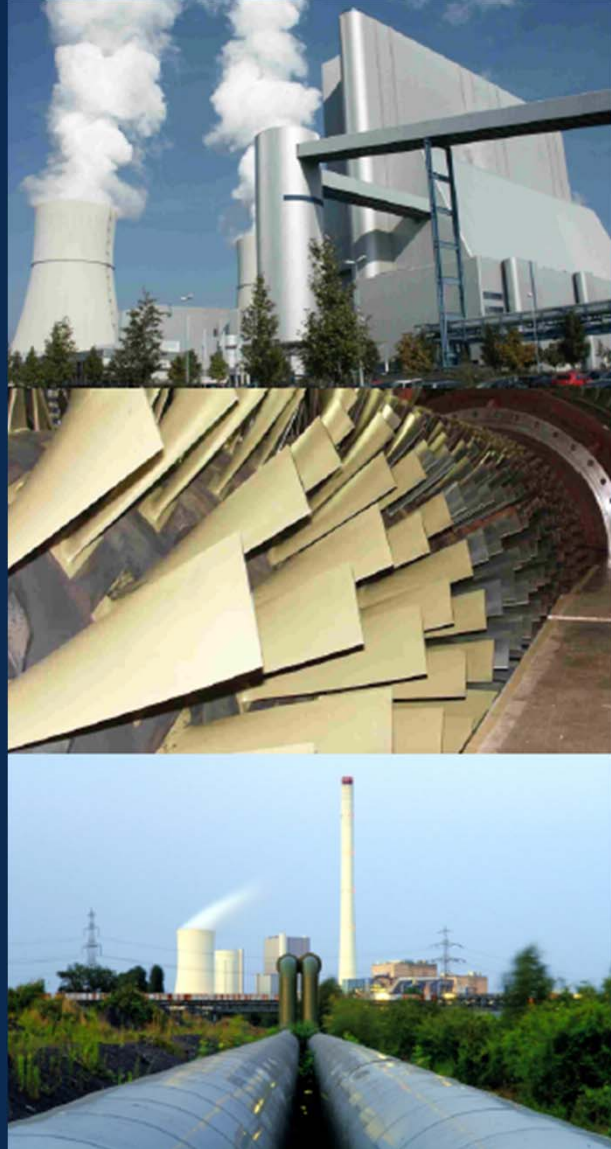




TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN

**IET**  
Institut für Energietechnik

Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik, Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung



# Kraft-Wärme-Kopplung:

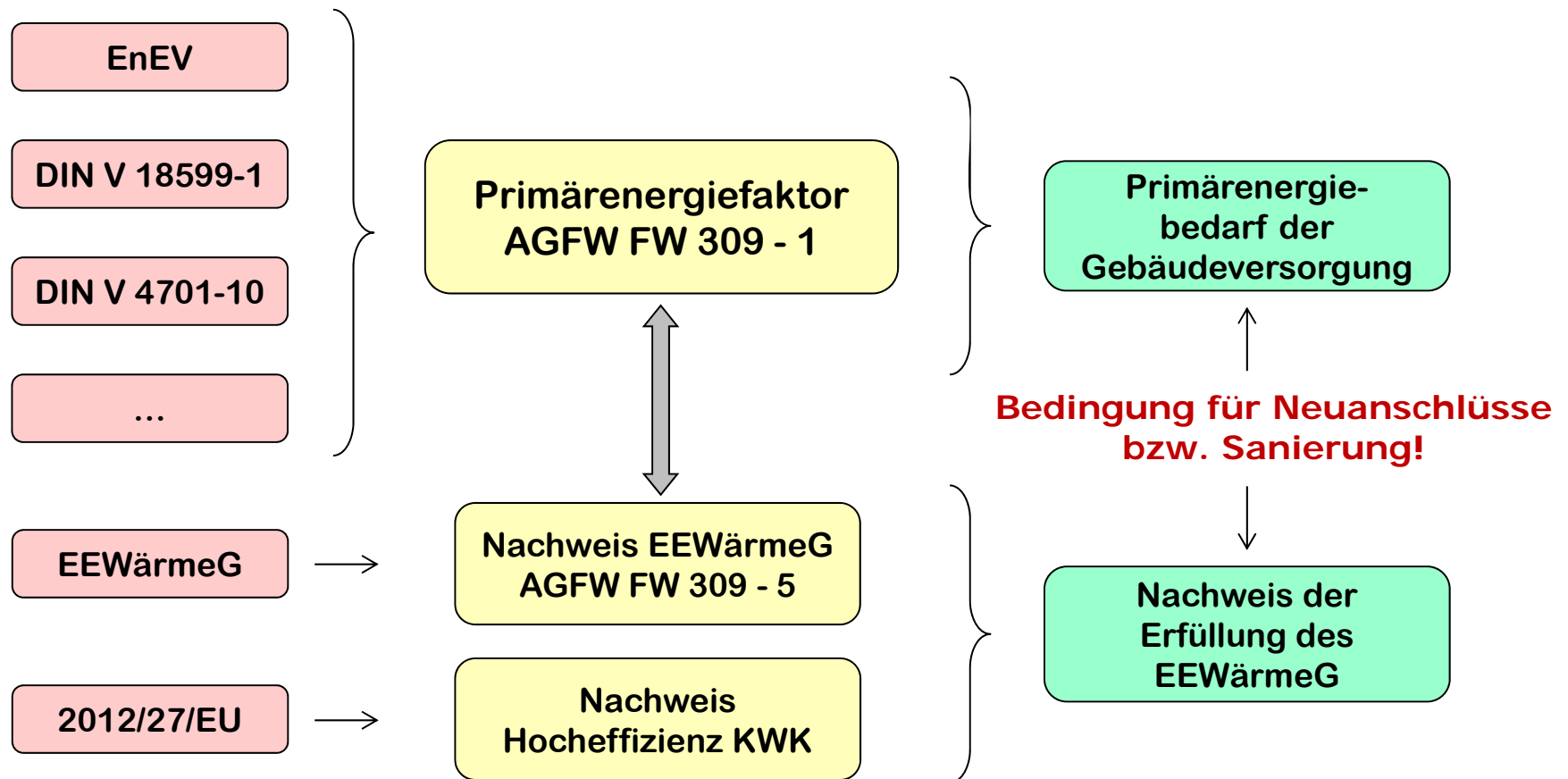
KWK-Stromerzeugung,  
Hocheffizienz der KWK  
und CO<sub>2</sub>-Emissionen

Dr.-Ing. Thomas Sander

Workshop  
„EFRE-Förderung in Sachsen zur integrierten  
nachhaltigen Stadtentwicklung“  
02.07.2015

- Qualität der Fernwärme in der Fernwärmeversorgung
- Primärenergiefaktor der Fernwärme
- Energiebedarf von Gebäuden: EnEV und Fernwärmeversorgung
- Qualität der Fernwärme in der Förderung klimaschutzrelevanter Projekte
- Effizienzbewertung der Fernwärmeversorgung und KWK
- Ermittlung des KWK-Stroms
- Hocheffizienz von KWK-Anlagen
- Emissionen der Wärmeversorgung
- Zweck der Allokationsmethoden
- Probleme der Allokation und physikalische Grenzen
- Energetische Allokation
- Stromgutschriftmethode
- Finnische Methode
- Stromverlustmethoden
- Ergebnisse

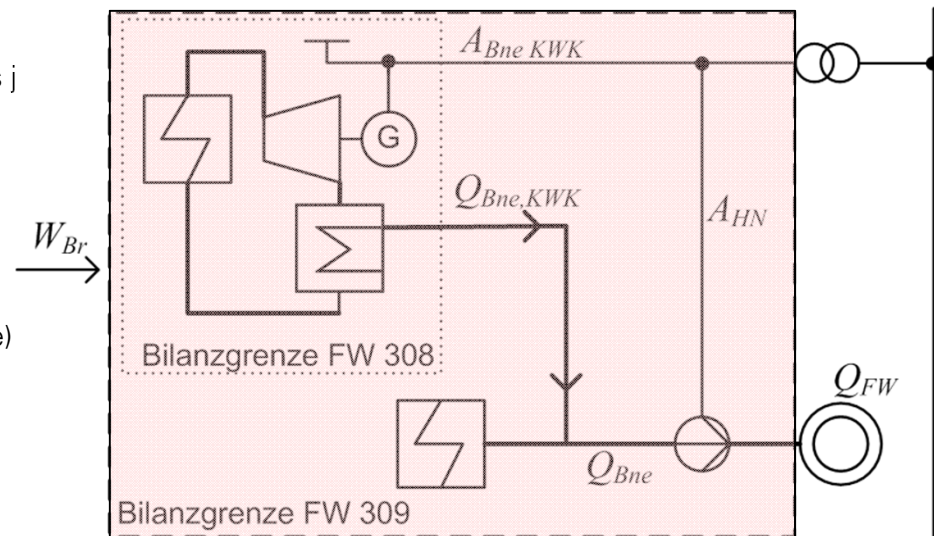
## Zusammenspiel von Regeln, Normen und Gesetzen



