (24 %) dominieren weiterhin.
- Der Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Endenergieverbrauch liegt bei lediglich 8 %.

Die Versorgungslücke bei vollständiger Dekarbonisierung ist wesentlich größer, als der Strommarkt suggeriert

Gemini Notebook

Die Netz-Vokabeln: Was tatsächlich ankommt

Auf dem Weg von der Erzeugung zum Endverbraucher wird Energie für den Systemerhalt abgezweigt:



Bruttostromerzeugung:
Die gesamte in Kraftwerken erzeugte elektrische Arbeit.

Kraftwerkseigen- & Pumpstromverbrauch:
Verluste durch den Betrieb der Erzeugungsanlagen selbst (inkl. Laufwasserkraftwerke).

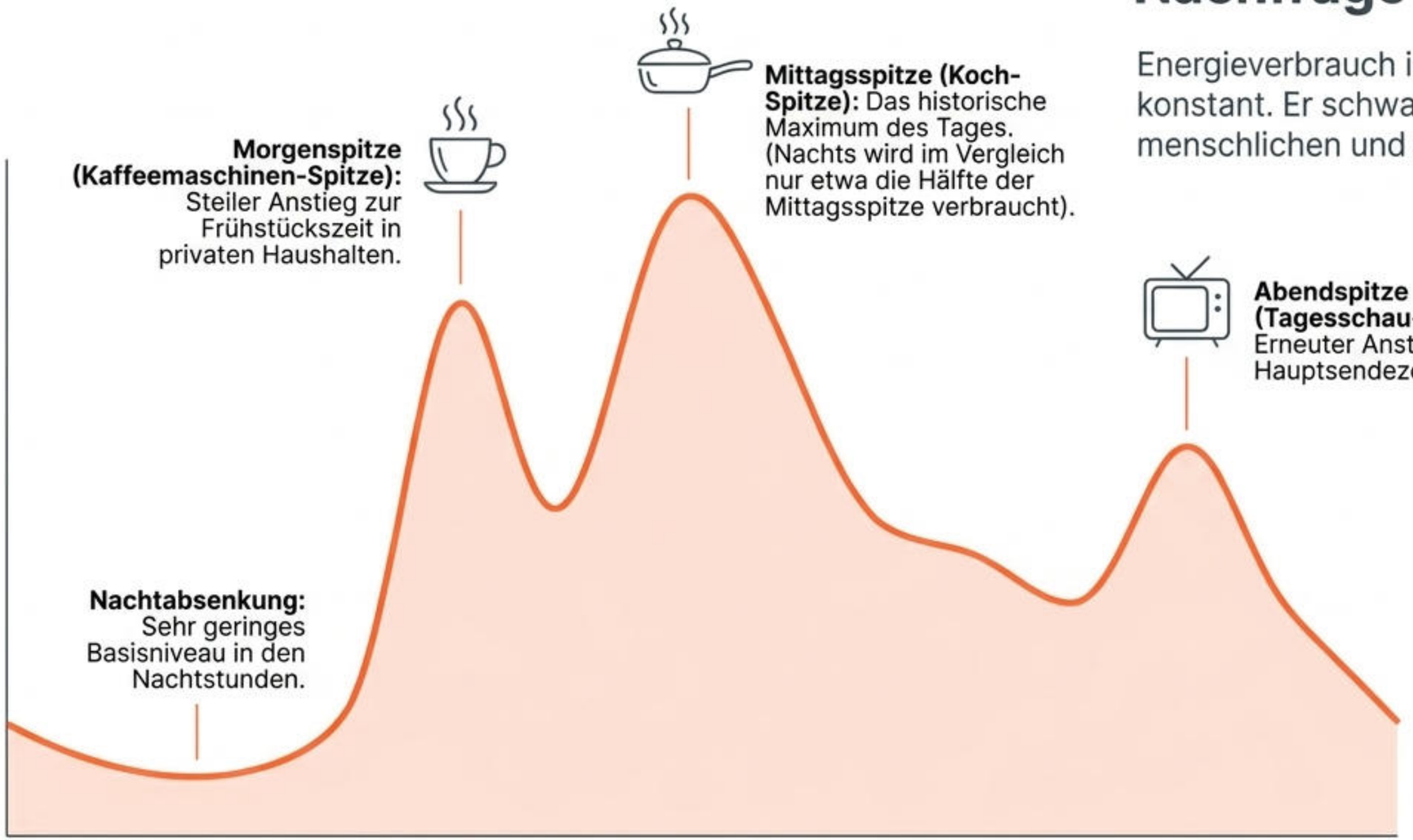
Übertragungs- & Verteilungsverluste:
Physikalischer Schwund im Stromnetz.

