

Dynamische exergetische Bewertungsverfahren

Dr.-Ing. Joachim Seifert

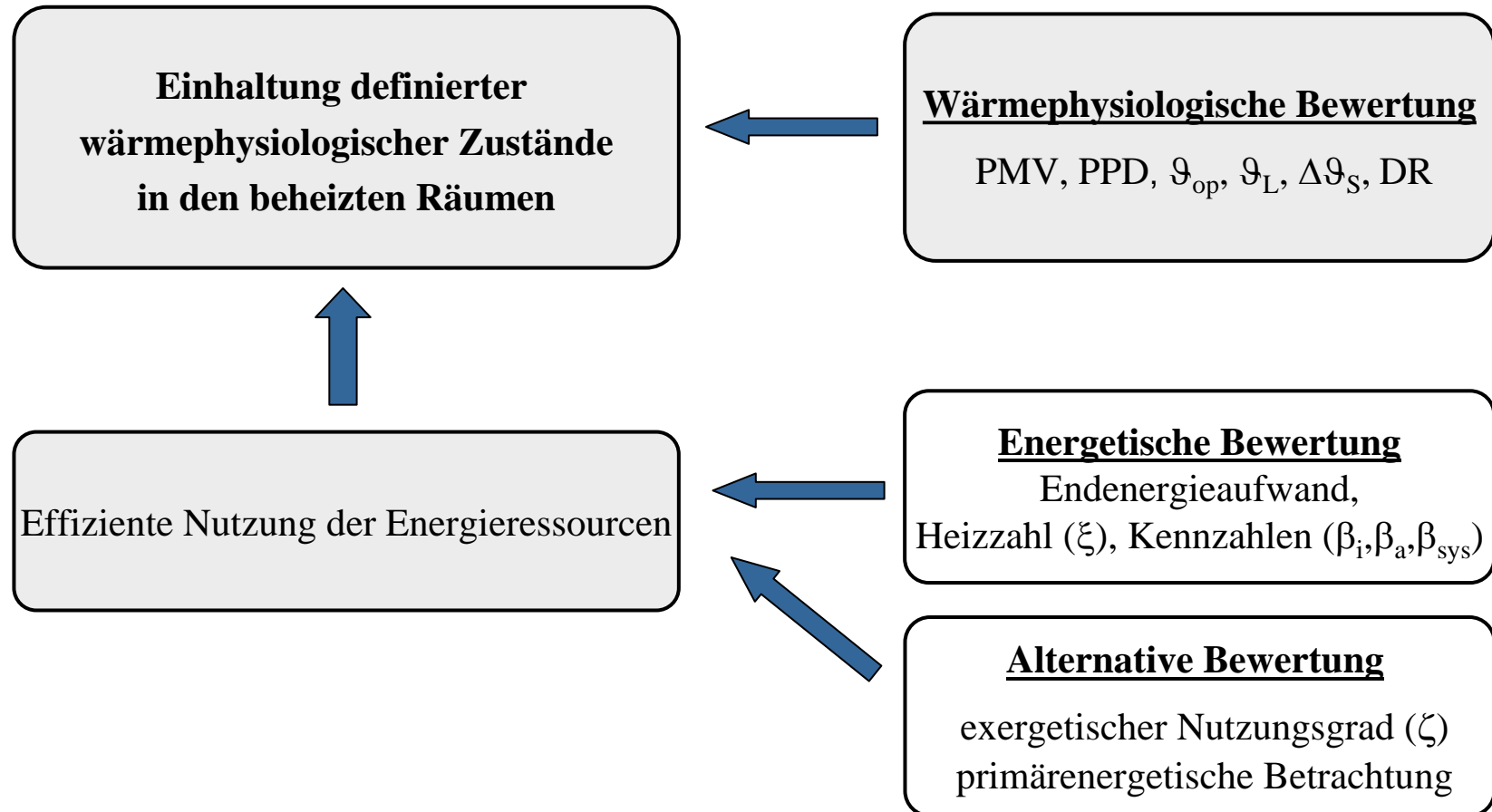
Professur für Heiz- und Raumluftechnik, TU Dresden

