

Die Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung im Energiesystem der Zukunft

**Stabiler Netzbetrieb, effiziente Restlastdeckung
und Garant für Versorgungssicherheit**

Gunnar Kaestle

Intelligente Stromnutzung mit Kraft-Wärme-Kopplung
KWK-Tagung der KEA-BW

Mi, 2021-09-22, Karlsruhe

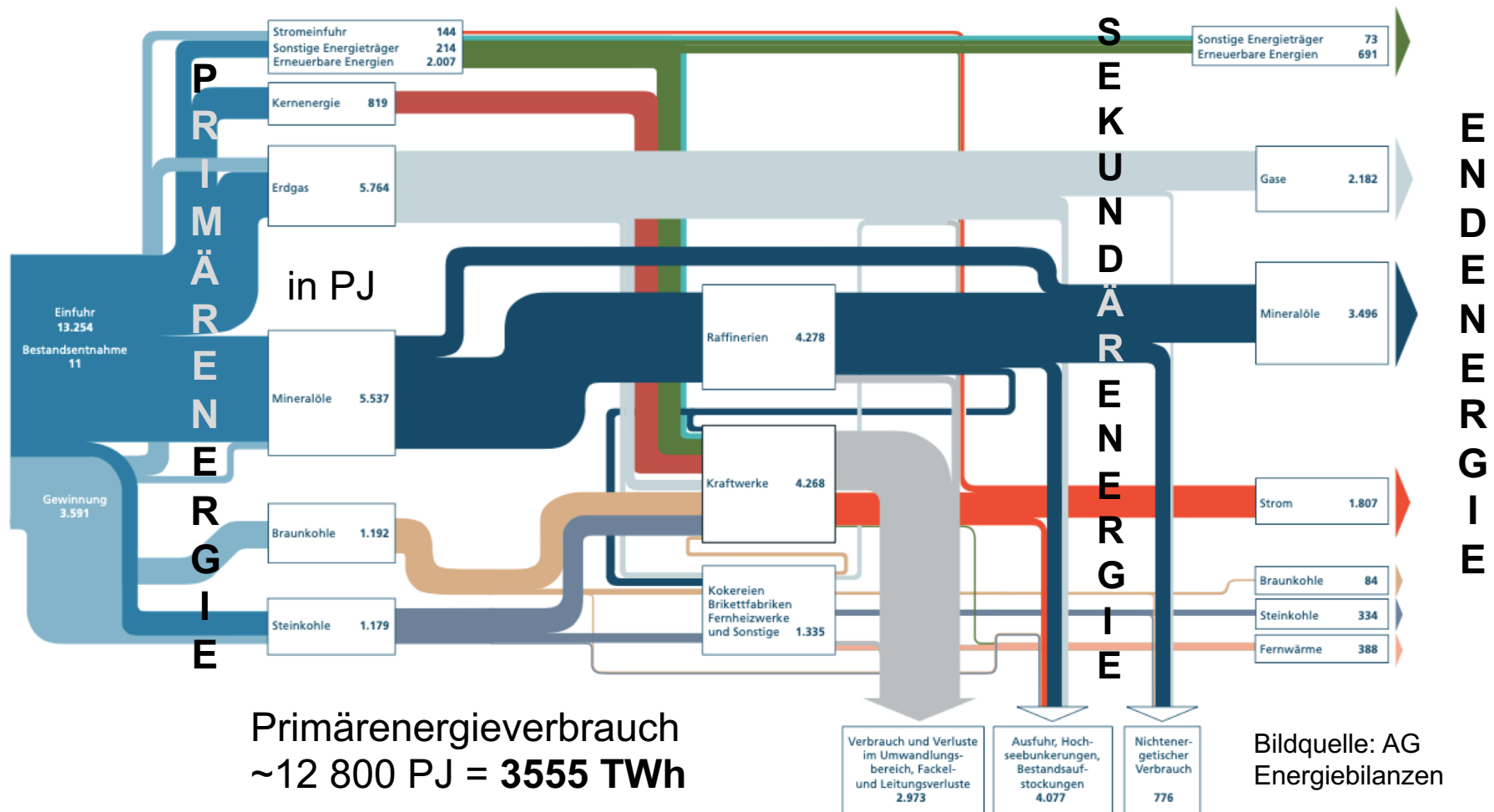


Agenda

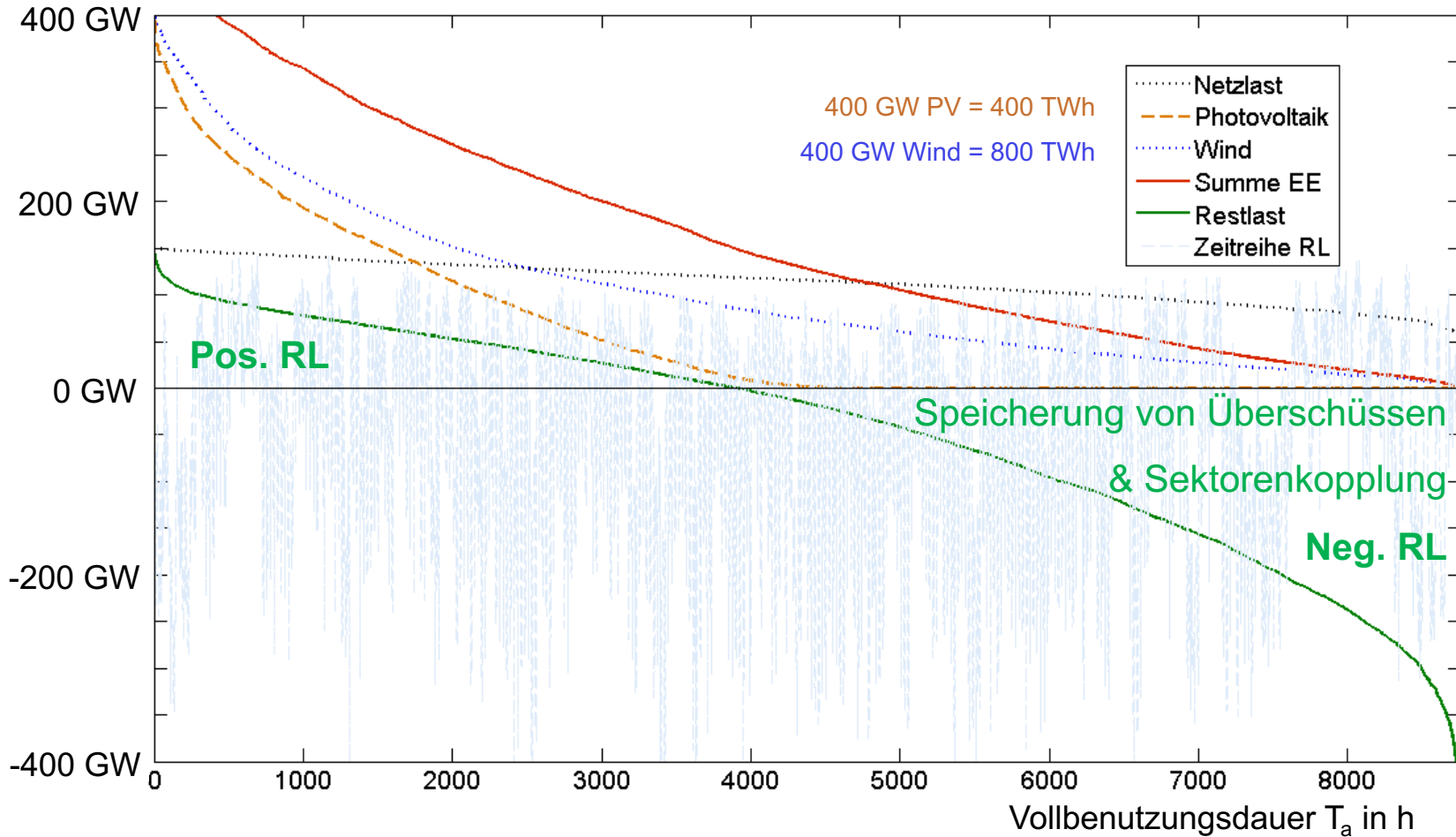
- Quo vairs, Energiesystem?
- Stabile Netze als Basis
- Effiziente Energiewandlung
- Versorgungssicherheit

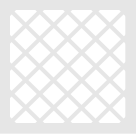


Das Deutschlandbild der AG-Energiebilanzen (2019)



Sonne, Wind und Speicher





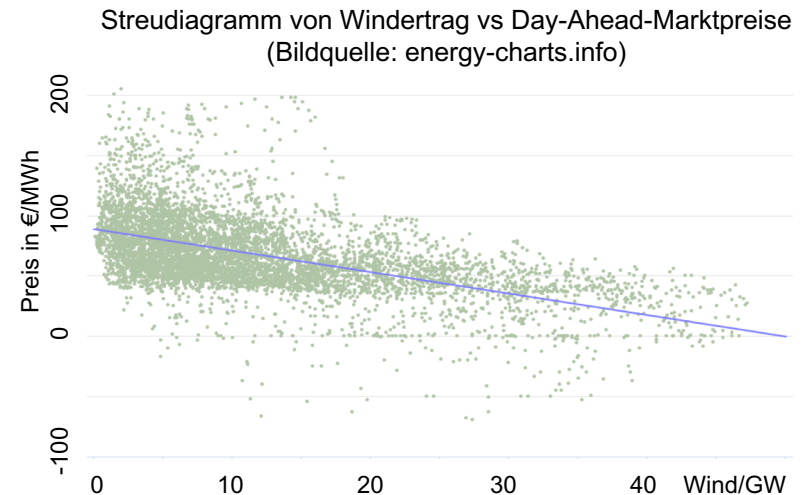
Erntemaschinen & Lastfolgeeinheiten

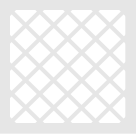
■ Wind- und Solarenergie

- nicht speicherbare Primärenergie
- geringer OPEX, hoher CAPEX
- dargebotsabhängig, nicht disponibel
- preisunelastisch

■ Energiespeicher

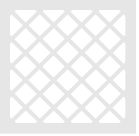
- Zeitkonstante $T=E/P$ (Saisonal, Mittelfristig, Kurzfristig)
- funktionale Stromspeicher (Verbraucher)
- Soda-Speicher (E-Fahrzeuge)
- steuerbar und preiselastisch (Marktintegration)
- diverse Technologien (Batterie \longleftrightarrow Power-to-Gas-to-Power)





Agenda

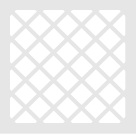
- Quo vairs, Energiesystem?
- **Stabile Netze als Basis**
- Effiziente Energiewandlung
- Versorgungssicherheit



Systemdienstleistungen

- „Alles, was man für die Lieferung des Produktes benötigt, aber was nicht auf der Rechnung steht.“ (Georg Kerber)
 - Beispiel Kaffeehaus mit Hauptprodukt: Kaffee & Kuchen
 - Systemdienstleistungen: Bedienung, Tisch, Stuhl, Musik, Zeitung, Heizung, Immobilie, Putzfrau, etc.
- Wichtige Systemdienstleistungen in elektrischen Netzen:
 - Frequenzhaltung
 - Spannungshaltung
 - Systemwiederaufbau
 - Betriebsführung