Inländischer Netto-Stromverbrauch:
Die verbleibende Energie, verteilt auf Anlagen zur Energieumwandlung und den finalen Endverbrauch (Industrie, Verkehr, Haushalte, GHD).

Gemini Notebook

Der menschliche Rhythmus: Nachfrage-Volatilität

Energieverbrauch ist weder linear noch konstant. Er schwankt massiv und folgt strikten menschlichen und saisonalen Rhythmen.

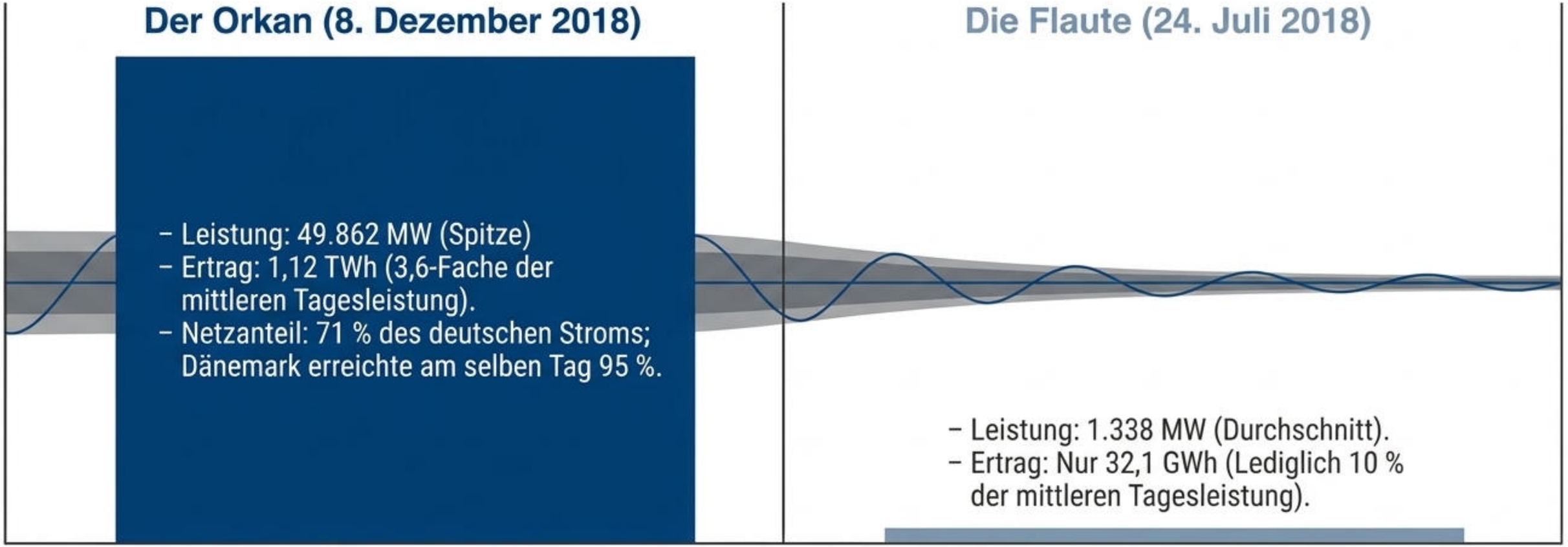


Saisonalität: Heizbedarf im Winter (Erdgas/Öl) vs. Klimaanlagen im Sommer (Strom).