Dipl.-Ing. Alexander Hoh

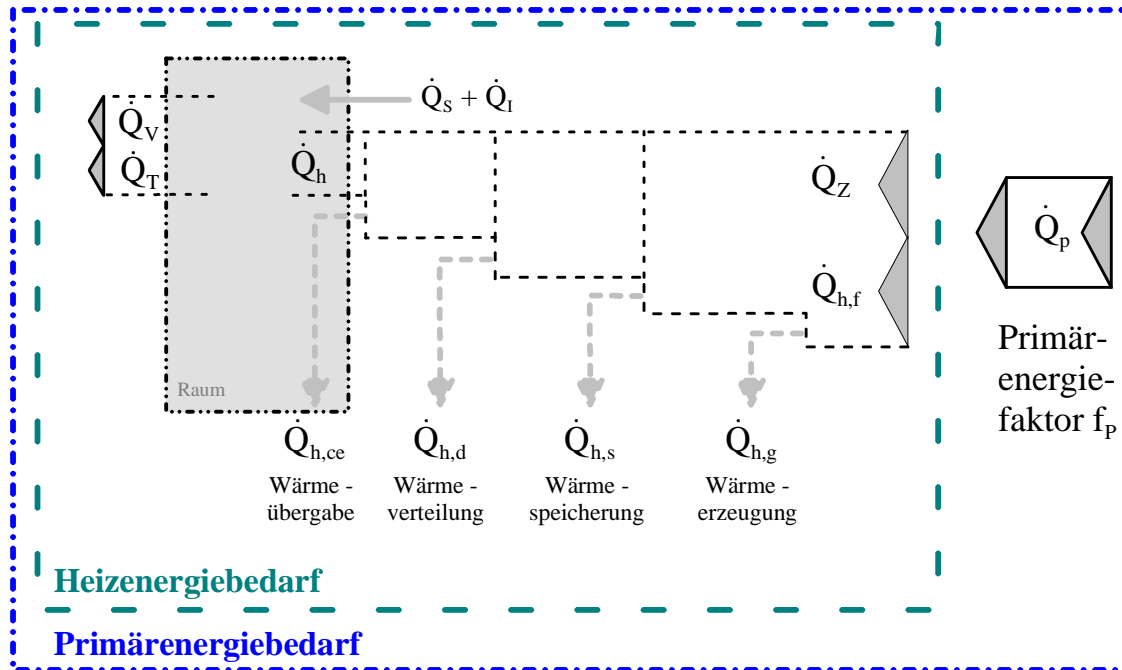
EBC | Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimotechnik

Zielgrößen

Bewertungskriterien



detaillierte Bewertung für jedes Glied der Prozesskette



Heizzahl:

$$\xi = \frac{\int \dot{Q}'_h dt}{\int \dot{m}_B \cdot H_U dt}$$



Integrale Größen
(z.B. Heizzahl)

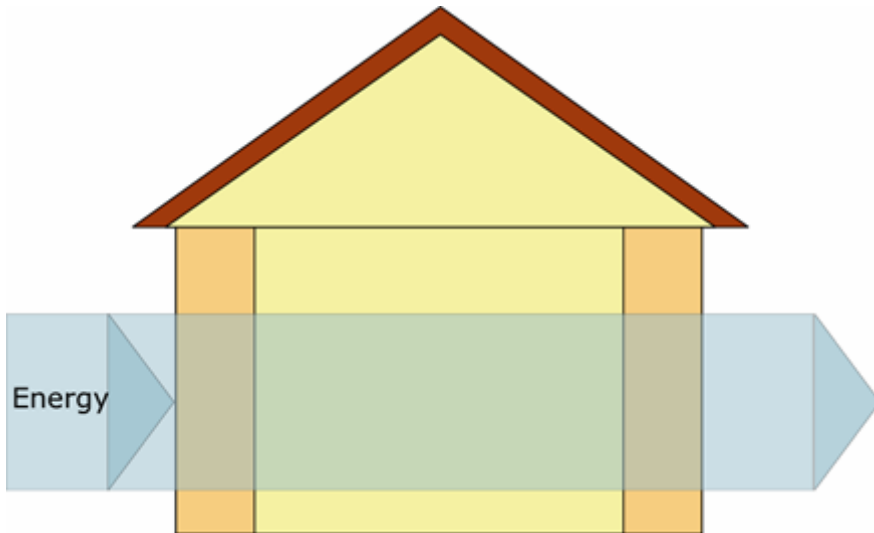
$$\xi = \eta_{h,g} \cdot \eta_{h,s} \cdot \eta_{h,d}$$