Netzgebundene elektrische Energieversorgung

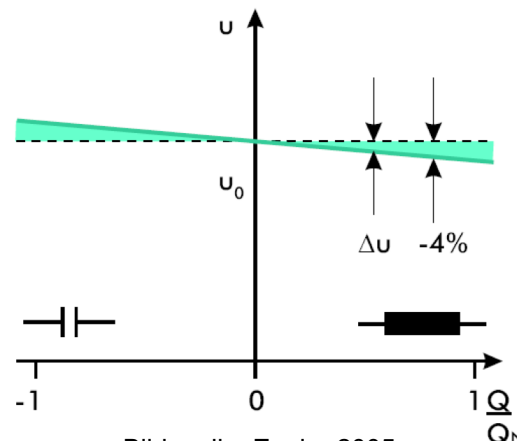
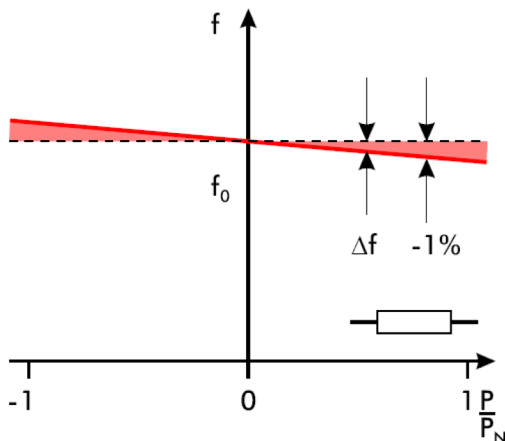
- „Systemdienstleistungen sind „Software“
 - Regelleistung zur Frequenzhaltung
 - 50 Hertz als Sollwert
 - Blindleistung zur Spannungshaltung
 - 230 V beim Endverbraucher
 - Know-How zum Versorgungswiederaufbau
 - Stromausfall Berlin-Köpenick
 - Organisatorisches Können beim Netzbetrieb

- Betriebsmittel sind „Hardware“
 - Kabel und Freileitungen
 - Transformatoren
 - Schaltanlagen
 - Netzleitzentralen



Vorgabe von klassischen Statiken

- Lineare Kennlinien für lokale Regelkreise
 - Leistungs-Frequenz-Regelung – $P(f)$
 - Blindleistungs-Spannungs-Regelung – $Q(U)$
- Bewährt in Hoch- und Höchstspannung
- Eingeführt auch für DEA in den Verteilnetzen
- Übertragbar auch auf $P(U)$ -Regelungen (virtueller Widerstand)

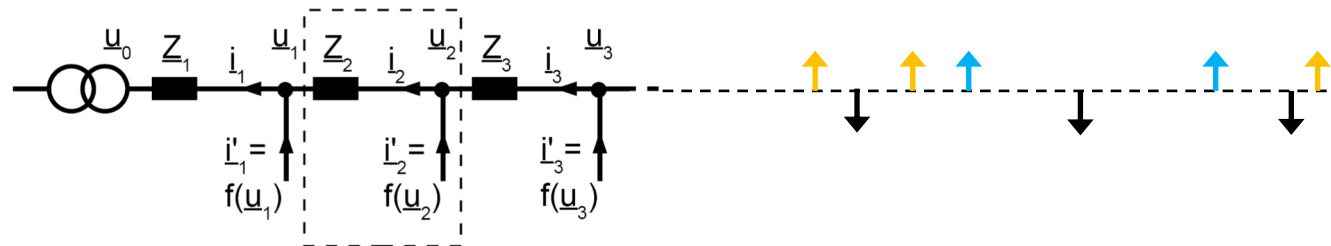


Bildquelle: Engler 2005

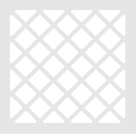


Selbstorganisierende Engpassminderung (Verteilnetz)

- Ohm'sche Charakteristik im Verteilnetz ($U = R \cdot I$)
- Spannung steigt durch Einspeisungen
- ... und sinkt bei Entnahme aus dem Netz
- Idee: Disponible Einspeiser (BHKW) und Verbraucher (WP, E-Auto) auf die Spannung reagieren lassen
- Dargebotsabhängige Erntemaschinen (PV, Wind) mit disponiblen Anlagen per P(U)-Regelung ins lokale System integrieren