Gemini Notebook

Die Launen der Natur: Angebots-Volatilität

Erneuerbare Energien schwanken um mehr als eine Größenordnung. Die Windenergieproduktion veranschaulicht diese radikale Spreizung an extremen Tagen des Jahres 2018:

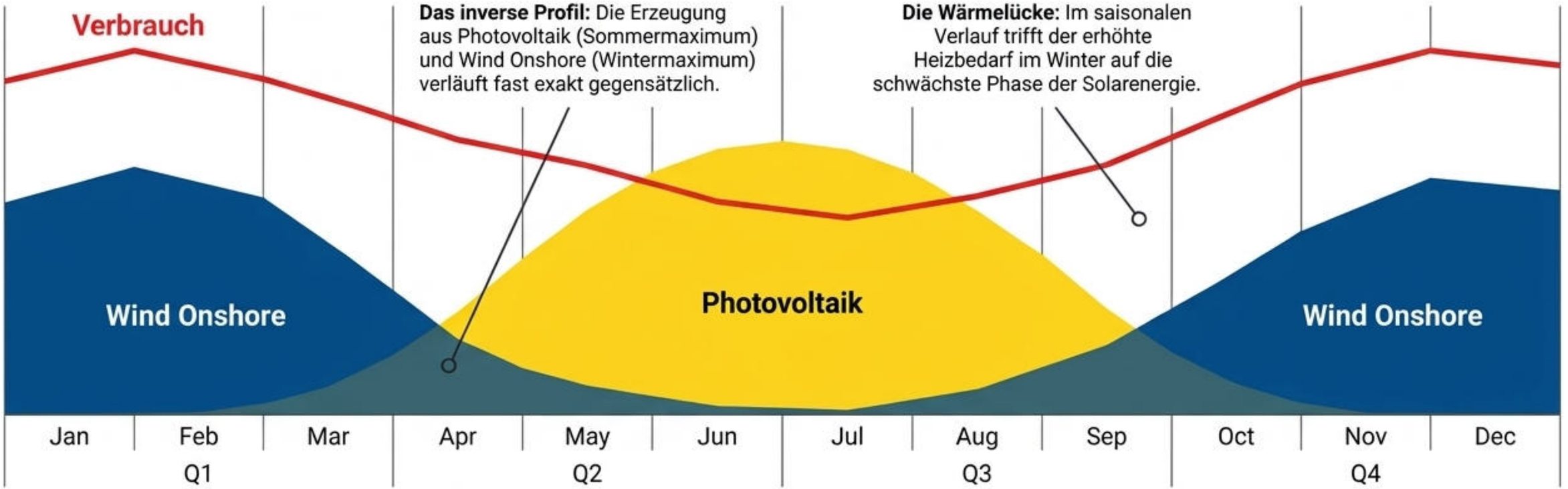


Die Netzstabilität muss Leistungsänderungen von bis zu 38 % innerhalb einer einzigen Stunde (21. Juni 2018) verkraften.

Gemini Notebook

Der saisonale Konflikt: Quartalsausgleich

Im mittelfristigen (wöchentlichen) Bereich schwankt der Verbrauch massiv zwischen **40 GW** und **80 GW** (**7,5 TWh** bis **12,5 TWh** pro Woche).

