



Kraft-Wärme-Kopplung im energiewirtschaftlichen Kontext

Gunnar Kaestle, Institut für Elektrische Energietechnik

Bad Staffelstein, 27. Oktober 2010

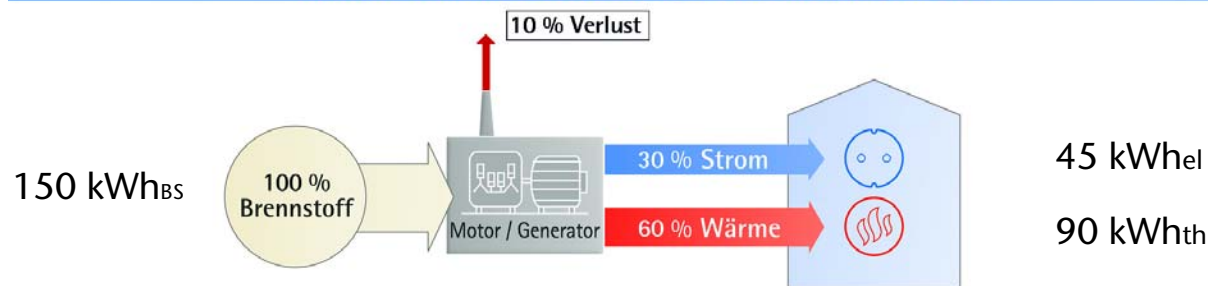
Thesen zur Gliederung

- KWK-Anlagen haben geringere variable Kosten
- KWK-Anlagen haben geringere kapitalbasierte Fixkosten (in DE)
- KWK-Anlagen bieten Vorteile im wettbewerblichen Strommarkt
- KWK-Anlagen ermöglichen eine funktionale Stromspeicherung

Differentieller Wirkungsgrad

- Hocheffiziente Verstromung des zusätzlich benötigten Brennstoffes unter Nutzung einer Wärmesenke

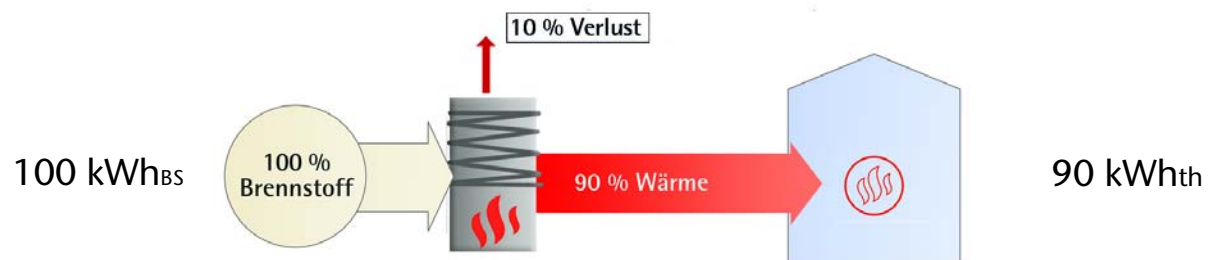
(1) KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG (Blockheizkraftwerk)



Quotient aus Stromertrag und zusätzlich benötigtem Erdgas

(1)-(2):
 $\eta_{\text{diff}} = 45/50 = 90\%$

(2) HEIZUNG (Wärme im Kessel)



Sofern die Gesamtwirkungsgrade von BHKW und Referenzkessel gleich sind, entspricht der differentielle Wirkungsgrad der Gesamteffizienz.

Variable Kosten der Stromerzeugung

- Variable Kosten verringern sich um den Betrag der Wärmegutschrift

$$k_{el} = \frac{k_{BS}}{\eta_{el}} + k_{sonst} - \frac{1}{s} \cdot (p_{th} - k_{NN-th})$$

Brennstoff-
kosten Wartungs-
kosten Wärmegutschrift
(3-5 ct/kWh_{th})

- k_{el} : variable Kosten der Stromerzeugung
- η_{el} : elektrischer Wirkungsgrad
- k_{sonst} : sonstige variable Kosten, z.B. für Wartung & Instandhaltung
- s : Stromkennzahl als Verhältnis $P/Q' = \eta_{el}/\eta_{th}$ ($s = 0,3 \dots 2$)
- p_{th} : anlegbarer Preis der Wärme
- k_{NN-th} : Kosten der Wärmenetznutzung