- vgl. IEC TS 62898-3-3 Selbstregelung von disponiblen Verbrauchern



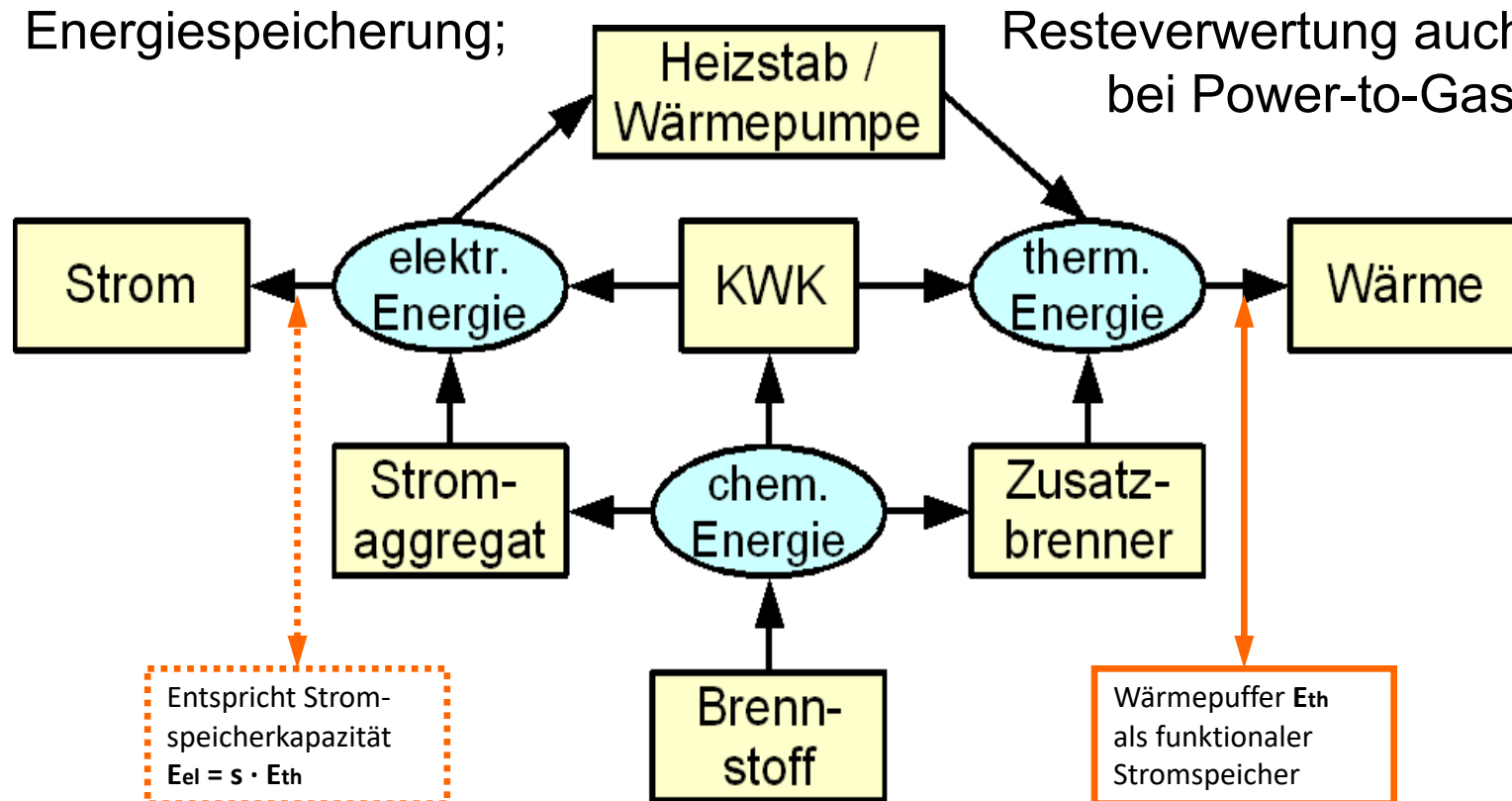
Agenda

- Quo vairs, Energiesystem?
- Stabile Netze als Basis
- Effiziente Energiewandlung
- Versorgungssicherheit



KWK-System zur effizienten Sektorenkopplung

- Verrechnung der energetischen Kuppelprodukte (Äpfel & Birnen) per Exergie; Niedriger PEF der Wärmeversorgung; funktionale Energiespeicherung;





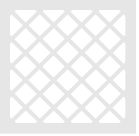
Thermodynamische Hauptsätze

1. Die Energie ist eine Erhaltungsgröße.
 - Energie geht nie verloren, sie wird umgewandelt.
 - Energieeffizienz ist stets 100%.
2. Die Exergie (Arbeitswert der Energie) ist keine Erhaltungsgröße.
 - Wenn umgangssprachlich von Energie gesprochen wird, ist meist die technische Arbeitsfähigkeit (Exergie) gemeint.
 - Alternative Formulierung: $dS \geq 0$
Die Entropie S in einem geschlossenen System wird stets größer oder bleibt bei reversiblen Vorgängen gleich.
 - Entropie ist als „thermische Ladung“ ein Energieträger. $Q' = \Delta T \cdot S'$
3. Das Minimum der Temperaturskala 0 K erreicht man nie.



Beispiele für exergetische Wirkungsgrade

- Diskontierung thermischer Energie mit dem Carnot-Faktor $\eta_c = 1 - T_i/T_s$
- T_i = Umgebungstemp. z. B. 0°C vgl. RED II, Annex V; T_s = Nutzwärme
 - HT-Wärme (1200°C) : $\eta_c = 0,814$
 - HD-Dampf (300°C, 85 bar) : $\eta_c = 0,524$
 - ND-Dampf (150°C, 5 bar) : $\eta_c = 0,355$
 - Fernwärme (VL 120°C, RL 60°C) : $\eta_c = 0,248$
 - Heizung, alt (VL 80°C, RL 60°C) : $\eta_c = 0,204$
 - NT-Heizung (VL 50°C, RL 30°C) : $\eta_c = 0,128$
 - Fußbodenheiz. (VL 24°C, RL 20°C) : $\eta_c = 0,075$
- Kuppelproduktion incl. Abwärmenutzung
 - HT-Elektrolyse (150 °C): $0,75 \cdot 1$ (gas) + $0,2 \cdot 0,355$ (th) = 0,821
 - HT-Brennstoffzelle (80/60): $0,55 \cdot 1$ (el) + $0,3 \cdot 0,204$ (th) = 0,611
- Alternativenvergleich
 - Wärmepumpe mit COP 4 (50/30): $\eta_c = 4 \cdot 0,128 = 0,512$
 - Wärmepumpe mit COP 6 (24/20): $\eta_c = 6 \cdot 0,075 = 0,45$
 - Solarenergie thermisch (70%, 80°C): $\eta_c = 0,7 \cdot 0,204 = 0,143$ und
 - Solarenergie elektrisch (20%): $\eta_c = 0,200$