(kon. Wärmeerzeuger)

$$\xi = \beta_{WP} \cdot \eta_{h,s} \cdot \eta_{h,d} \cdot \eta_{v,el} \cdot \bar{\eta}_{KW}$$

(Wärmepumpe)

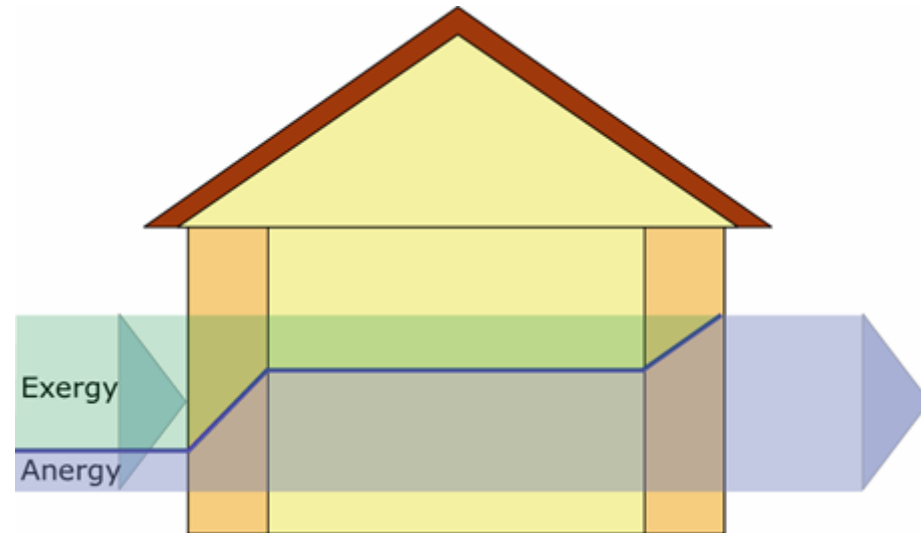
„Energieverbrauch“ im Gebäude



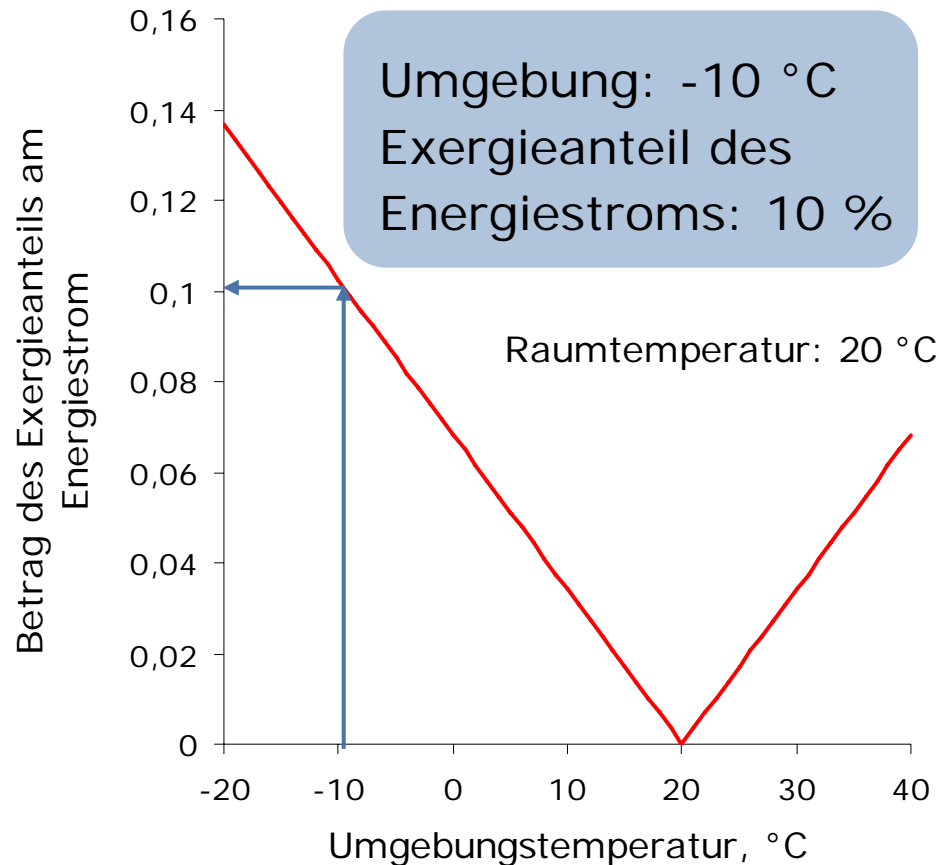
**Ausschließlich Beschränkung
des Energieflusses!**