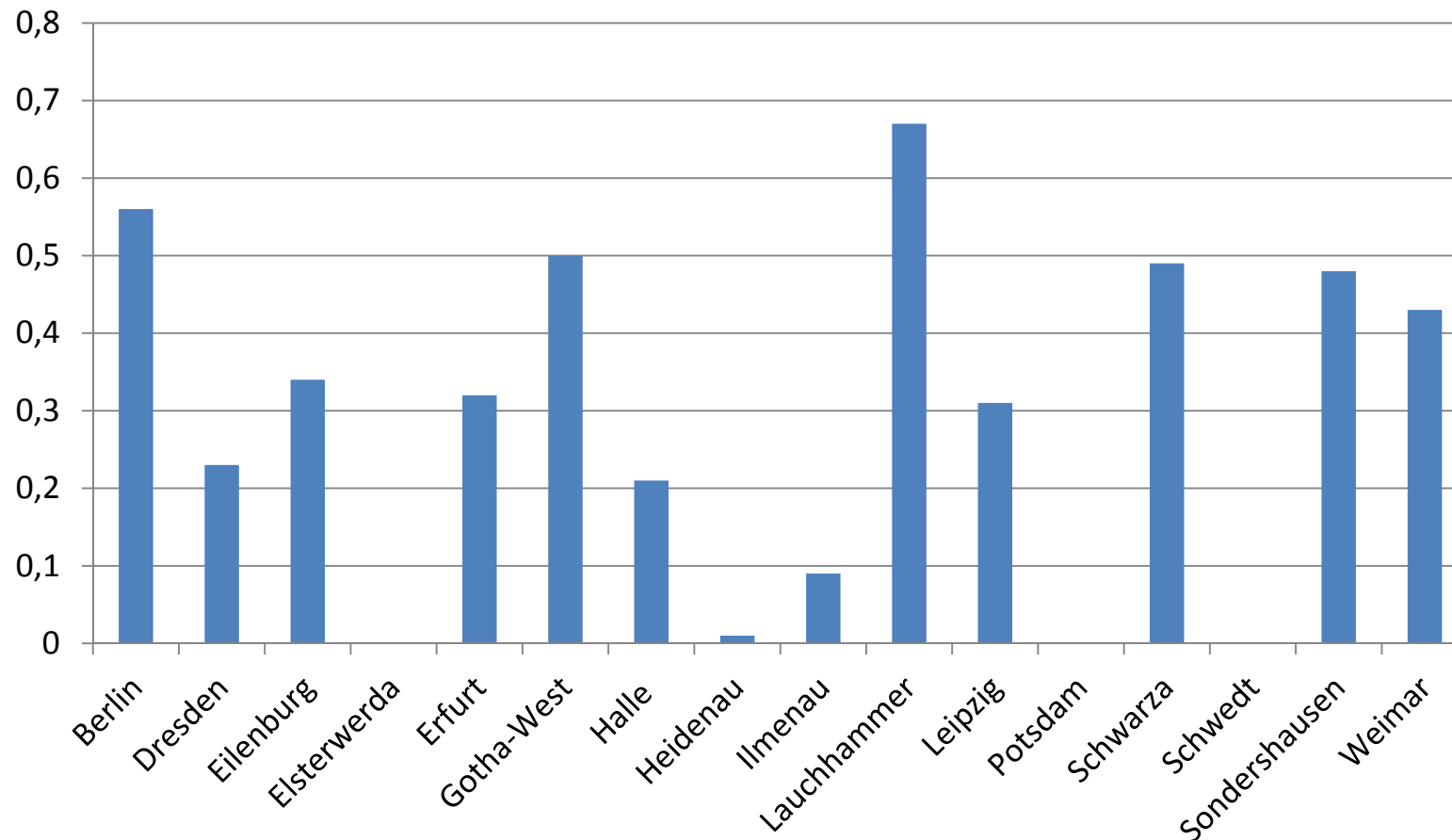
## Ermittlung des Primärenergiefaktors

$$f_{P,FW} = \frac{\sum_j (W_{Br,j} \cdot f_{P,Br,j}) + (A_{BEig} + A_{HN} - A_{Bne,KWK}) \cdot f_{P,verdr} + Q_{ext} \cdot f_{P,ext}}{\sum_i Q_{FW,i}}$$

- $f_{P,FW}$**  : Primärenergiefaktor der Wärmeversorgung in kWh Primärenergie je kWh Heizenergie an der Gebäudehülle
- $W_{Br,j}$**  : Brennstoffwärme des Energieträgers j für die Wärmeerzeugerwerke
- $f_{P,Br,j}$**  : Primärenergiefaktor des jeweiligen Brennstoffes j unter Berücksichtigung der Vorkette
- $A_{Bne,KWK}$**  : Elektrische Nettoarbeit der Heizkraftwerke
- $A_{BEig}$**  : Betriebseigenverbrauch Strom von Wärmeerzeugern ohne Koppelproduktion
- $A_{HN}$**  : Stromarbeit zum Betrieb des Heiznetzes (Umwälzung und Druckhaltung, ggf. Hilfsenergie)
- $f_{P,el}$**  : Primärenergiefaktor der Strombereitstellung
- $f_{P,verdr}$**  : Primärenergiefaktor des ersetzten (verdrängten) elektrischen Stroms
- $Q_{ext}$**  : von einer Erzeugungsanlage außerhalb der Bilanzgrenzen gelieferte Wärme
- $f_{P,ext}$**  : Primärenergiefaktor der Bereitstellung von  $Q_{ext}$
- $Q_{FW,i}$**  : Heizenergie an der Übergabestelle (Hausanschlussstation) zum Gebäude i (Wärmeabsatz)