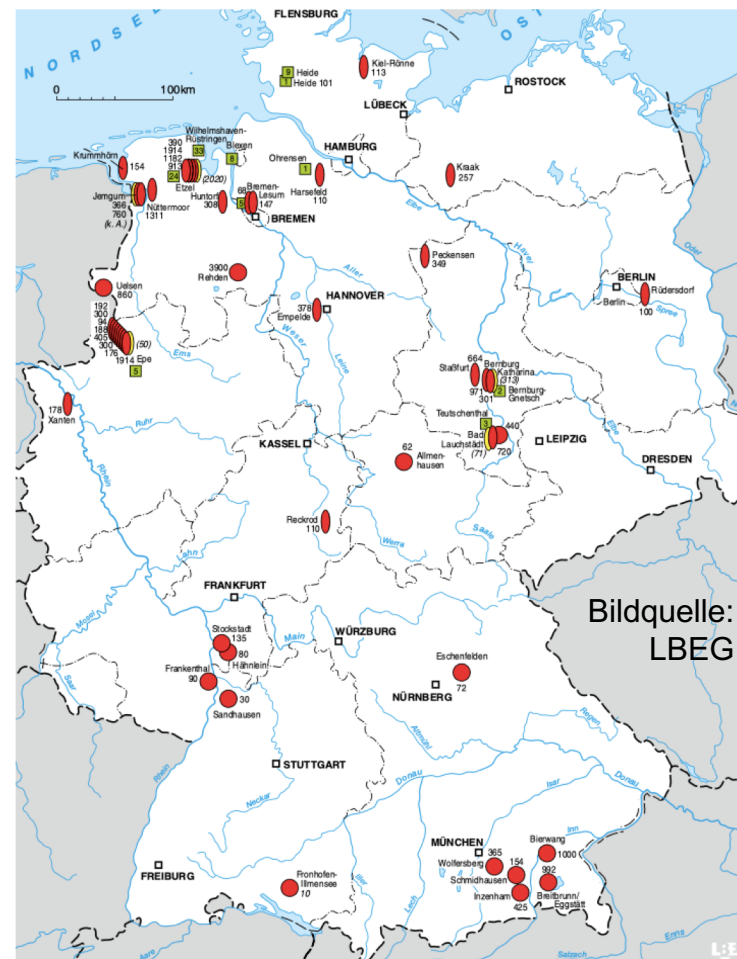
Agenda

- Quo vairs, Energiesystem?
- Stabile Netze als Basis
- Effiziente Energiewandlung
- Versorgungssicherheit



Kalte Dunkelflauten

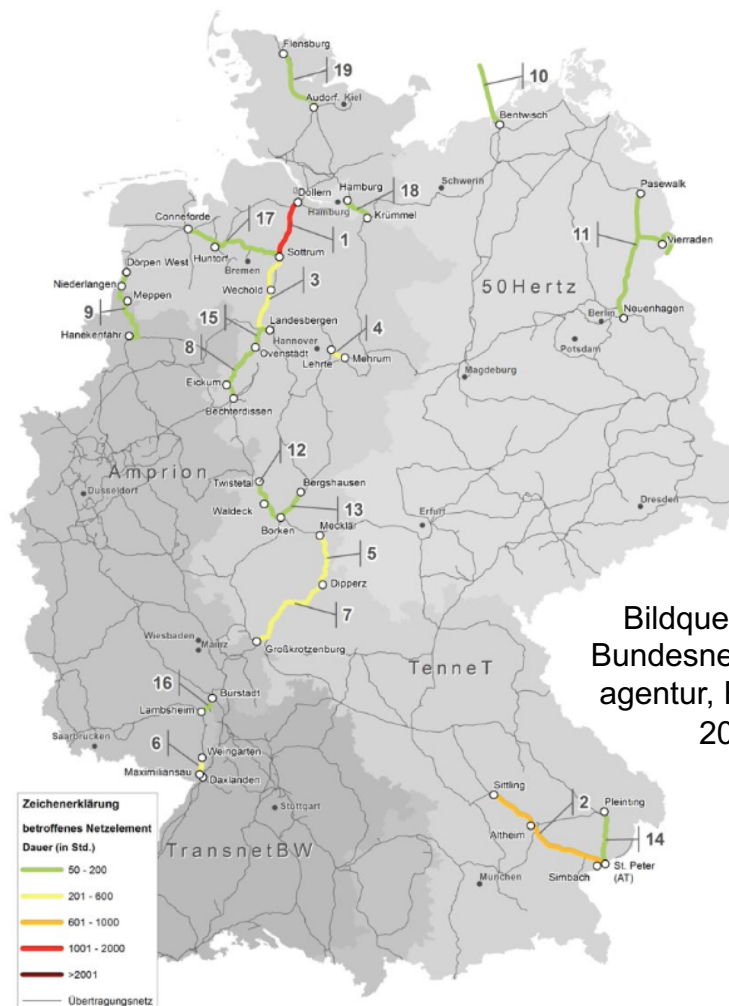
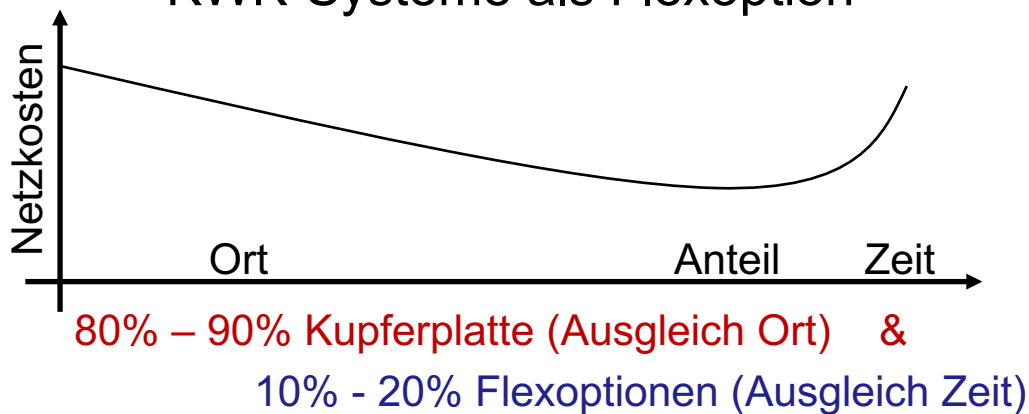
- Stabile Hochdruckwetterlage in Wintermonaten
 - klare, kalte Nächte
 - geringe Solarerträge
 - geringe Winderträge
- Heutiger Erdgasverbrauch
 - ~100 Mrd. Kubikmeter
 - ca. 1000 TWh
- 24 Mrd. Normkubikmeter Speicherkapazität
- Rückverstromung per eff. KWK als gesicherte Leistung