Variable Kosten der Wärmeerzeugung

- Variable Kosten verringern sich um den Betrag der Stromgutschrift

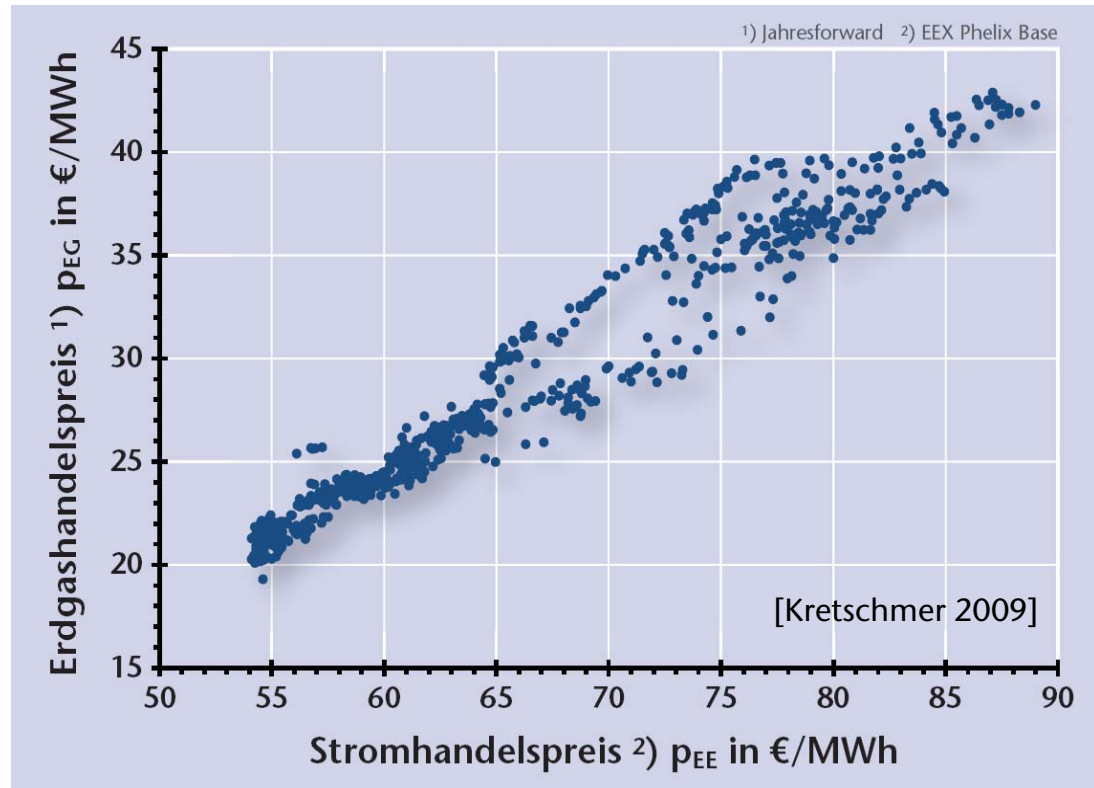
$$k_{th} = \frac{k_{BS}}{\eta_{th}} + s \cdot k_{sonst} - s \cdot (p_{el} - k_{NN-el})$$

Brennstoff-
kosten Wartungs-
kosten Stromgutschrift
(5-20 ct/kW_{el})

- k_{th} : variable Kosten der Wärmeerzeugung
- η_{th} : thermischer Wirkungsgrad
- k_{sonst} : sonstige variable Kosten, z.B. für Wartung & Instandhaltung
- s : Stromkennzahl als Verhältnis $P/Q' = \eta_{el}/\eta_{th}$ ($s = 0,3 \dots 2$)
- p_{el} : anlegbarer Strompreis
- k_{NN-el} : Kosten der Netznutzung

Zusammenhang von Erdgas- und Strompreisen

- Hohe Erdgaspreise verteuern Spitzenlaststrom aus GT und GuD
- Mittellast korreliert über den Kohlepreis
- Regressionsgrade entspricht variablen Kosten $p_{\text{gas}}/\eta_{\text{el}} + p_{\text{serv}}$
- „Schlag den Markt“: mit $p_{\text{serv}} < 25 \text{ €/MWh}$ und $\eta_{\text{diff}} > 66\%$