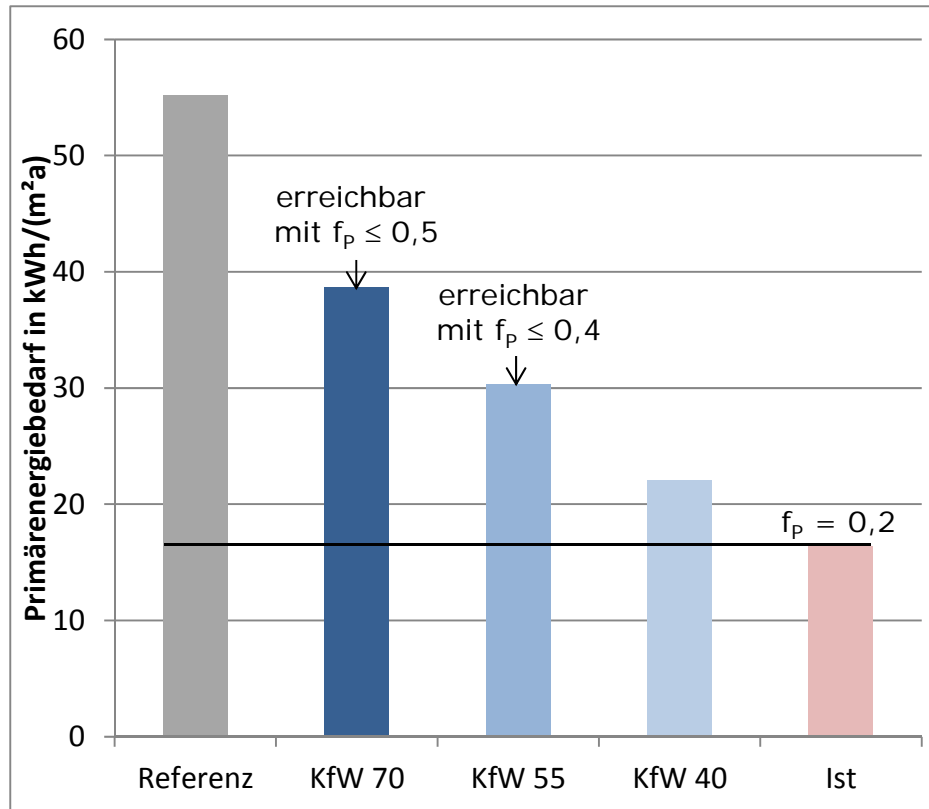
## Primärenergiefaktoren im Vergleich



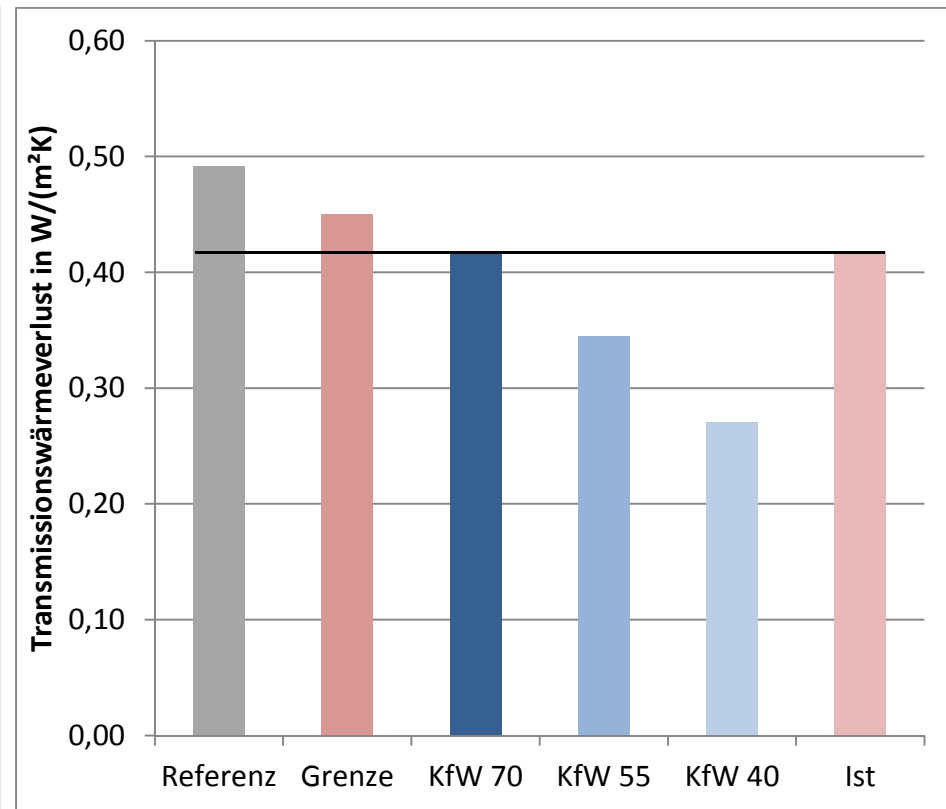
## Beispiel: Sanierter Wohnblock



## Beispiel: Sanierter Wohnblock



⇒ abhängig von Energieversorgung!



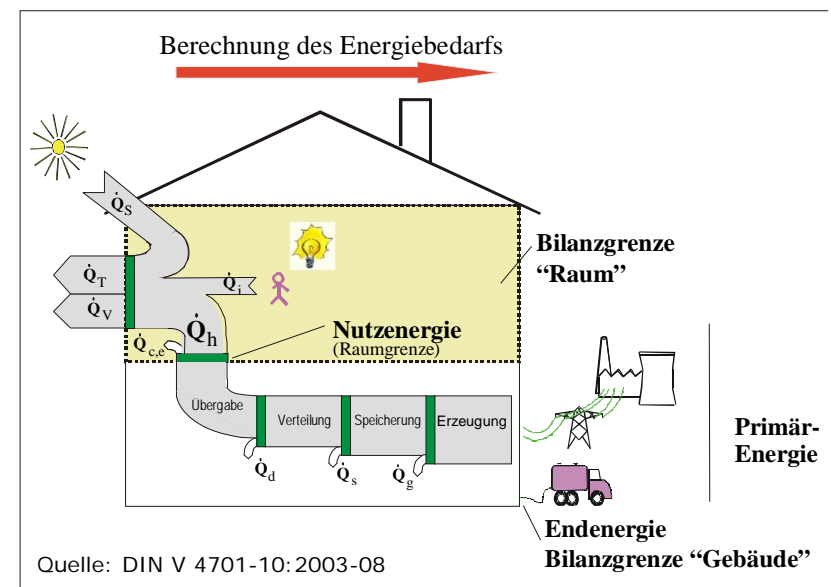
⇒ abhängig von Bauphysik!

Beispiel Sanierung Wohnblock: Erfüllung der EnEV 2009

- **Energetische Anforderungen für Wohn-/Nichtwohngebäude**
  - Maximaler Jahresprimärenergiebedarf  $Q_p$
  - Maximaler Transmissionswärmeverlust  $H_T$
  - Sommerlicher Wärmeschutz
  
- **Primärenergiefaktor der Wärmeversorgung**
  - Heizkessel: Weitere Maßnahmen am Gebäude nötig
  - Netze mit KWK: Anforderungen werden i. d. R. übererfüllt

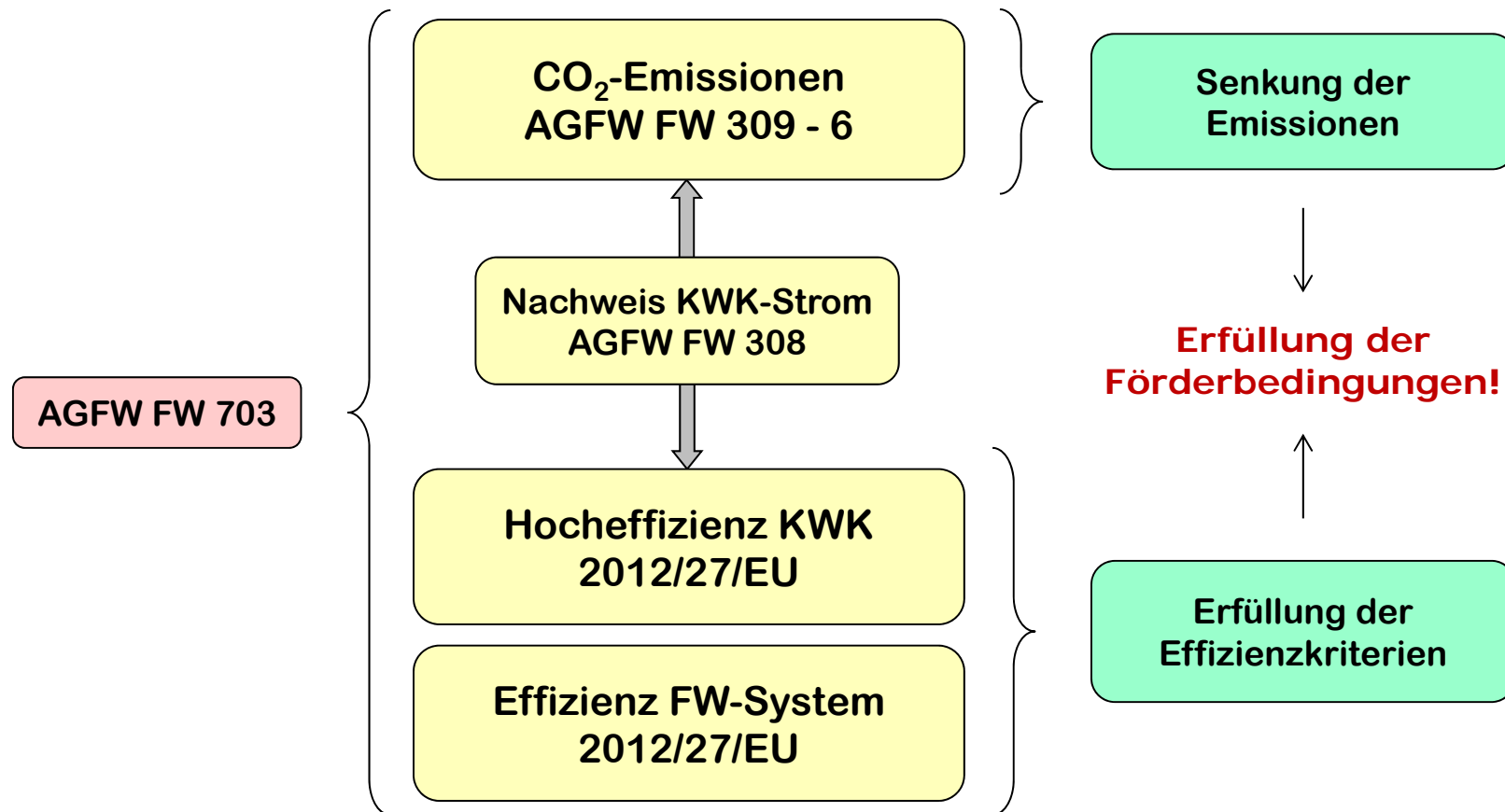
⇒ **Es greifen oft die Grenzwerte des Transmissionswärmeverlustes!**

⇒ **Anforderungen an Fernwärmeversorgung durch andere Regelungen!**





## Förderung klimaschutzrelevanter Projekte



## Effizienzbewertung nach Richtlinie 2012/27/EU

Im Sinne der Richtlinie [2012/27/EU](#) bezeichnet der Ausdruck

### „Effiziente Fernwärme- und Fernkälteversorgung“:

Fernwärme- oder Fernkältesystem, das mindestens

- 50 % erneuerbare Energien,
- 50 % Abwärme,
- 75 % KWK-Wärme oder
- 50 % einer Kombination dieser Energien und dieser Wärme nutzt;