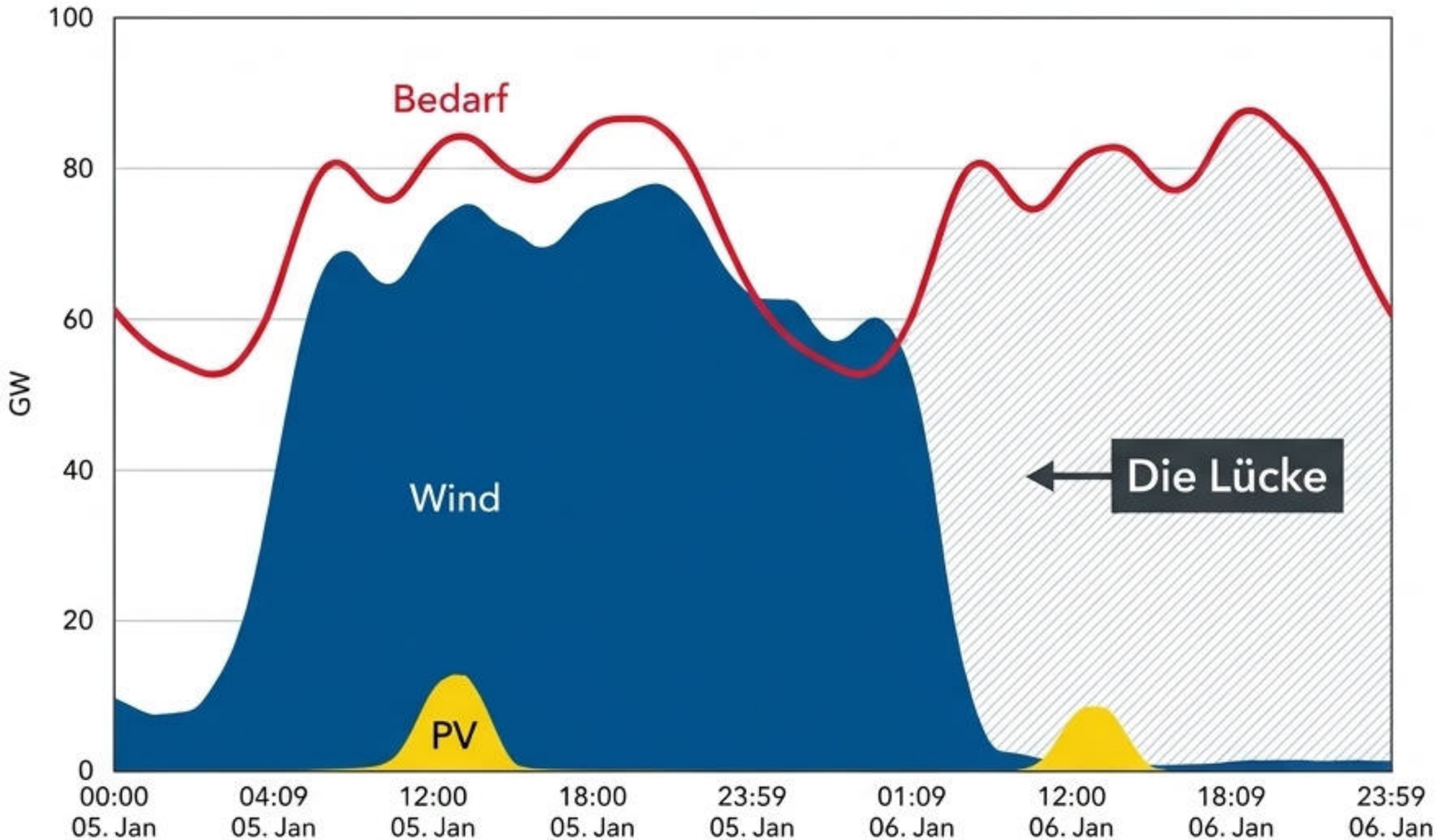


Wenn fossile Kraftwerke komplett deaktiviert werden, zwingt uns diese asynchrone Erzeugung zu einem gigantischen, monatelangen Quartalsausgleich zwischen Sommer und Winter.

Gemini Notebook

Die stündliche Krise: Kurzfristige Schwankungen

Die Auflösung auf Stundenebene offenbart die wahre Brutalität der Erzeugungs-Volatilität. (Daten: 5. - 6. Januar 2022).



- **PV-Beschränkung:** Solarenergie (Gelb) existiert ausschließlich in einem schmalen Zeitfenster um die Mittagszeit.
- **Der Wind-Absturz:** Die Windenergie (Blau) fällt von einem Mittag zum nächsten von zwei Dritteln der Bedarfsdeckung auf fast null.
- **Die Konsequenz:** Wenn die rote Verbrauchskurve deutlich über der Summe der Erzeugung liegt (wie hier ab dem 6. Jan), ist das Netz ohne steuerbare Kraftwerke oder gigantische Importe nicht zu halten.