Regressionsgrade: $p_{\text{el}} = 25 \text{ €/MWh} + 1,5 \cdot p_{\text{gas}}$

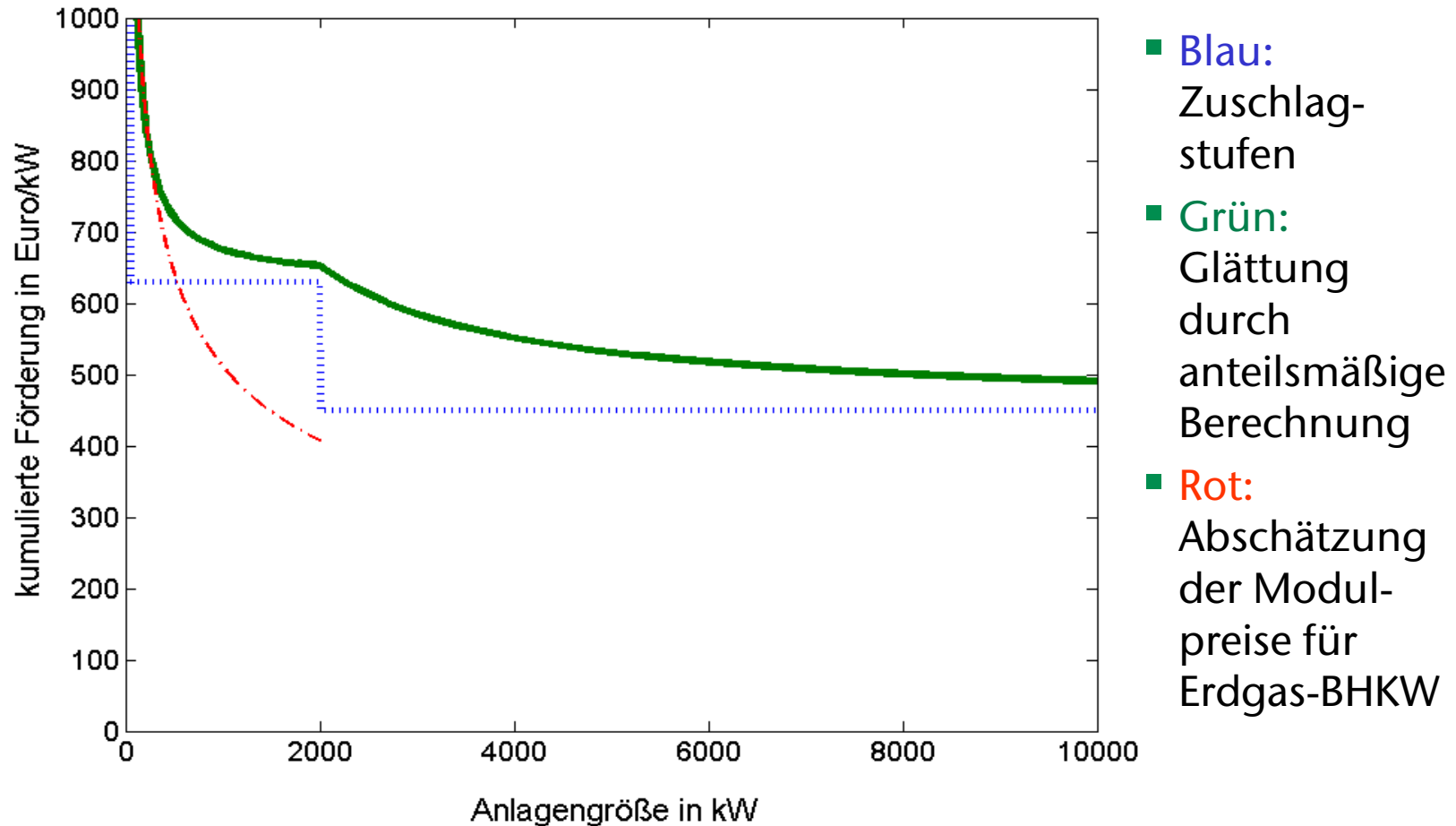
Gliederung

- KWK-Anlagen haben geringere variable Kosten
- KWK-Anlagen haben geringere kapitalbasierte Fixkosten (in DE)
- KWK-Anlagen bieten Vorteile im wettbewerblichen Strommarkt
- KWK-Anlagen ermöglichen eine funktionale Stromspeicherung

Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz 2009

- Laufzeit: 1.1.2009 – 31.12.2016
- Ziel ist Verdopplung des KWK-Stromanteils auf 25% bis 2020 (§1 KWK-G)
- KWK-Zuschlag auf die gesamte Stromerzeugung der Anlage (bisher wurde nur der eingespeiste Strom gefördert)
- Zuschlagshöhe (geglättete Stufen)
 - 5,11 ct/kWh bis 50 kW
 - 2,1 ct/kWh von 50 kW bis 2 MW
 - 1,5 ct/kWh ab 2 MW
- Geförderte Betriebsdauer:
6 Jahre oder 4 Jahre (Industrie) und maximal 30.000 Vbh
bzw. 10 Jahre (bis 50 kW)

Kumulierte Fördersumme für KWK-Anlagen bis 10 MW



Kumulierter KWK-Zuschlag

- Entspricht einer leistungsspezifischen Fördersumme von 450 / 630 / 1533 €/kW (ohne Diskontierung)
- $30.000 \text{ Vbh} = 5.000 \text{ h/a} * 6 \text{ a} = 7.500 \text{ h/a} * 4 \text{ a}$
- Bei bekanntem Wärmebedarf sicherer „Investitionszuschuss auf Raten“

- Große GuD-Anlagen ~400-800 €/kW
- Offene Gasturbinen ~300-400 €/kW
- Große BHKW ~500-1000 €/kW

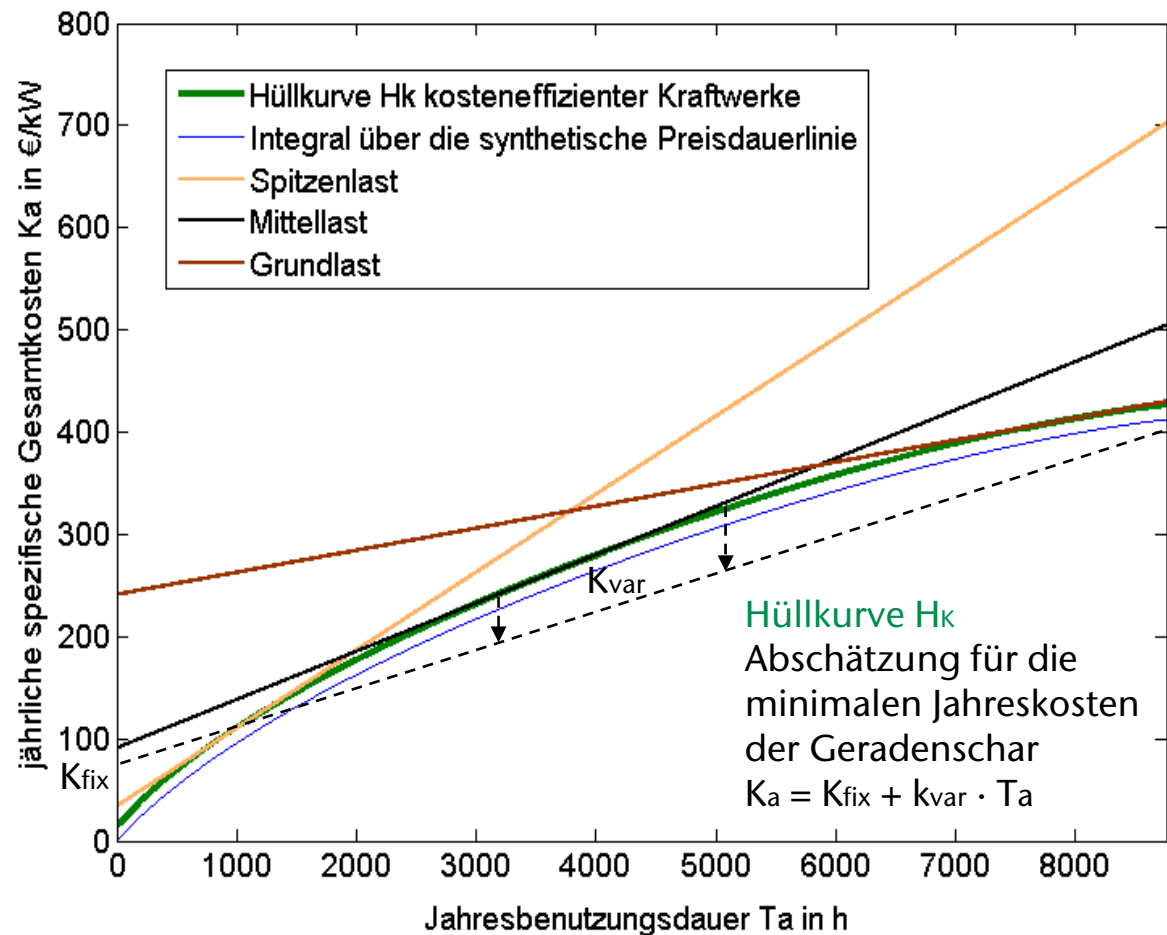
- Reduziert das Investitionsrisiko bis zum Break Even
- Amortisationszeit der anfänglichen Investitionsausgabe verkürzt sich