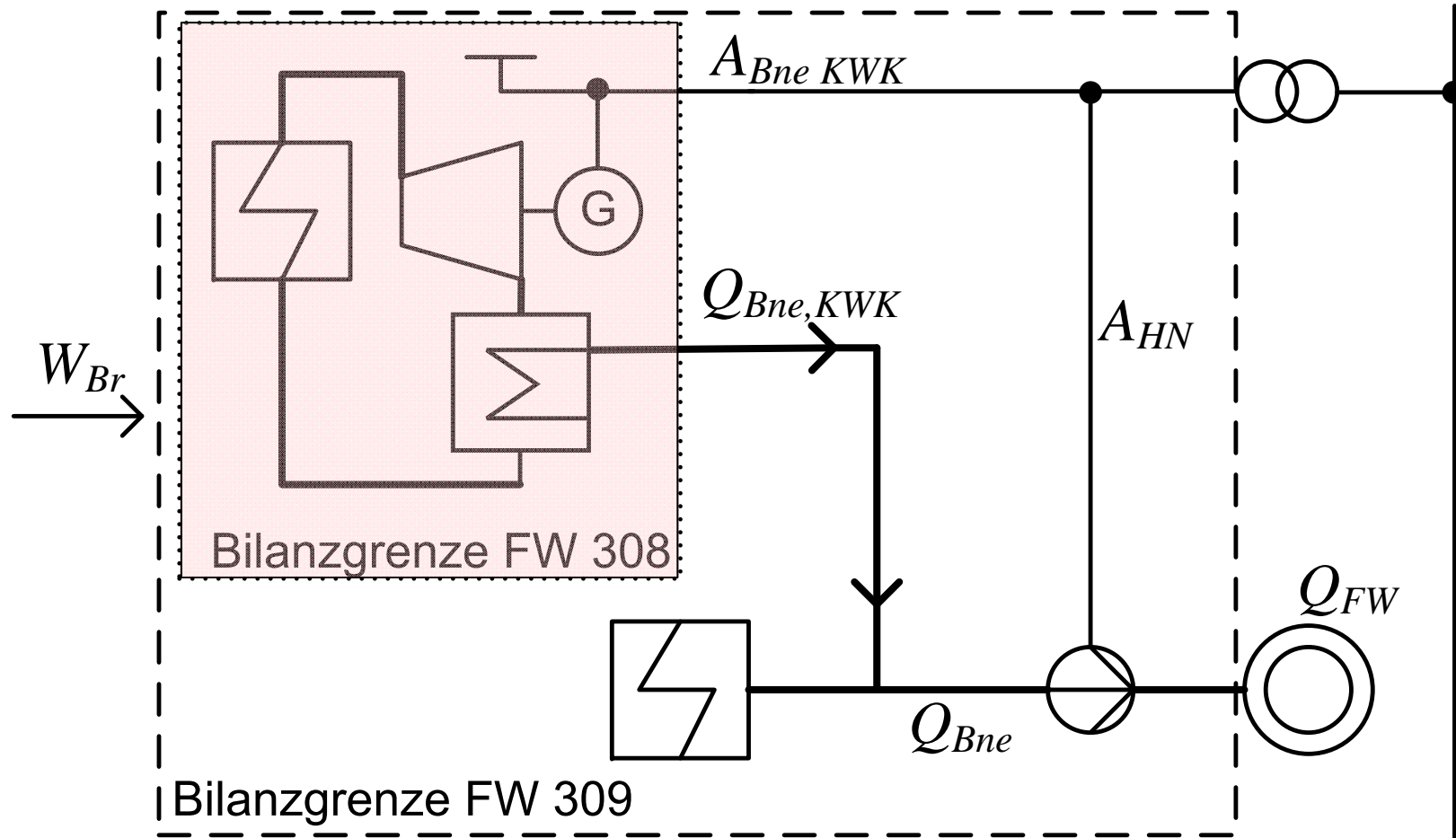
*Anforderungen  
wie EEWärmeG  
bzw. höher!*

### „Hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplung“:

Im Rahmen dieser Richtlinie muss hocheffiziente KWK folgende Kriterien erfüllen:

- die KWK-Erzeugung in KWK-Blöcken ermöglicht Primärenergieeinsparungen von mindestens 10 % im Vergleich zu den Referenzwerten für die getrennte Strom- und Wärmeerzeugung;
- die Erzeugung in KWK-Klein- und -Kleinanlagen, die Primärenergieeinsparungen erbringen, kann als hocheffiziente KWK gelten.

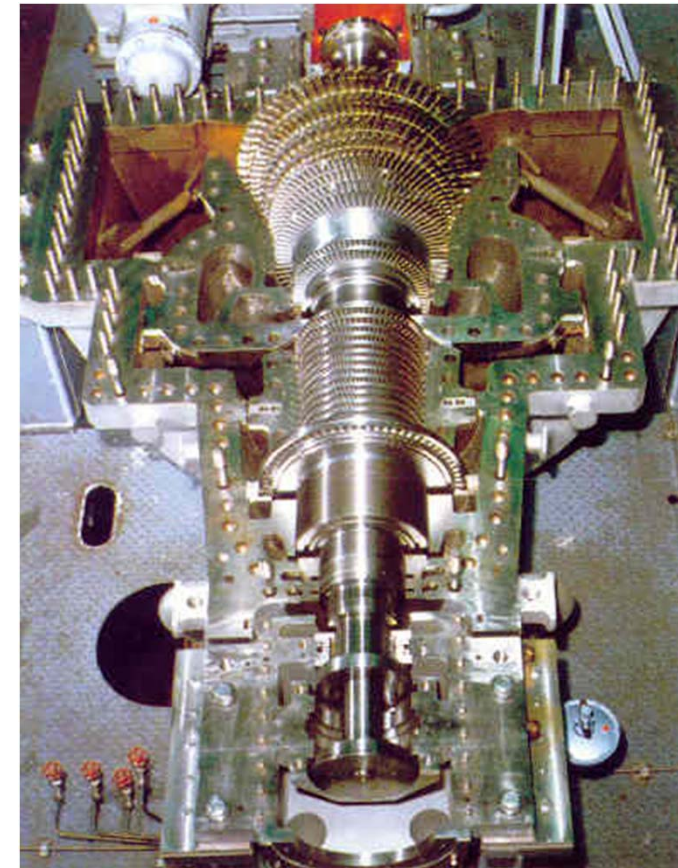
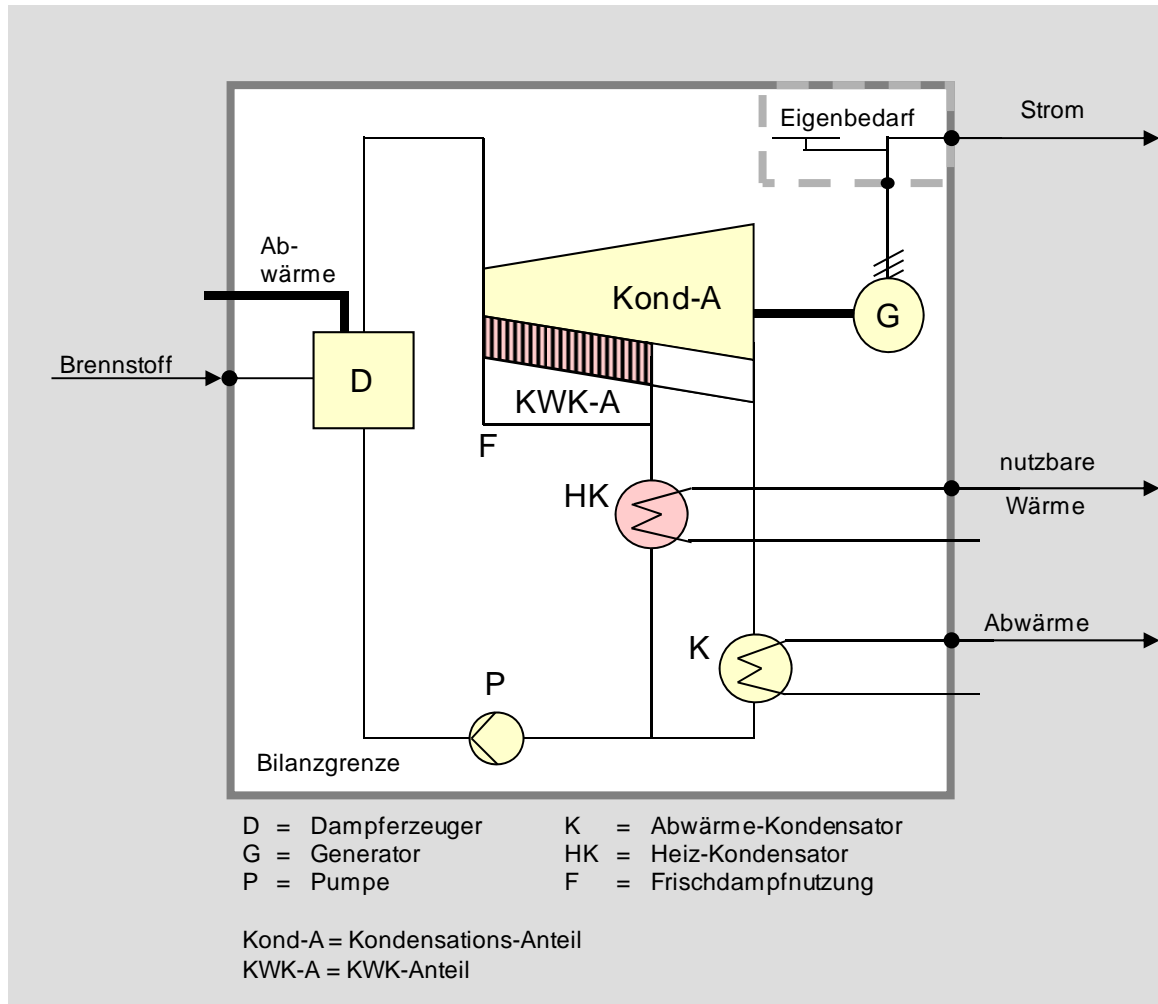
**Bilanzgrenze FW 308/FW 309-1:**