Redispatch-Bedarf heute und morgen

- Ausbau erneuerbarer Energien muss beschleunigt werden
- Ausbau des Übertragungsnetzes dauert ca. 20 Jahre
- Netzausbau + Flexoptionen
 - EWE-Vorschlag 5%-Ansatz
 - Nutzen statt Abregeln (NSA)
 - KWK-Systeme als Flexoption

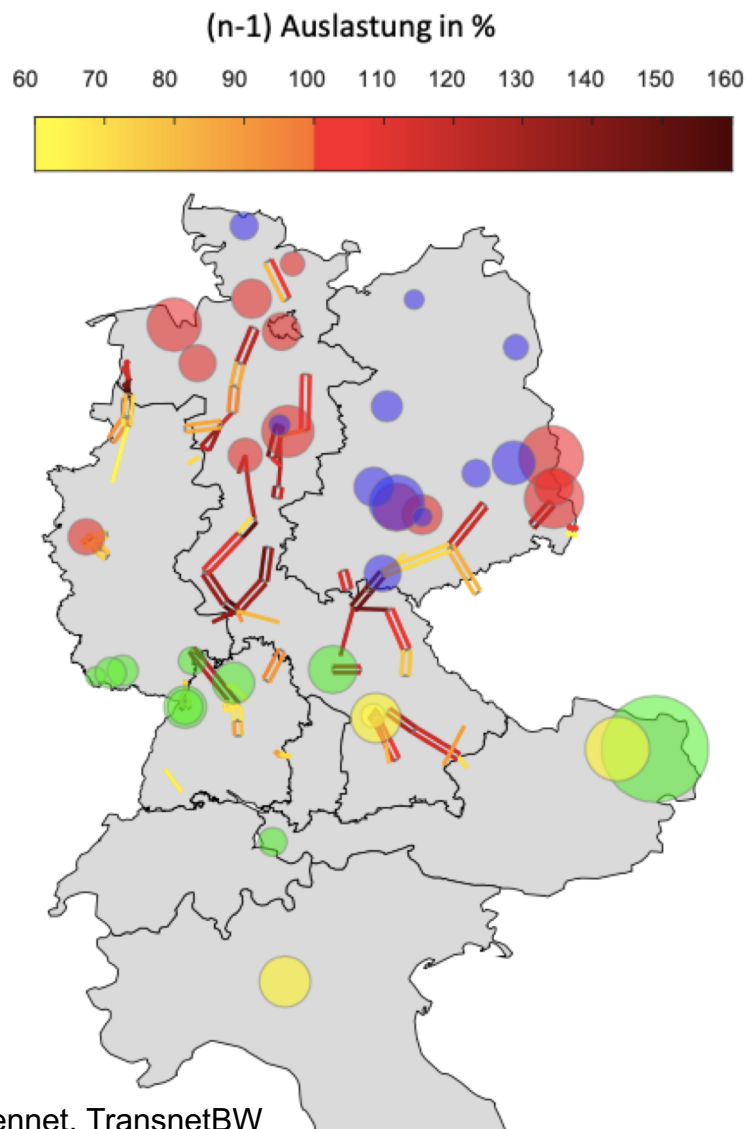




RD-Szenario für Starkwind

- Beispiel für intensiven Redispatch
- Mainlinie sichtbar als Nord/Süd-Grenze
- Im Süden werden Erzeuger gebraucht
- Thüringenbrücke noch nicht ausgebaut

- 380 / 220 kV Stromkreis (Freileitung/Kabel)
- Erhöhung Einspeiseleistung (realisiert)
- Verringerung Einspeiseleistung (realisiert)
- Aktivierung Netzreserve
- Einspeisemanagement (realisiert)
- ≈ 500 MW
- ≈ 100 MW