*Heute:
Primärenergiebewertung
auf Basis fester Kennzahlen*

Exergieverbrauch in Gebäude



**Beschränkung des Gesamtaufwands:
Produktions-, Transport- und
Umwandlungsprozesses**



- Die Größe des Exergieflusses hängt von der Umgebungstemperatur ab
- Die Größe des Exergieflusses steigt mit der Höhe der Temperaturdifferenz
- Selbst unter extremen Umgebungsbedingungen beträgt der Exergieanteil des Energiestroms weniger als 15 %

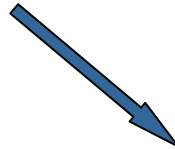
- Für die Dauer der Heizperiode gilt:

$$\bar{\eta}_c = \frac{E_{\text{Bedarf}}}{Q_{\text{Bedarf}}} = \frac{T_{\text{Raum,mittel}} - T_{\text{Umgebung,mittel}}}{T_{\text{Raum,mittel}}}$$

- Dieser mittlere Carnot-Faktor der Heizaufgabe hängt nur von den klimatischen Bedingungen und vom gewünschten Heizkomfort (Raumtemperatur, Heizgrenztemperatur) ab

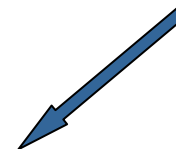
Exergetischer Nutzungsgrad

$$\zeta = \frac{E'_h}{m_B \cdot e_B}$$



Heizzahl

$$\xi = \frac{Q'_h}{m_B \cdot H_u}$$



$$\zeta = \xi \cdot \bar{\eta}_c \cdot \frac{H_u}{e_B}$$

**Direkte Umrechnung energetischer Kriterien in einen
*exergetischen Gesamtbewertungsmaßstab***

- Statisches Verfahren:

$$E = \bar{\eta}_C \cdot Q_{\text{Bedarf}}$$

- Dynamisches Verfahren:

$$E = \int \dot{Q} \left(\frac{T_{\text{Raum}} - T_{\text{Umgebung}}}{T_{\text{Raum}}} \right) dt$$

- Abschätzung des Exergiebedarfs unter Berücksichtigung klimatischer Randbedingungen