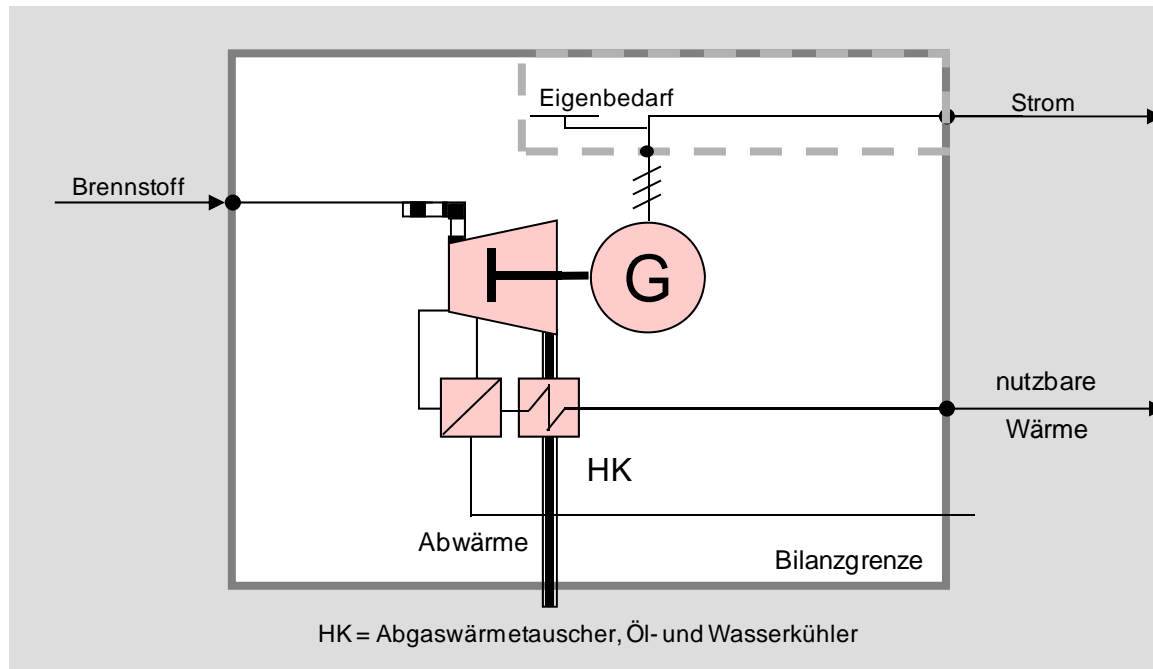
## Einteilung von Erzeugungstechnologien nach FW 308

Ohne ungekoppelte Stromerzeugung	mit ungekoppelter Stromerzeugung	
	ohne Stromverlust	mit Stromverlust
Dampfturbinen-Anlage mit (Entnahme-) Gegendruck-Dampfturbine	<p>Wie links, zusätzlich sind Vorrichtungen zur <b>Abwärmeabfuhr</b> vorhanden:</p> <p>Abwärmekondensator Ölkühler Kühlwasserkühler Verdichtungsluftkühler Bypass in Kamin</p>	Dampfturbinen-Anlage mit Entnahme- oder Anzapf-Kondensations-Dampfturbine
Gasturbinenanlage mit Abhitzekeessel		
GuD-Anlage mit (Entnahme-) Gegendruck-Dampfturbine		GuD-Anlage mit Entnahme- oder Anzapf-Kondensations-Dampfturbine
Verbrennungsmotor		
STIRLING-Motor		
Brennstoffzelle		
Dampfmotor		
ORC-Anlage		

## Anzapf- oder Entnahme-Kondensationsturbinenanlage



## Verbrennungsmotorenanlage



Quelle: [www.schmitt-enerotec.de](http://www.schmitt-enerotec.de)

- AGFW FW 308:**
- ⇒ **KWK-Nutzungsgradpotential** qualifizierter KWK-Prozesse kann im Sinne einer Normierung einheitlich auf 80 % fixiert werden.
  - ⇒ KWK-Anlage, deren Nutzungsgrad die Höhe des Nutzungsgradpotenzials von 80 % erreicht, wird im **KWK-Prozess** betrieben.
  - ⇒ Unterschreitung: **Berechnung des KWK-Stroms** über Kennzahlen (Ausnahme Müll-Dampfturbinen-Prozesse: 60 %).

## Ermittlung der Hocheffizienz

### ➤ Basis

- *Richtlinie 2012/27/EU* des Europäischen Parlaments und des Rates zur Energieeffizienz
- *Entscheidung der Kommission 2011/877/EU* zur Festlegung harmonisierter Wirkungsgrad-Referenzwerte für getrennte Erzeugung von Strom und Wärme

### ➤ Einflussgrößen für die Bewertung

- Harmonisierte Wirkungsgrad-Referenzwerte für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme in Form einer nach relevanten Faktoren wie Baujahr und Brennstofftypen aufgeschlüsselten Matrix von Werten
- Korrekturfaktoren auf der Grundlage der klimatischen Bedingungen für die Stromerzeugung (Abhängigkeit Stromerzeugung von der Umgebungstemperatur)
- Korrekturfaktoren für vermiedene Netzverluste für die Stromerzeugung (begrenzte Nutzung des Netzes aufgrund einer dezentralen Erzeugung)

### ➤ Definition von Sonderregelungen

### ➤ Kriterium

- **Einsparung von mindestens 10 % Primärenergie** der KWK gegenüber vorgegebener getrennter Erzeugung (Anlagen < 1 MW<sub>el</sub>: Einsparung > 0 %)

## Beispiel: BHKW mit Gasmotor

		<b>BHKW</b>
KWK-Bruttostromerzeugung	MWh	41.400
KWK-Wärmelieferung	MWh	47.800
KWK-Brennstoffwärme	MWh	110.000
Ins Netz eingespeister KWK-Strom-Anteil $\alpha_E$	-	0,960
Inbetriebnahmejahr		1994
Spannungsebene	kV	10
Mittlere Umgebungstemperatur	°C	8,8
Harm. Wirkungsgradreferenzwert Wärme	-	0,900
Harm. Wirkungsgradreferenzwert Strom Basis	-	0,514
Temperaturkorrektur	-	0,006
Korrekturfaktor Einspeisung	-	0,944
Harm. Referenz-Wirkungsgrad Strom Endwert	-	0,491
Brennstoffwärme getrennte Erzeugung	MWh	137.394
<b>Brennstoffeinsparung</b>	<b>%</b>	<b>19,9</b>

**BHKW älter als 10 Jahre! Werte für eine 10 Jahre alte Anlage verwenden!**

Die EU-Vorgabe einer **Mindesteinsparung** von mehr als 10 % der Brennstoffenergie in der KWK-Anlage gegenüber der getrennten Erzeugung **wird deutlich überschritten**.

**Damit kann dem BHKW die Hocheffizienz bescheinigt werden.**



## AGFW-Arbeitsblatt FW 309 Teil 6

⇒ CO<sub>2</sub>-Emissionen der Wärmelieferung

⇒ Bestimmung spezifischer CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für Fernwärme

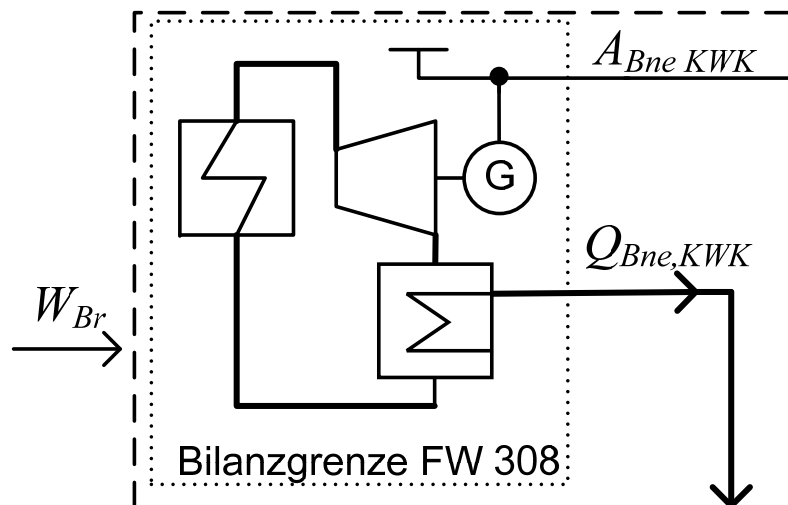
### Grundlagen

- **Problem:** Aufteilung Brennstoff/Emissionen auf die KWK-Produkte Strom und Wärme
  - Das Problem besteht seit erster KWK-Anwendung!
  - Einfache energetische Aufteilung und Vergleichsverfahren führen oft zu physikalisch nicht sinnvollen Ergebnissen bzw. zu häufigen Änderungen der Vergleichsbasis.
  - Physikalisch sinnvoll ist die Bewertung des Potenzials der Wärme.
- **Vorschlag:** Exergetisches Verfahren
  - ⇒ Welches Potenzial an Arbeitsfähigkeit hat Heizwärme?
- **Datenbasis:** Brennstoffe, Stromerzeugung, Wärmelieferung, Heiznetzparameter

⇒ *Arbeitsblatt liegt vor!*

## Zweck der Allokationsmethoden

- ⇒ Zuordnung der Primär- bzw. der Brennstoffenergie zu den Koppelprodukten Strom und Wärme
- ⇒ damit auch *Emissionszuordnung* möglich!