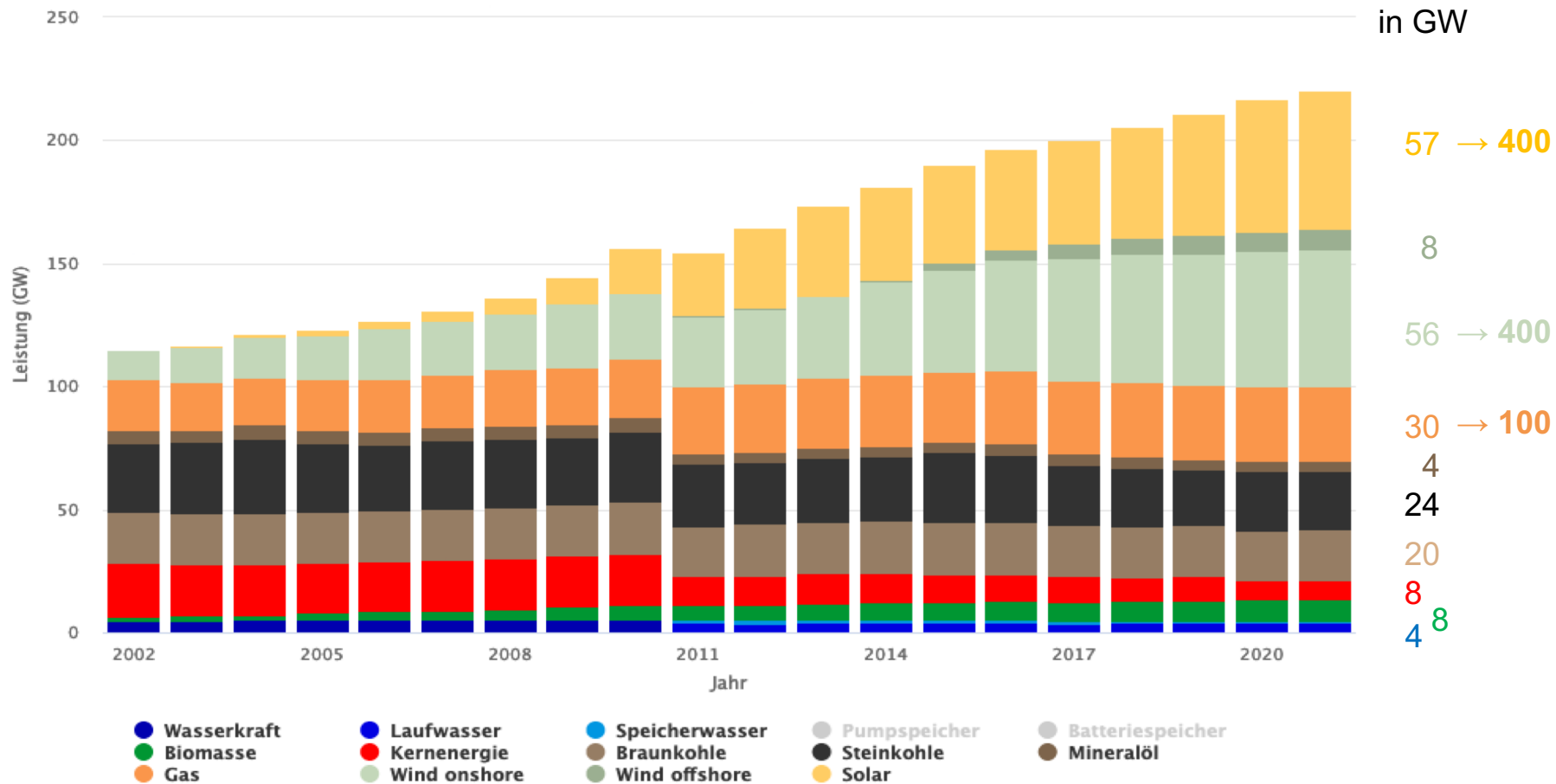
Bildquelle: 50Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW

Möchten Sie mehr wissen?

gunnar.kaestle@tu-clausthal.de
Tel. +49 5323 997724

Backup-Folien

Installierte Nettoleistung in Deutschland



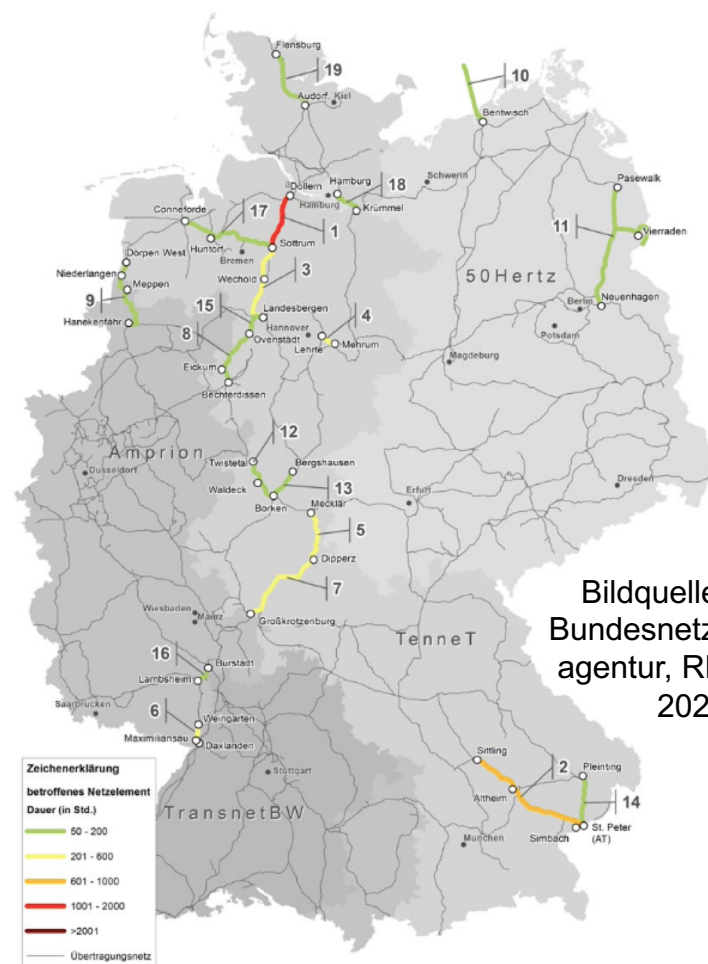
Datenquelle: AGEE, BMWi, Bundesnetzagentur;

Bildquelle: www.energy-charts.info



Das Netz ist keine Kupferplatte!