Gliederung

- KWK-Anlagen haben geringere variable Kosten
- KWK-Anlagen haben geringere kapitalbasierte Fixkosten
- KWK-Anlagen bieten Vorteile im wettbewerblichen Strommarkt
- KWK-Anlagen ermöglichen eine funktionale Stromspeicherung

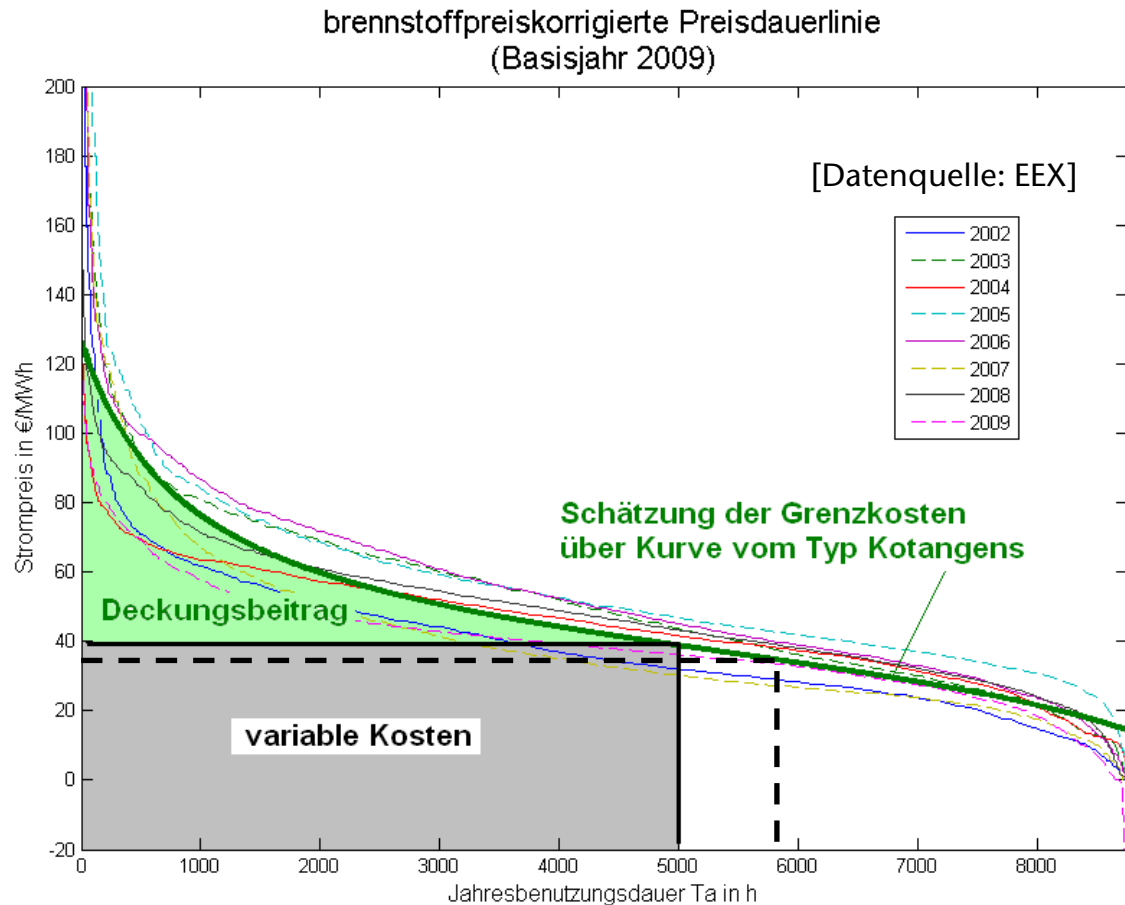
Kostenstruktur bestimmt den Kraftwerkseinsatz

- Gesamtkosten als Linearkombination von fixen und variablen Kosten
- Spitzenlast: niedrige Fixkosten
- Grundlast: niedrige variable Kosten
- Abschätzung der Effizienzkurve als Einhüllende vom Typ $\log(\sin(\cdot))$
- KWK senkt variable und fixe Kosten