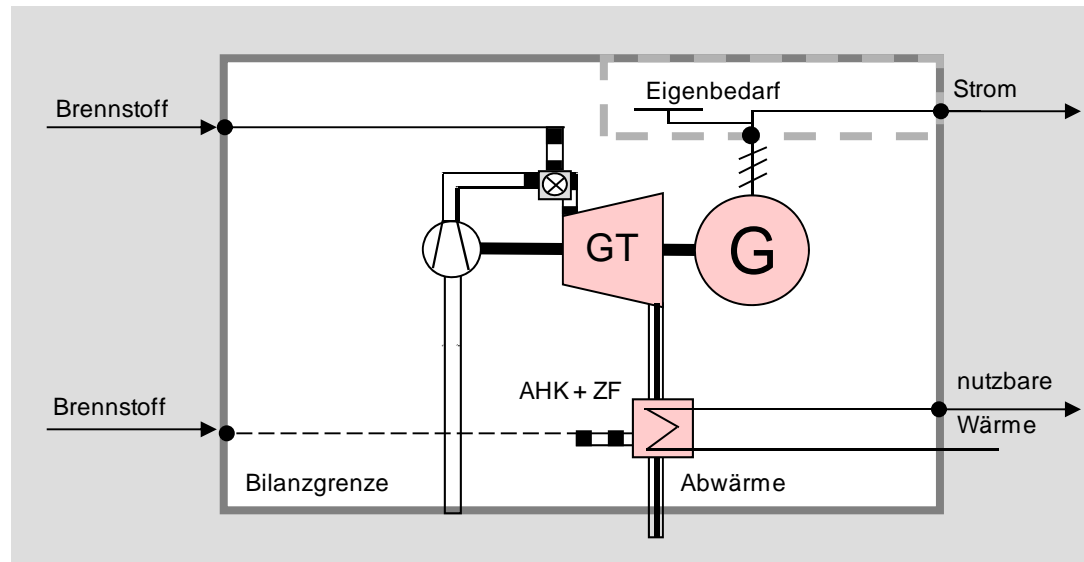
Wie viel Brennstoff steckt in Strom bzw. Wärme?



Nur die Summe ist eindeutig!

## Allokation

Warum ist die Zuordnung schwierig?  
 Beispiel: Gasturbine



100 % Brennstoff erforderlich für reine Stromerzeugung  
 → Kein zusätzlicher Brennstoff für Wärme nötig!

## Zielrichtungen für die Allokation

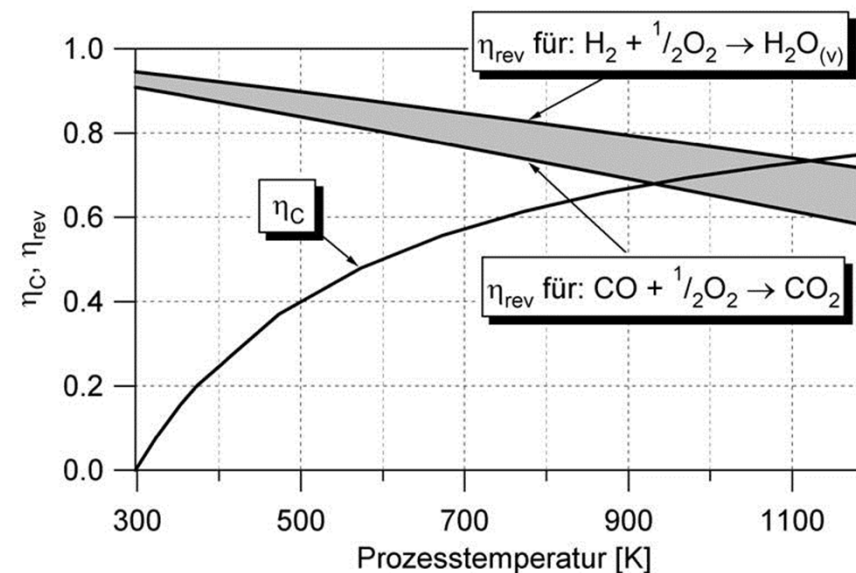
- Anwendung physikalisch korrekter Methoden (Berücksichtigung der Qualität der Wärme)
- Einfache Handhabung
- Anwendbarkeit auf alle Anlagen
- Vermeidung externer Referenzsysteme (Gefahr der willkürlichen Festlegung von Referenzen)

## Maximaler elektrischer Wirkungsgrad:

*Thermischer Prozess:*

- CARNOT-Wirkungsgrad  $\eta_C$
- Abhängigkeit von Temperaturen der Wärmez- und -abfuhr

$$\eta_C = \frac{T_{zu} - T_{ab}}{T_{zu}}$$



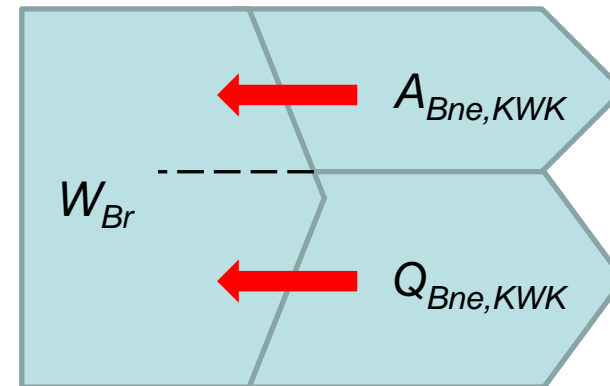
**→ Kein höherer Wirkungsgrad möglich!**

**Allokationsmethoden: Energetische Allokation** (Kalorische Meth.)

⇒ Aufteilung nach Energiegehalt der Produkte:

$$W_{Br,Strom} = \frac{A_{Bne,KWK}}{A_{Bne,KWK} + Q_{Bne,KWK}} \cdot W_{Br}$$

$$W_{Br,Wärme} = \frac{Q_{Bne,KWK}}{A_{Bne,KWK} + Q_{Bne,KWK}} \cdot W_{Br}$$

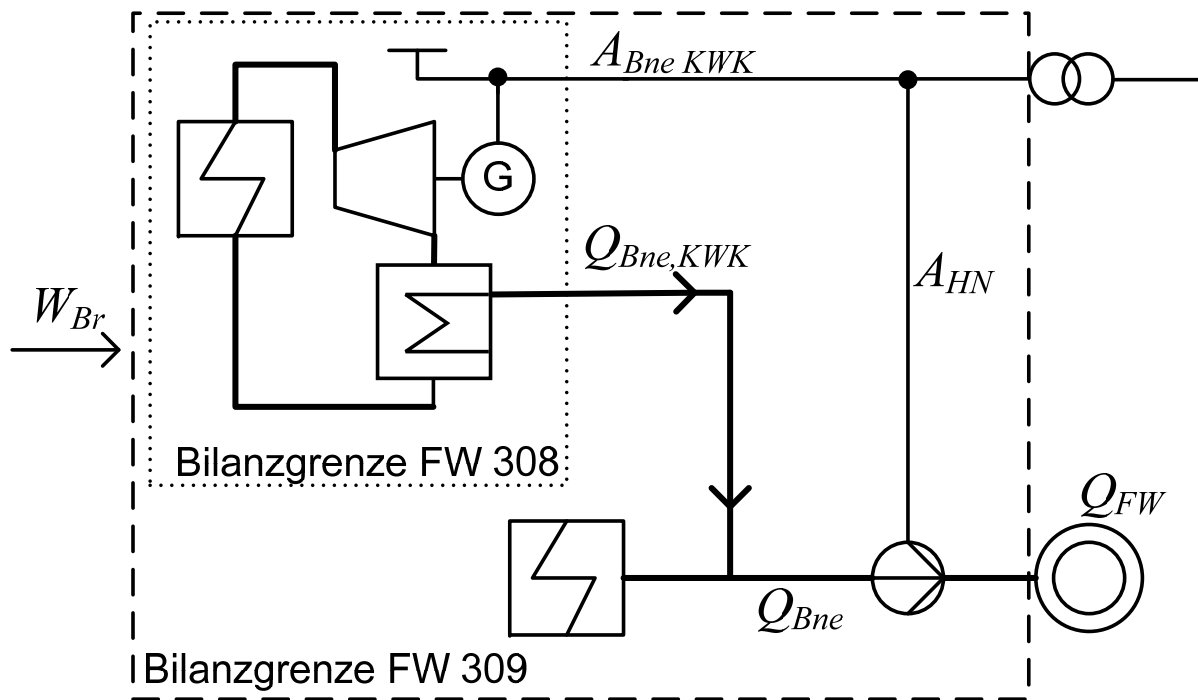


$$\eta_{el} = \frac{A_{Bne}}{W_{Br,Strom}} > \eta_c = \frac{T_{zu} - T_{ab}}{T_{zu}}$$

*Es ist physikalisch nicht möglich, den Strom mit dem zugeteilten Brennstoff zu erzeugen!*

nicht anwendbar!