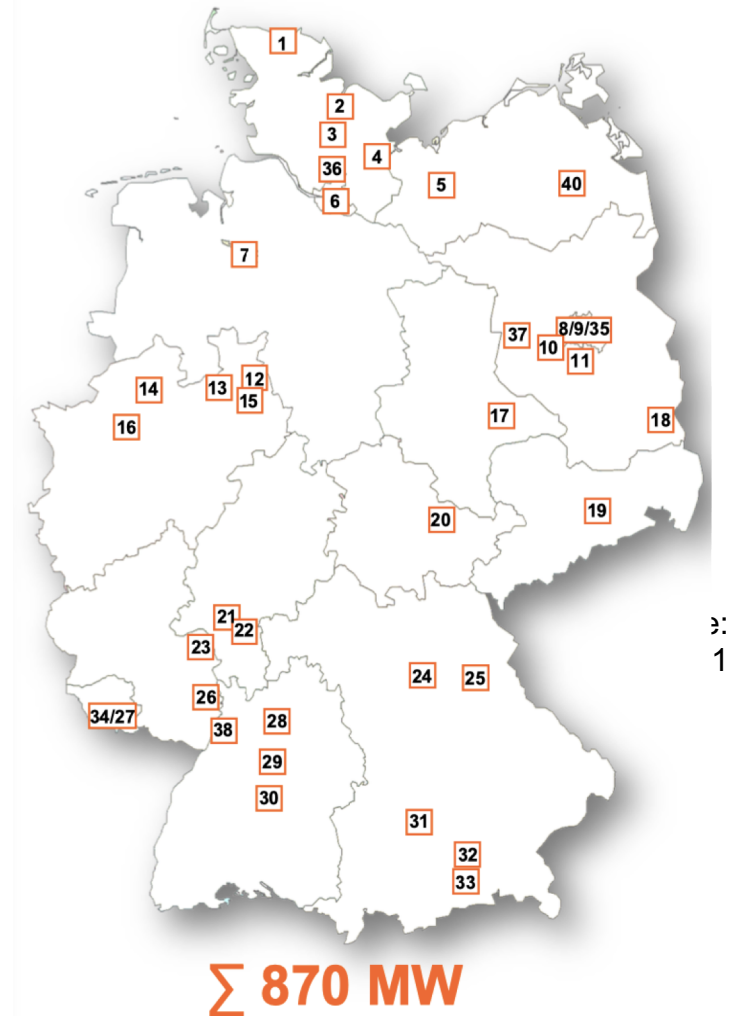
- Engpässe werden per Redispatch und Einspeisemanagement geheilt.
- In 2020 1,4 Mrd Euro und
- 6,1 TWh Abregelungen
- Briefmarkentarif subventioniert die Langstrecke gegenüber dem Kurztransport
- Fehlende Anreize für disponible Erzeuger und Lasten per Netzentgelt
- Engpässe im Verteilnetz verzögern den Anschluss von Neuanlagen





Flex: Power-to-Heat-Anlagen

- Motivation zur Investition: Teilnahme am Regelleistungsmarkt
- Kostengünstige Option (CAPEX) zur Verwertung von elektrischen Überschüssen (Elektrodenkessel)
- Flexibilisierung von KWK-Systemen
- NSA-Systematik nach EnWG 13(6a)
- Nutzen statt Abregeln
- EE-Spitzenlast sinnvoll „abfackeln“
- Niedrige Vollbenutzungsstunden p.a.
- Anreize für Verbraucher, beim Redispatch mitzumachen?

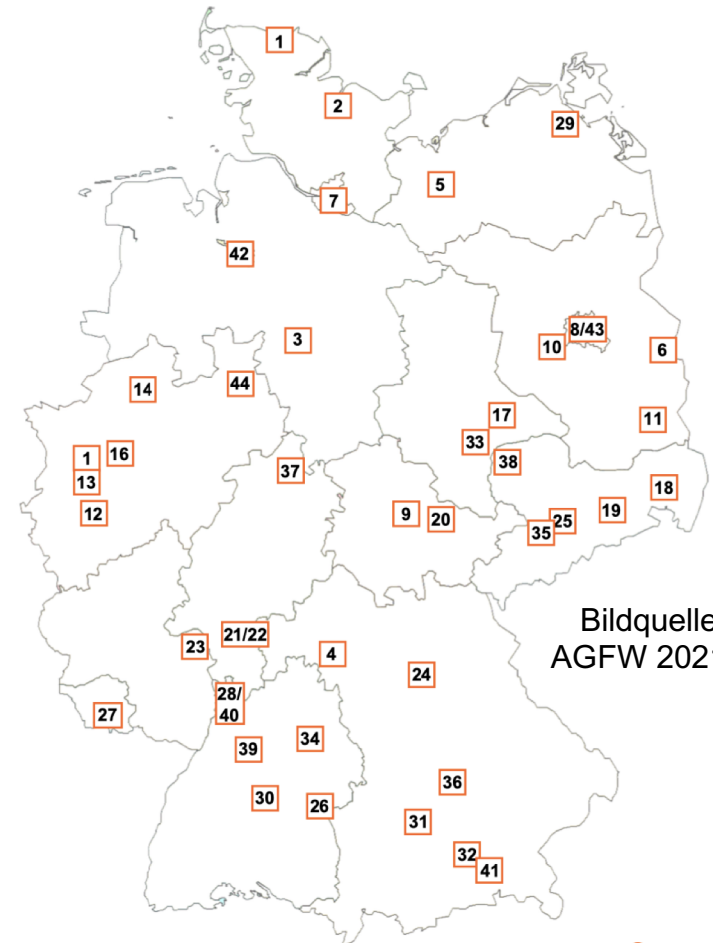


3:
1



Funktionale Stromspeicherung im Wärmespeicher

- Günstige Energiespeicheroption
- ca. 40-50 kWh/m³
- Versorgungssicherheit der Wärmeversorgung
- Je größer, desto kleiner die spezifischen Verluste
- Je größer, desto kleiner die spezifischen Kosten
- Mittelfristbereich Stunden/Tage
- Saisonalspeicher für Wärme immer noch finanziell grenzwertig



Σ 22 GWh, 570.000 m³



Der Wind und die Sonne (Aesop)



Bildquelle: Milo Winter @ [gutenberg.org/wikimedia.org](https://www.gutenberg.org/wiki/wikimedia.org)



Wer motiviert effektiver?