Gemini Notebook

Dimensionierung des Ausgleichs: Eine einzige Nacht

Um den Ausgleichsbedarf zu quantifizieren, berechnen wir die Versorgungslücke bei einer vollständigen Stromversorgung durch Erneuerbare.

Szenario: Eine mittlere, windstille Nacht (ohne PV). Der Strombedarf muss durch kurzfristige Speicher gedeckt werden.

Leistung (P) = 40 GW

Zeit (t) = 12 Stunden

$$E = P \times t = 40\ GW \times 12\ h = 480\ GWh$$

480 GWh = 480 Millionen kWh (entspricht 1,7 PJ)

Takeaway: Dies ist der minimale Speicherbedarf für nur zwölf Stunden deutsche Grundversorgung im reinen Stromsektor.

Gemini Notebook

Dimensionierung des Ausgleichs: Ein Monat Flaute

Zur Erinnerung: Strom ist nur 20 % unseres Endenergieverbrauchs.

Was passiert bei einer längeren Dunkelflaute, wenn wir den gesamten Endenergiebedarf mittelfristig puffern müssen?

Szenario: Ein Monat ohne nennenswerte Wind- und Sonnenerträge im Winter.

Jahres-Endenergieverbrauch = 9 EJ

$$E = \frac{9\ \text{EJ}}{12} = 750\ \text{PJ} = 208\ \text{TWh}$$

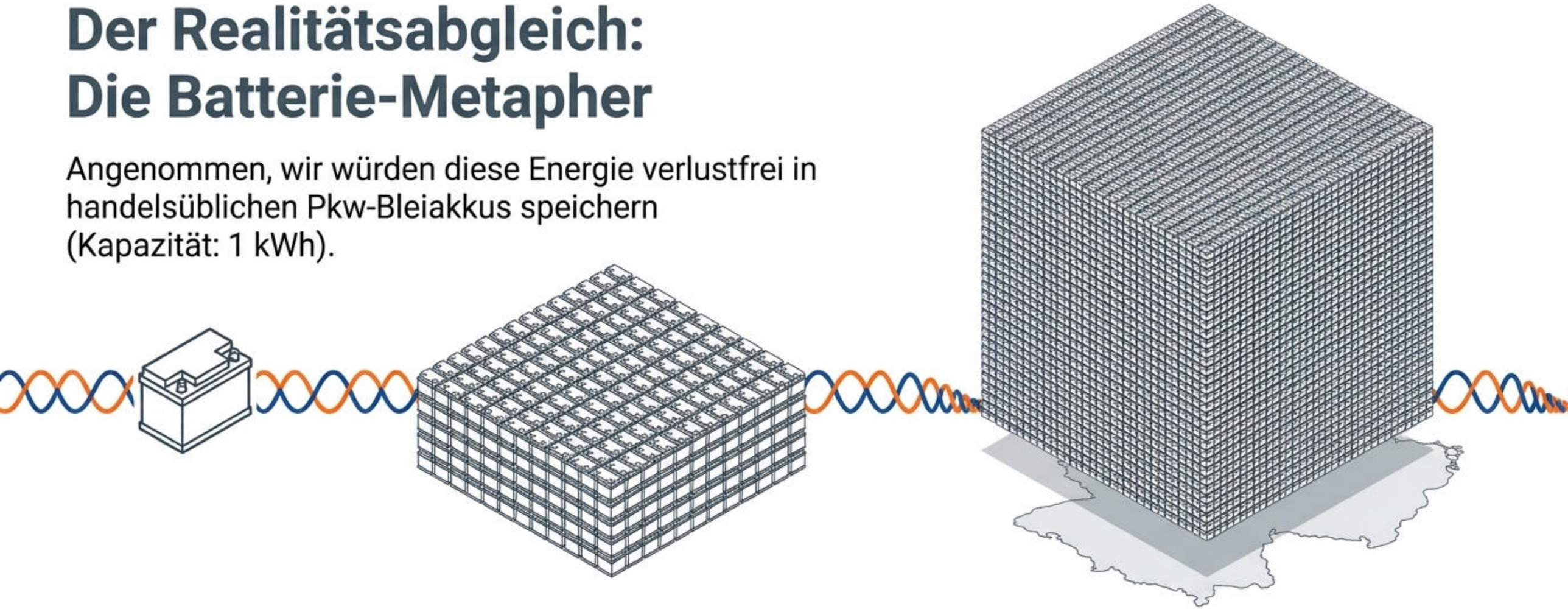
208 TWh = 208 Milliarden kWh

Takeaway: Um einen Monat Dunkelflaute für ganz Deutschland zu überbrücken, muss eine Energiemenge von 208 Terawattstunden abrufbar vorgehalten werden.

Gemini Notebook

Der Realitätsabgleich: Die Batterie-Metapher

Angenommen, wir würden diese Energie verlustfrei in handelsüblichen Pkw-Bleiakkus speichern (Kapazität: 1 kWh).