Allokationsmethoden: Stromgutschriftmethode



Verdrängung  
von Strom aus  
anderen Quellen



Stromgutschrift

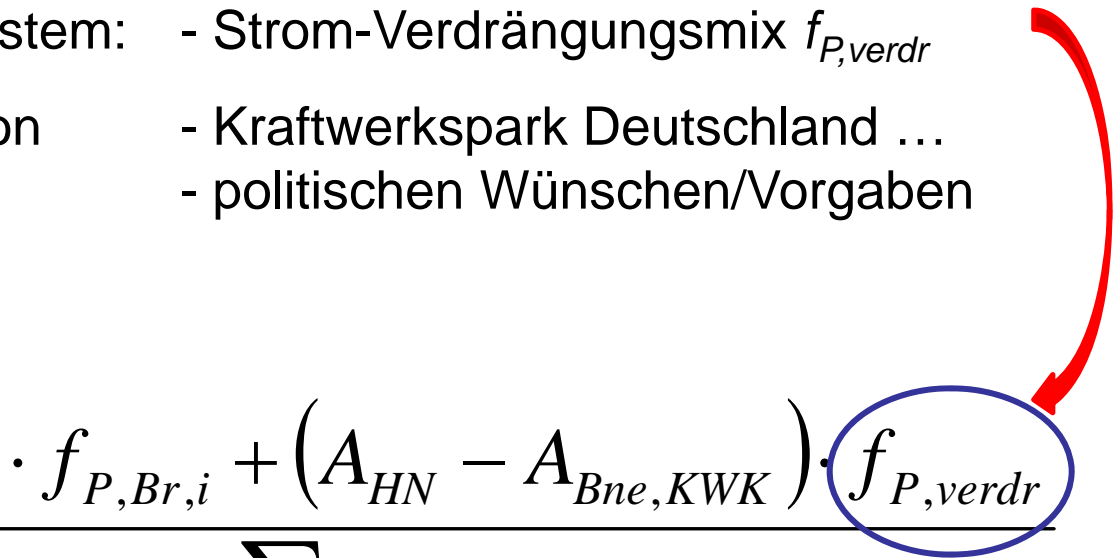


$$f_{P,FW} = \frac{\sum_i W_{Br,i} \cdot f_{P,Br,i} + (A_{HN} - A_{Bne,KWK}) \cdot f_{P,verdr}}{\sum_j Q_{FW,j}}$$

## Allokationsmethoden: Stromgutschriftmethode

**Problem:** Referenzsystem notwendig

Externes Referenzsystem: - Strom-Verdrängungsmix  $f_{P,verdr}$   
 ⇒ abhängig von - Kraftwerkspark Deutschland ...  
 - politischen Wünschen/Vorgaben

$$f_{P,FW} = \frac{\sum_i W_{Br,i} \cdot f_{P,Br,i} + (A_{HN} - A_{Bne,KWK}) \cdot f_{P,verdr}}{\sum_j Q_{FW,j}}$$




## Allokationsmethoden: Finnische Methode

**Basis:** Berechnung der **Primärenergieeinsparung** (PEE) nach EU-KWK-Richtlinie

$$PEE = \left( 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{KWK-Wärme}}{\eta_{Ref-Wärme}} + \frac{\eta_{KWK-Strom}}{\eta_{Ref-Strom}}} \right) \cdot 100 \%$$

**Problem:** Referenzsysteme notwendig für Strom und Wärme (nach Brennstoffen unterschiedlich)

## Allokationsmethoden: Stromverlustbasierte Methoden

- *Realer Stromverlust* (Arbeitswertverfahren)
  - *Theoretischer Stromverlust* (Carnot-Methode)
  - Äquivalenter Stromverlust (Dresdner Methode)
  - Vereinfachter Stromverlust (DIN 4701 Teil 10)
- } AGFW  
FW 309-6

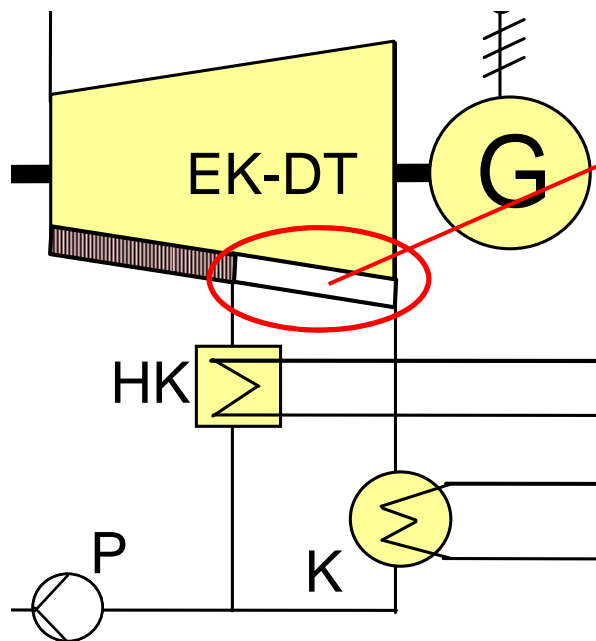
### Vorteile:

- ⇒ Physikalisch korrekte Allokation
- ⇒ Auf konkrete Anlage bezogen
- ⇒ Kein externes Referenzsystem erforderlich
- ⇒ Von Methode abhängige Referenzwerte

## Allokationsmethoden: Realer Stromverlust - Arbeitswertmethode

HKW mit Entnahme- bzw. Anzapf-Kondensations-Turbinen:

- Auskopplung der Wärme führt zu Stromverlust
- Konkretes Maß für die Brennstoffzuordnung



$$\Delta A_B = \beta_a \cdot Q_{Bne, KWK}$$

$$\Delta A_B = W \cdot \zeta_{Bne-Kond} - A_{Bne}$$

$$W_{Q-KWK} = \frac{\Delta A_B}{A_{Bne} + \Delta A_B} \cdot W_{Br}$$

$$W_A = \frac{A_{Bne}}{A_{Bne} + \Delta A_B} \cdot W_{Br}$$

## Allokationsmethoden: Theoretischer Stromverlust – Carnotmethode (Exergetische Bewertung)

⇒ Qualität der Energieströme (Arbeitsfähigkeit) wird berücksichtigt

- Temperaturen der Wärmeeinspeisung →  $T_m$
  - Umgebungstemperatur →  $T_U$
- } Carnot-Wirkungsgrad  $\eta_C$   
( $\beta_{C-Q-KWK}$ )

- Für Anlagen ohne Stromverlust (bzw. wenn nicht ermittelbar)
- Theoretischer Wert → prozessferner als Stromverlust
- Erfassung aller Temperaturbereiche möglich (Niedertemperatur)

## Allokationsmethoden: Theoretischer Stromverlust – Carnotmethode

$$\Delta A_{B-R} = Q_{WE-KWK} \cdot \beta_{C-Q-KWK} \quad \text{mit} \quad \beta_{C-Q-KWK} = 1 - T_U / T_m$$

- **Heizwassernetze:**  $T_m = \frac{T_{V-KWK} - T_{R-KWK}}{\ln(T_{V-KWK} / T_{R-KWK})} \approx \frac{T_{V-KWK} + T_{R-KWK}}{2}$