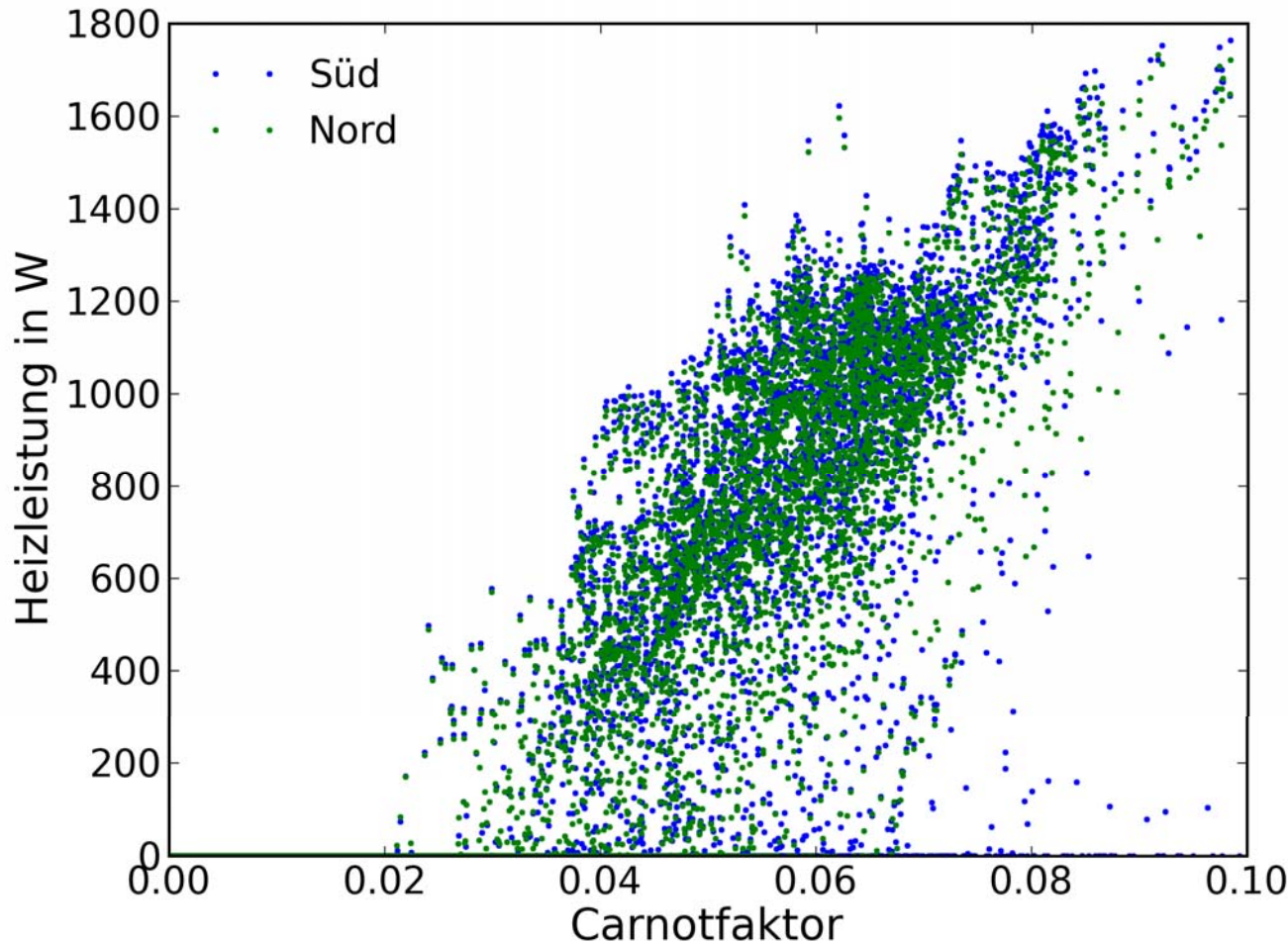
$$E = \bar{\eta}_c \cdot Q$$

- Eindeutiger Zusammenhang zwischen Carnot-Faktor und Heizleistung entscheidend für die Genauigkeit des Verfahrens
- Varianz interner und solarer Lasten sowie der Raumlufttemperatur führt zu Abweichungen gegenüber integralem Verfahren

Carnot-Faktor vs. Heizleistung



E.ON Energy Research Center



Ideales Heizsystem,
keine inneren Lasten,
konst.
Raumlufttemperatur und
Luftwechsel

Abweichung
Exergiebedarf:

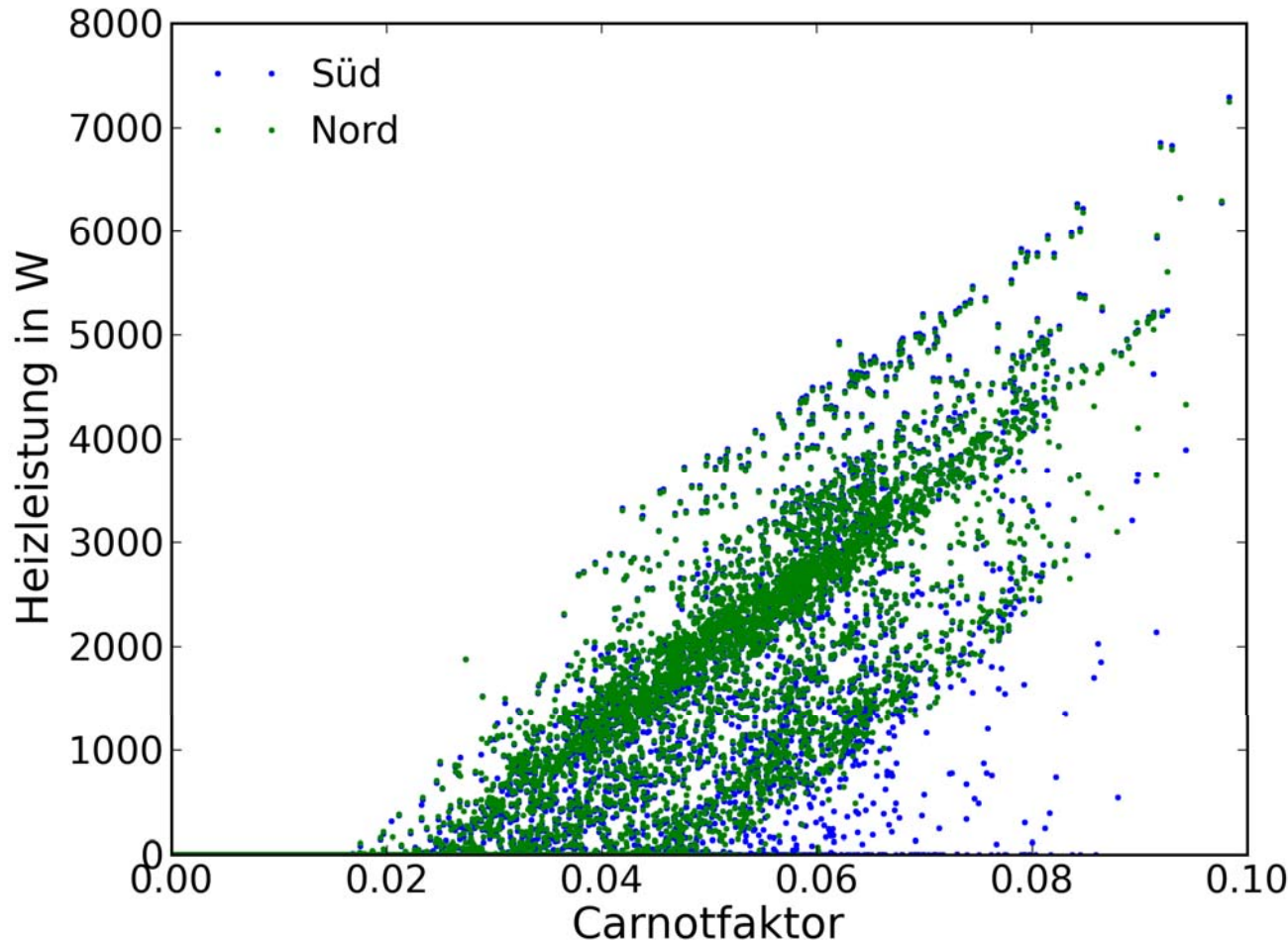
-16,0 % (Nord)

-16,2 % (Süd)