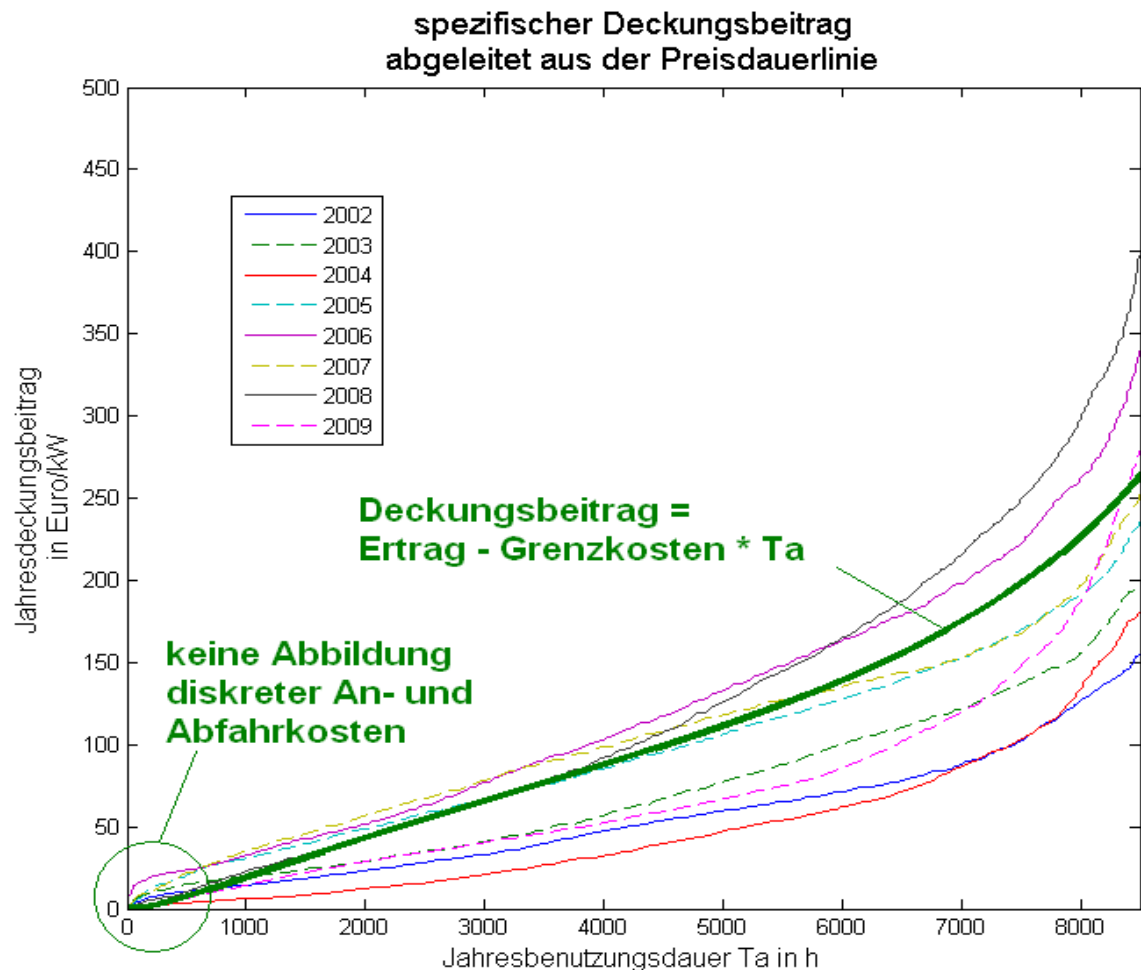
Preisdauerlinien bestimmen die Erträge

- Absteigend sortierte Börsenpreise (EPEX) der Stundenkontrakte
- Negative Preise seit 2008 zulässig
- Approximation Preisdauerlinie durch Kotangens
- Deckungsbeitrag steigt durch Senkung der variablen Kosten



Deckungsbeitrag als entscheidungsrelevante Kenngröße

- $DB = \text{Erträge} - \text{variable Kosten}$
- Zur Deckung der Fixkosten
- Deckungsbeitragsmaximierung als Zielfunktion
- Längere Laufzeiten (geringere variable Kosten) ergeben höheren DB
- Grundlastkraftwerke profitieren von hohen Brennstoffpreisen

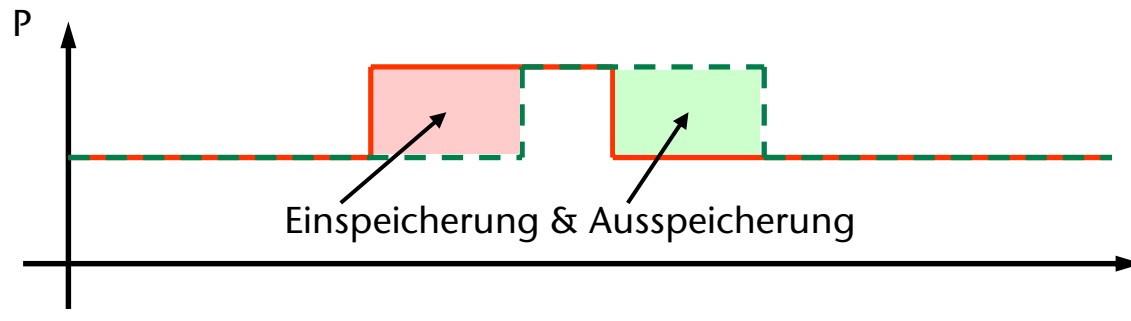


Gliederung

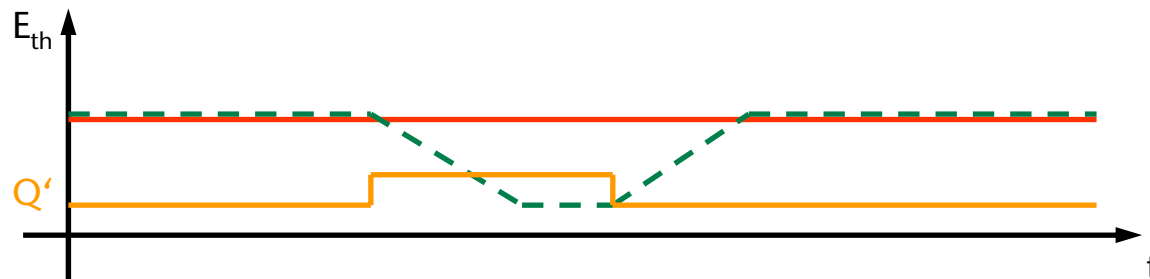
- KWK-Anlagen haben geringere variable Kosten
- KWK-Anlagen haben geringere kapitalbasierte Fixkosten
- KWK-Anlagen bieten Vorteile im wettbewerblichen Strommarkt
- KWK-Anlagen ermöglichen eine funktionale Stromspeicherung