- **Dampfnetze:**  $T_m = T_S$

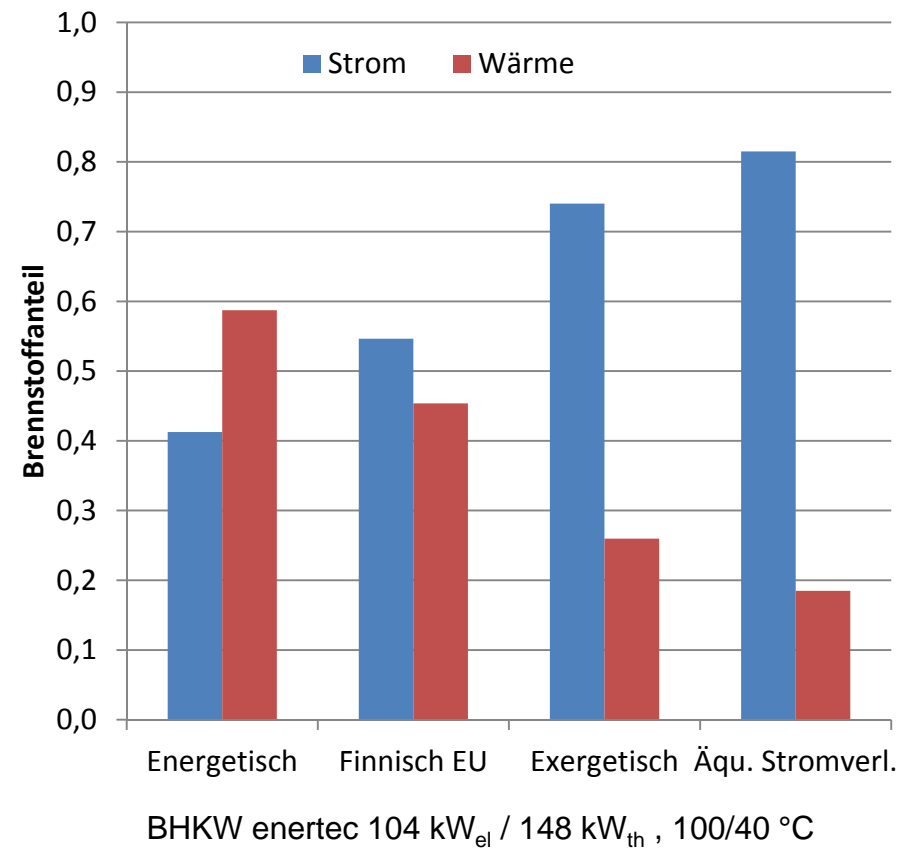
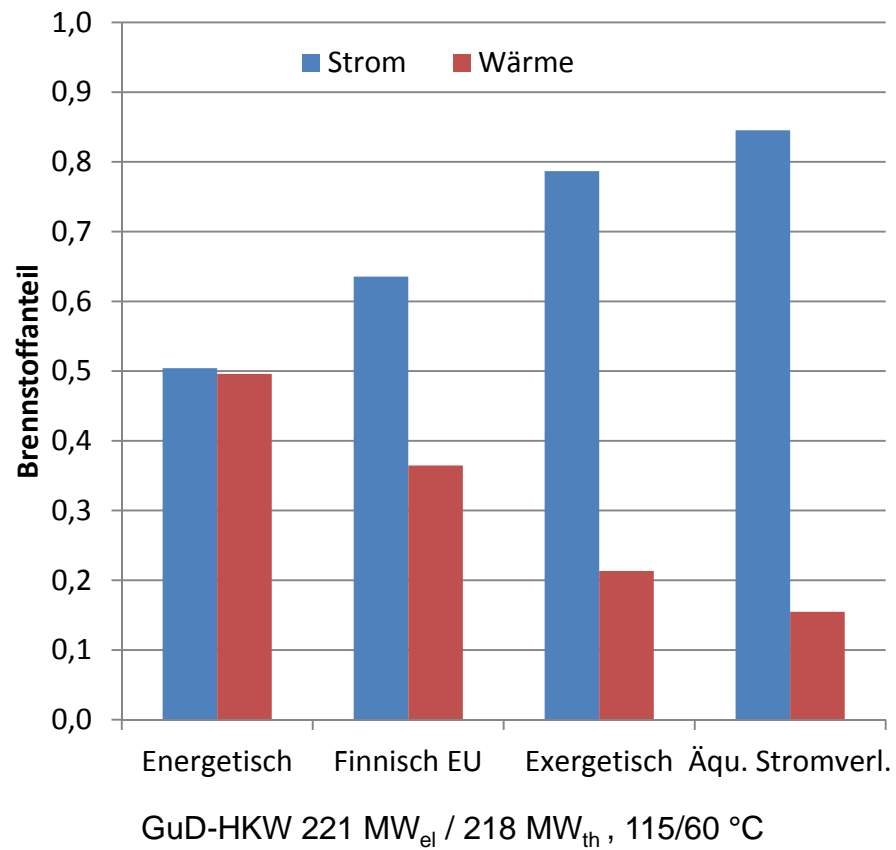
$$W_A = \frac{A_{Bne}}{A_{Bne} + \Delta A_{B-R}} \cdot W \quad W_{Q-KWK} = \frac{\Delta A_{B-R}}{A_{Bne} + \Delta A_{B-R}} \cdot W$$

### Gleitende Vorlauftemperatur:

- Wärmemengenbezogene Wichtung von Mittel- und Umgebungstemperatur
- Mittelwertbildung für maximal 1 Monat

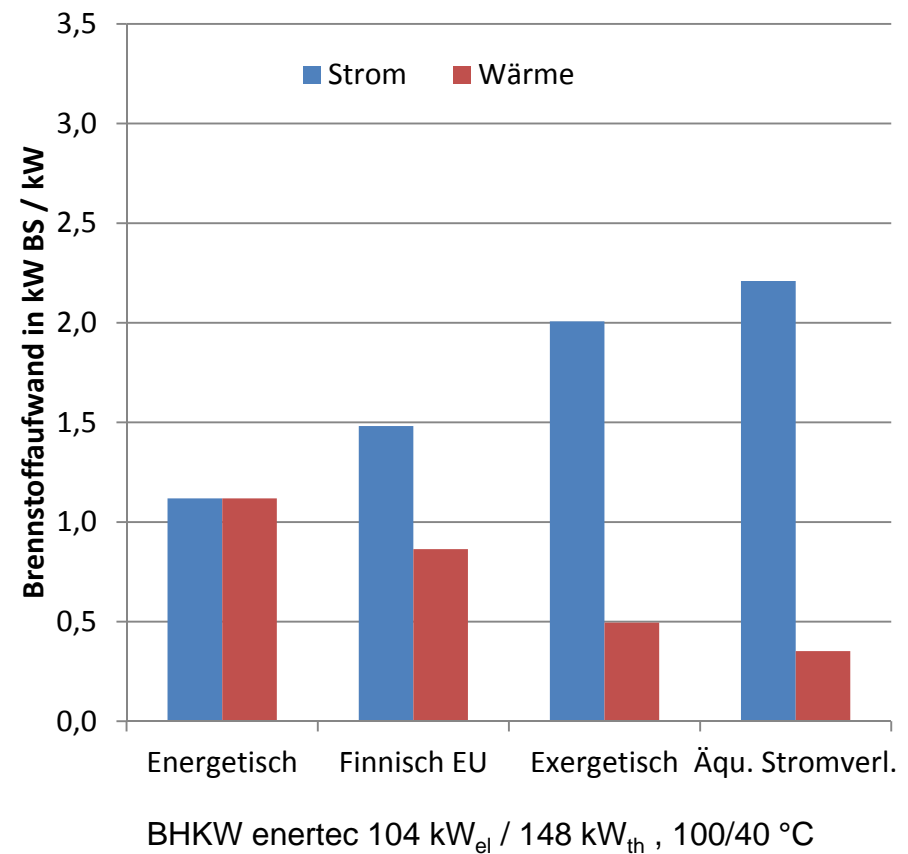
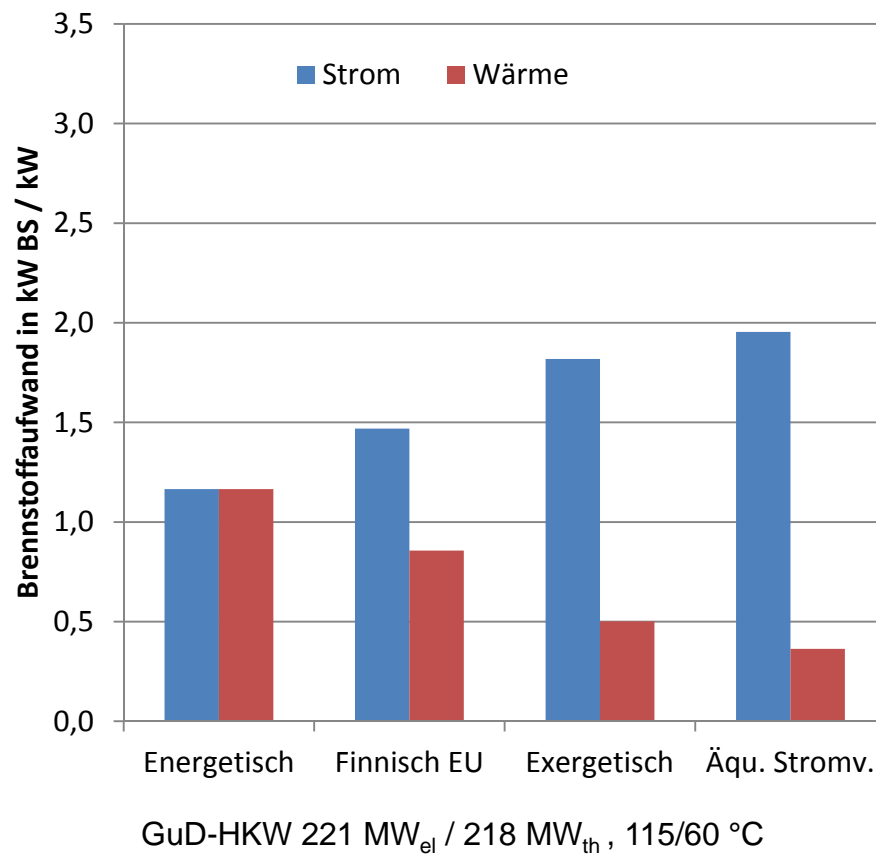
## Ergebnisse der Allokationsmethoden

### Brennstoffanteile für Strom und Wärme



## Ergebnisse der Allokationsmethoden

Spezifischer Brennstoffaufwand für Strom und Wärme in  $\text{kW}_{\text{BS}}/\text{kW}$



## Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt:

Dr.-Ing. Thomas Sander

Technische Universität Dresden  
Institut für Energietechnik  
Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung  
01062 Dresden

Tel.: +49 – 351 – 463 33097

Fax: +49 – 351 – 463 37076

[thomas.sander@tu-dresden.de](mailto:thomas.sander@tu-dresden.de)