Carnot-Faktor vs. Heizleistung



E.ON Energy Research Center



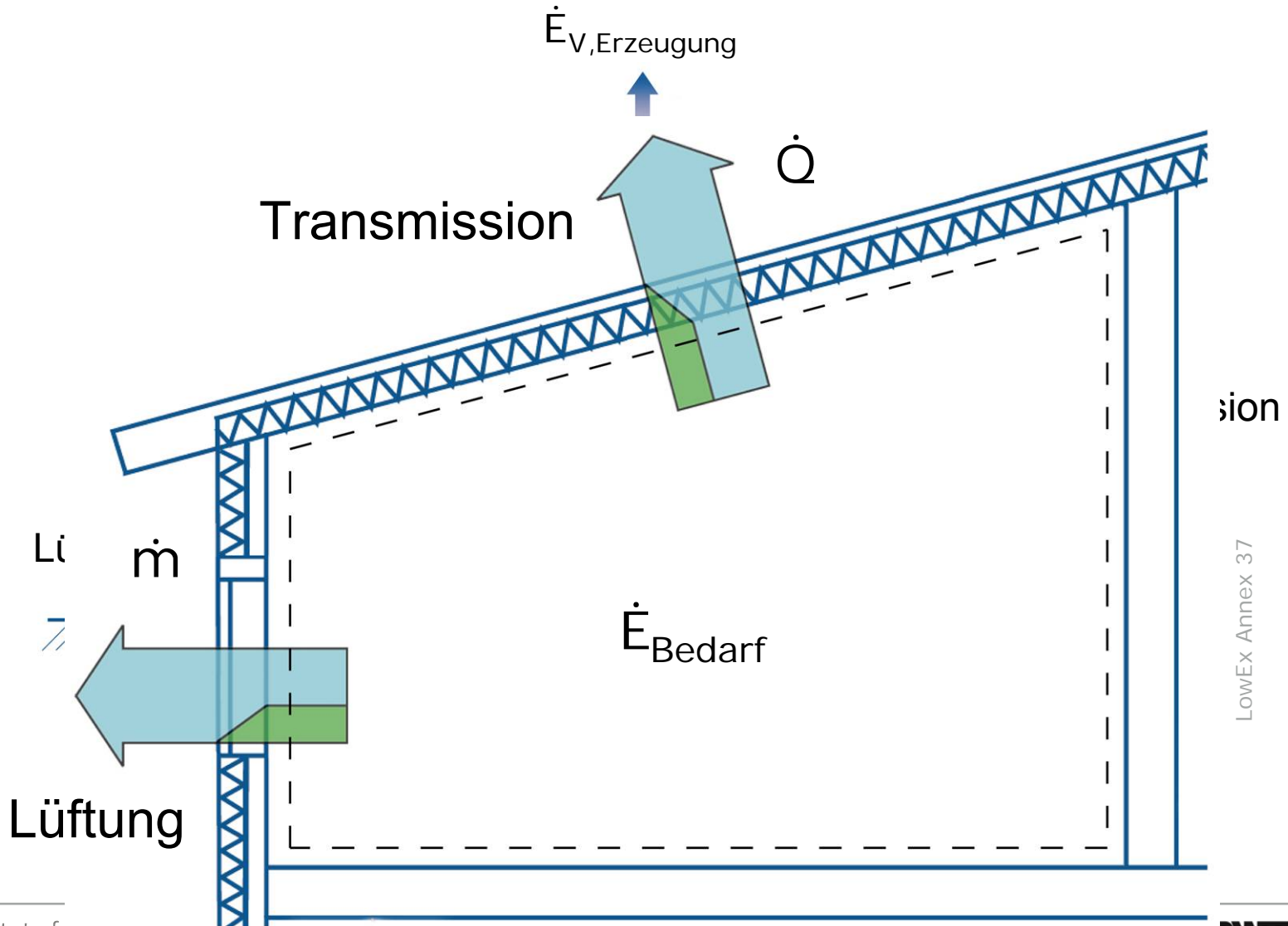
Ideales Heizsystem,
Typ. Büroprofil der
inneren Lasten,
Raumlufthtemperatur und
Luftwechsel

Abweichung
Exergiebedarf:

-13,1 % (Nord)

-13,1 % (Süd)

Exergiebilanz für die dynamische Berechnung



statistisches Einfamilienhaus ($A_N=160m^2$)

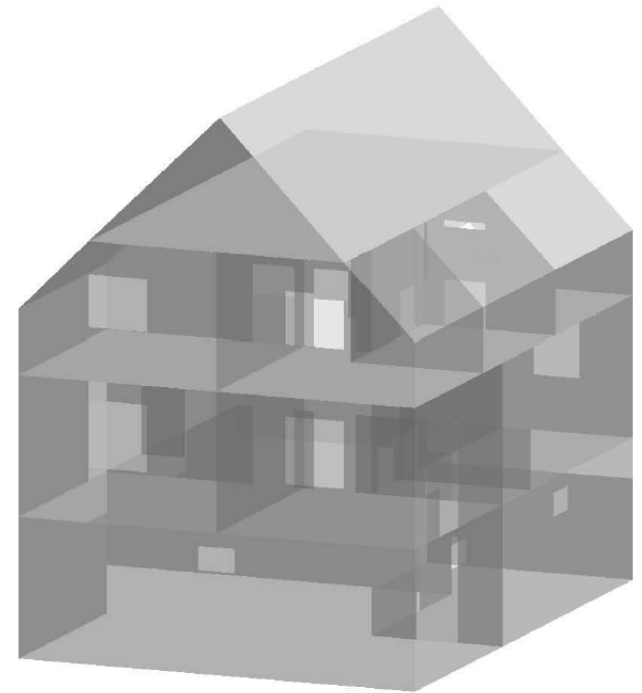
Gebäude: EnEV04 (5,8 kW)