Funktionale Stromspeicherung

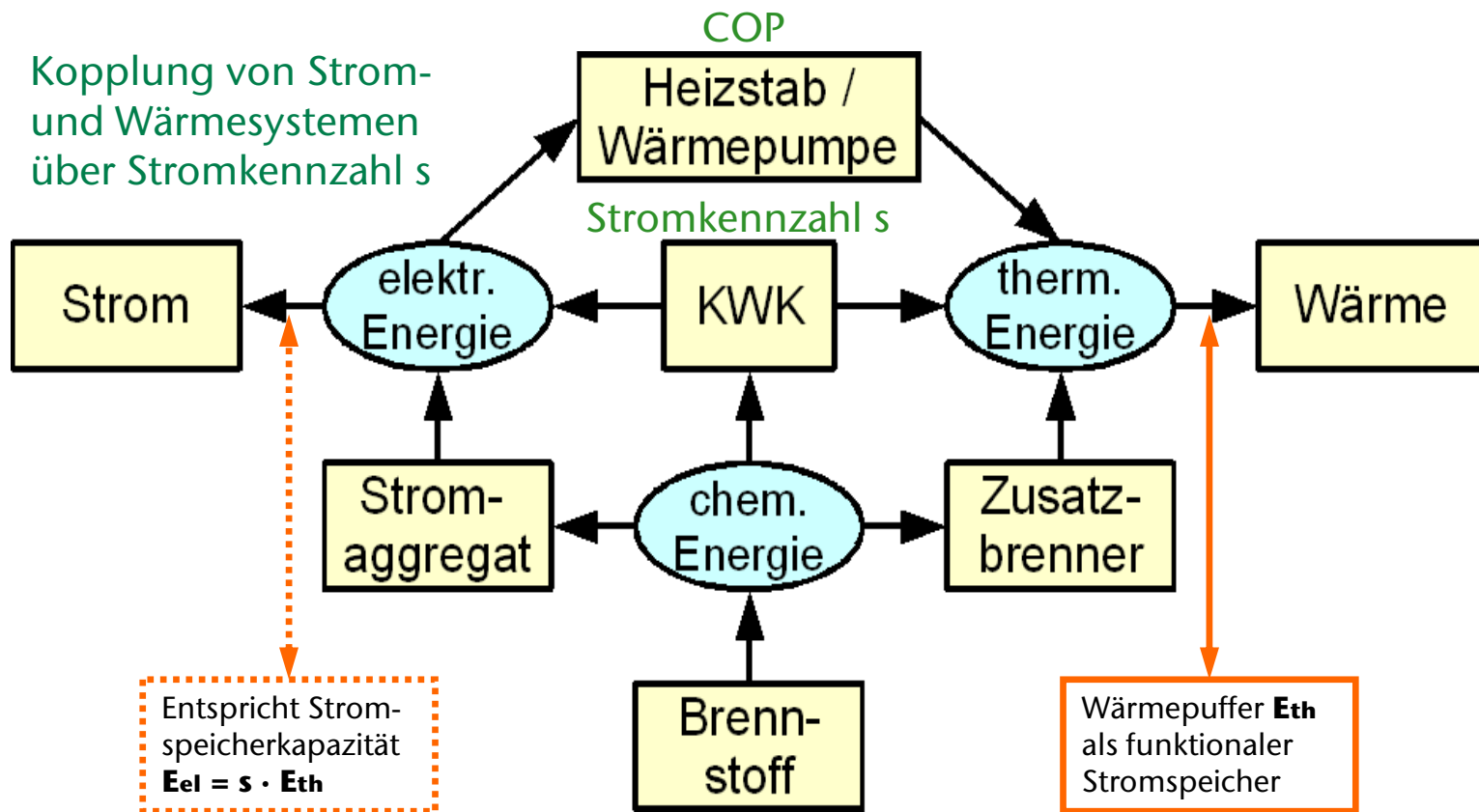
- Verschiebung der Einspeisung in der Zeit, Speicherung von Wärme
- Fahrplanänderung der KWK-Anlage $P_1(t) \rightarrow P_2(t)$



- Wärmespeicherniveau: E_1 rein wärmegeführt nach Wärmelast Q' , E_2 strom- bzw. netzgeführt