1 Bleiakku (12V, 80Ah)
= 1 kWh

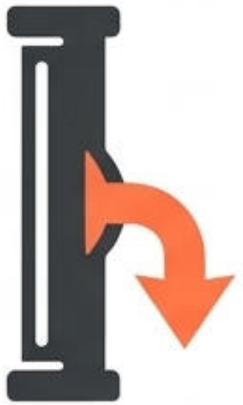
Ausgleich für 1 Nacht (Strom):
480 Millionen Batterien

Ausgleich für 1 Monat (Endenergie):
208 Milliarden Batterien

Herkömmliche Batteriespeicher sind mathematisch, wirtschaftlich und physikalisch keine alleinige Lösung für die saisonale Volatilität einer Industrienation.

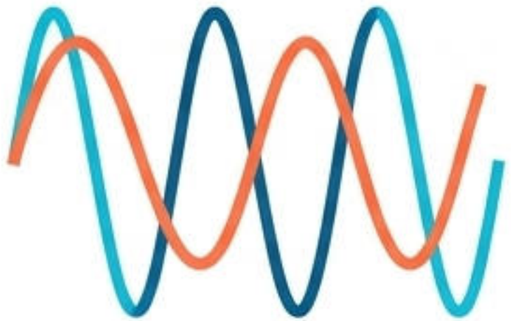
Gemini Notebook

Fazit: Die physikalischen und technologischen Grenzen



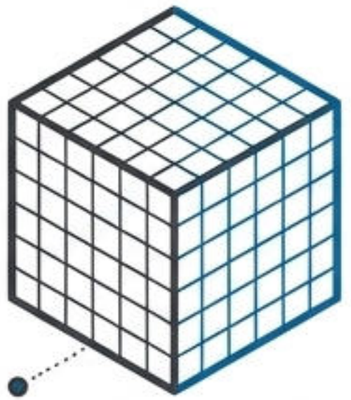
Physik & Kaskade

Physikalisches Gesetz: Energieerhaltung und der unausweichliche Wirkungsgrad bedeuten, dass bei jedem Umwandlungs- und Speicherschritt gewaltige Mengen als Wärme verloren gehen (Aktuell 32 % Umwandlungsverluste in DE).



Die Volatilität

Asynchrone Welten: Die Natur liefert hochgradig volatil (Sonne im Sommer, Wind im Winter; Abstürze auf fast null), während der menschliche und industrielle Bedarf starr und winterlastig ist.



Die Dimension

Unendlicher Skalierungsbedarf: Die Dimensionierung von 208 TWh (für einen Monat Endenergie) sprengt die Möglichkeiten konventioneller Speicherung (208 Milliarden Pkw-Batterien).

Der Ausgleich volatiler Netze erfordert völlig neue Dimensionen der Speicher- und Wandlungstechnologie, die über einfache elektrische Pufferung weit hinausgehen.

Gemini Notebook