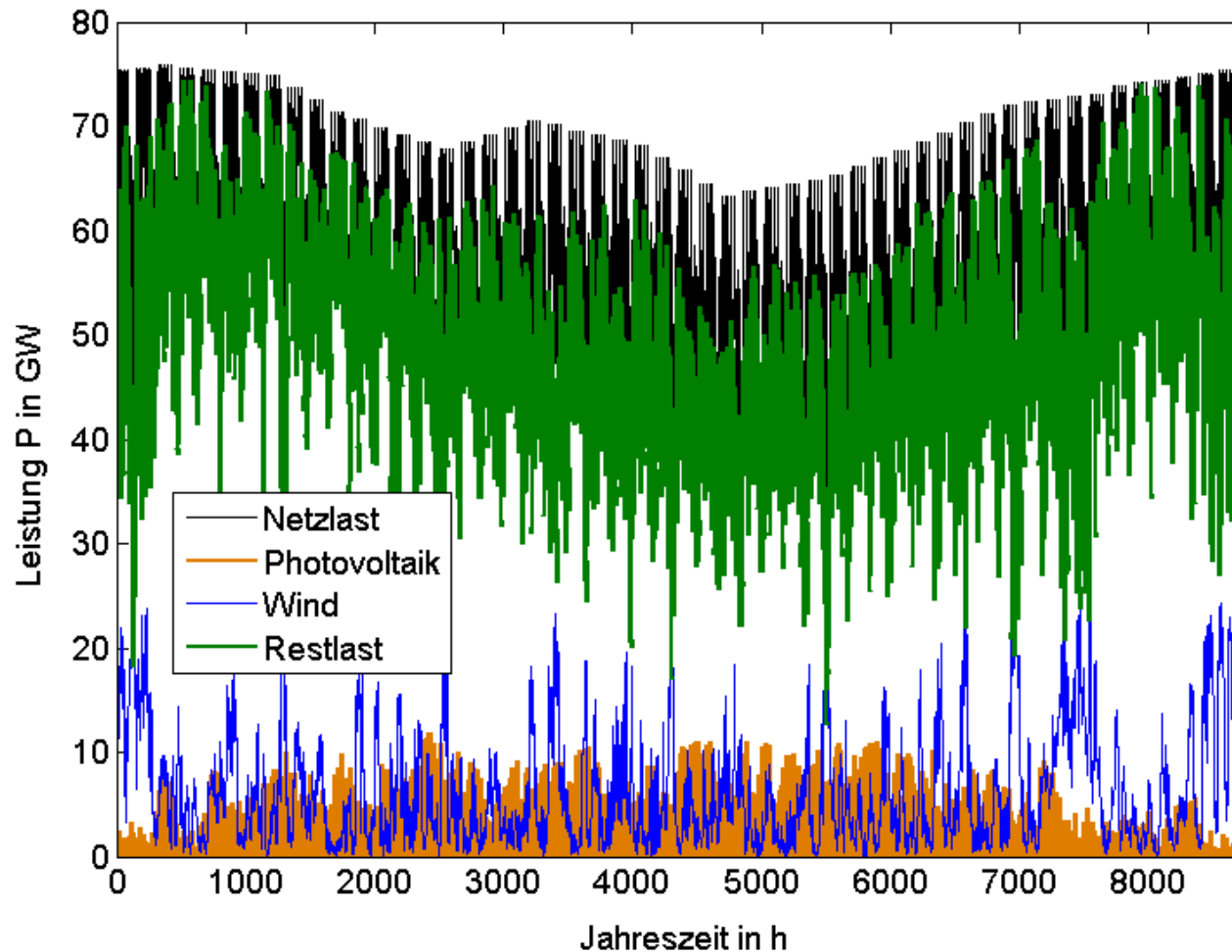


Alternative Energiepfade zur Kraft-Wärme-Kopplung



Flexibles Energiesystem zur funktionalen Stromspeicherung: $1 \text{ m}^3 \text{ Wasser} \sim 25 \text{ kWh}_{el}$

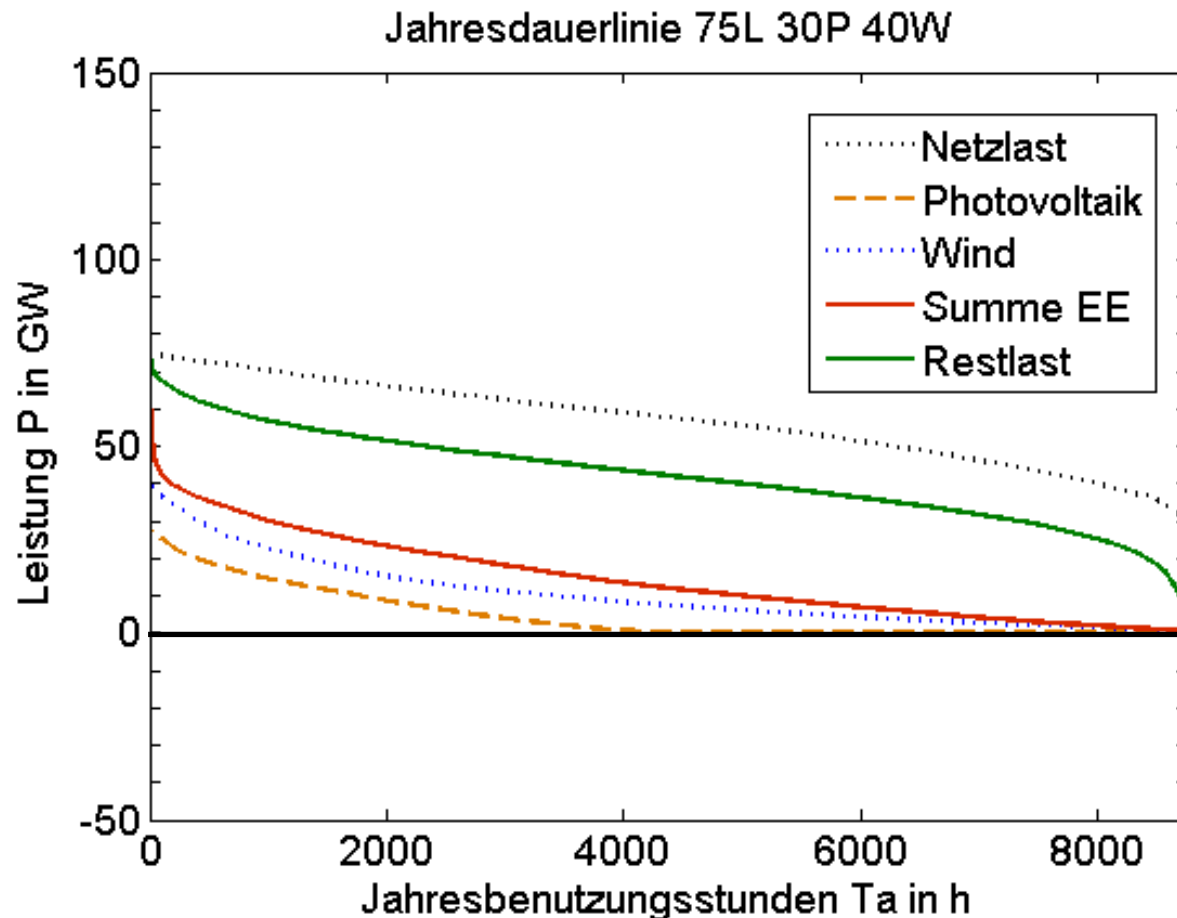
Notwendigkeit der Flexibilisierung / Stromspeicherung



Zeitreihen für
Last (75 GW),
Wind (25GW) und
PV (12 GW) nach

Volker Quaschnig
(2000): System-
technik einer
klimaverträglichen
Elektrizitätsver-
sorgung in
Deutschland für
das 21. Jahrhundert

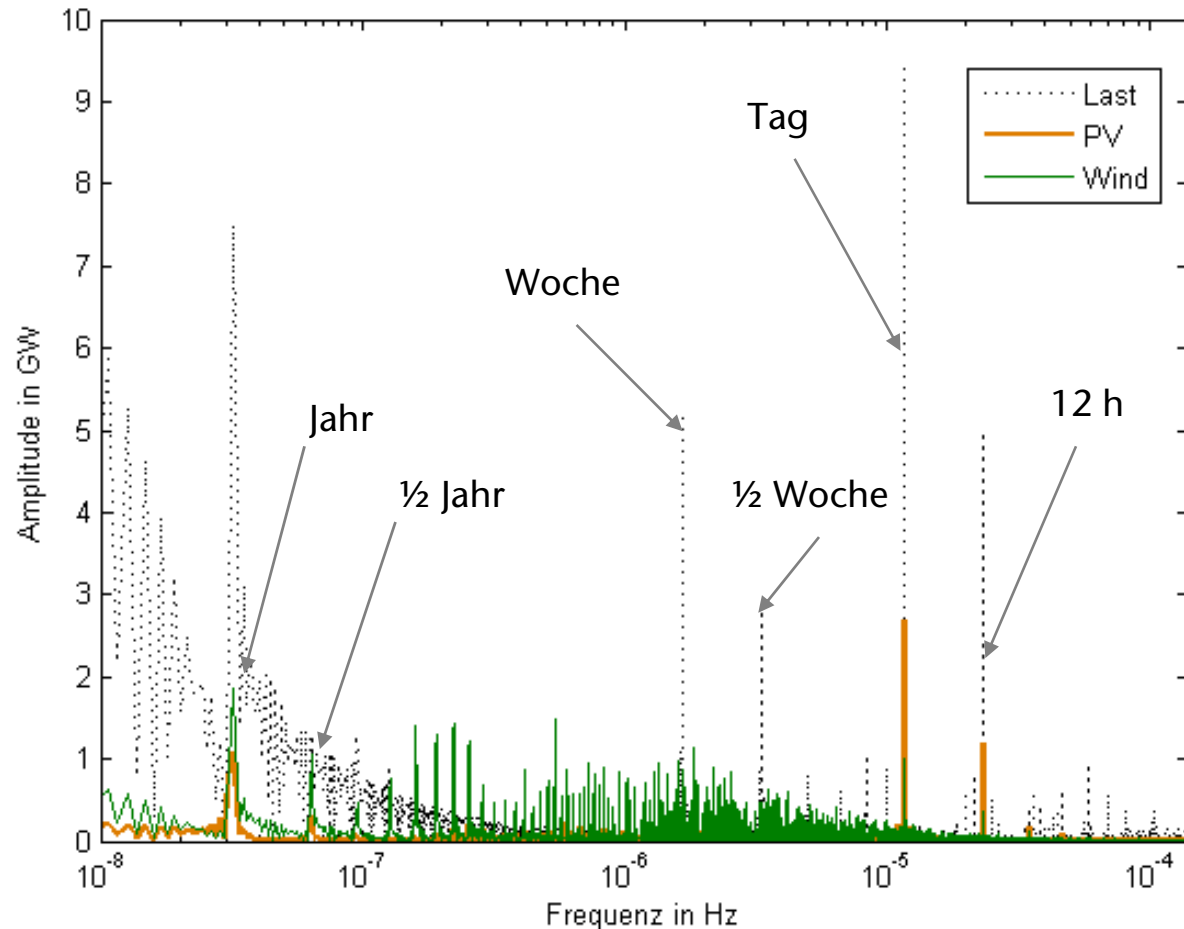
Ein Szenario für 2020: Grundlast strebt gegen Null



- Residuale Last benötigt kaum Grundlastkapazitäten
- Spitzenlast unverändert als Reservekapazität notwendig
- Jahresdauerlinie enthält keine Aussagen zur zeitlichen Abfolge von Schwach- und Starklast

Speicherbedarf in Abhängigkeit der Periodendauer

- FFT der
 - Last 75 GW
 - PV 12 GW
 - Wind 25 GW
- Wind hat starken Rauschanteil
- Phasenlage im Tages- und Jahreszyklus verstärkt oder verringert Amplituden



Zusammenfassung

- Schrumpfender Kraftwerkspark in gereiften Elektrizitätsmärkten
 - Quantitativ: nach Liberalisierung Abbau von Überkapazitäten
 - Qualitativ: Substitution durch erneuerbare Energien
- Investitionen in neue Kraftwerke mit ungewisser Amortisation
- KWK-Anlagen erhalten „Investzulage auf Raten“ (KWK-Zuschlag in DE)
 - Vorteil in der Investitionsphase
- KWK-Anlagen erhalten Wärmegutschrift
 - Vorteil im operativen Betrieb
- Höhere Laufzeiten durch niedrigere Stromgestehungskosten
- Option der funktionalen Stromspeicherung: $1 \text{ m}^3 \text{ Wasser} \sim 25 \text{ kWh}_{\text{el}}$



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kaestle@IEE.TU-Clausthal.de

Tel. +49 5323 72-2572