Heizsystem: freie Heizflächen
BW-Gerät

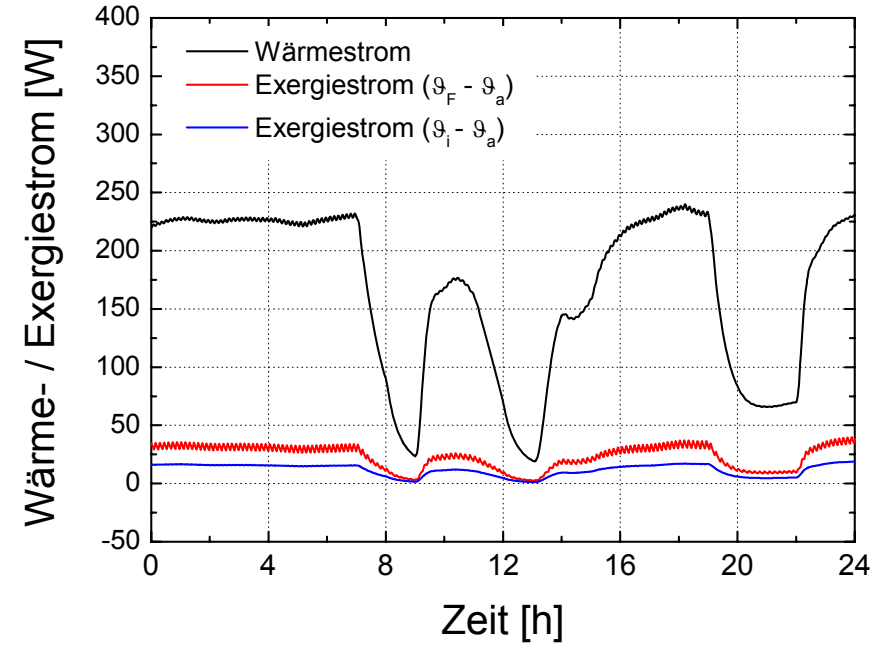
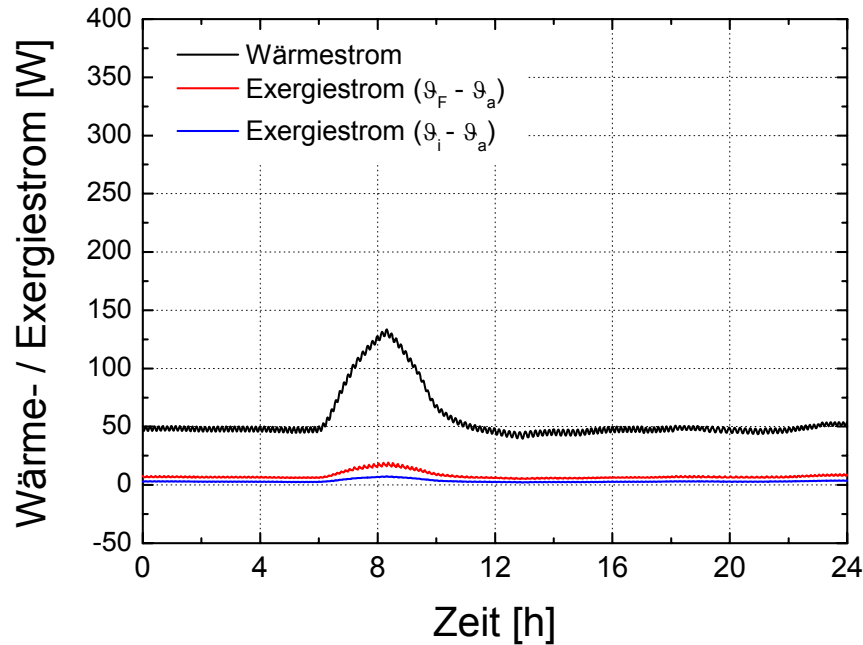
Anlagentemperaturniveau $J_V/J_R/J_i = 70/55/20^\circ C$
 $J_V/J_R/J_i = 55/45/20^\circ C$

Innere Randbedingungen: zeitabhängige Gewinne
zeitabhängiger Luftwechsel

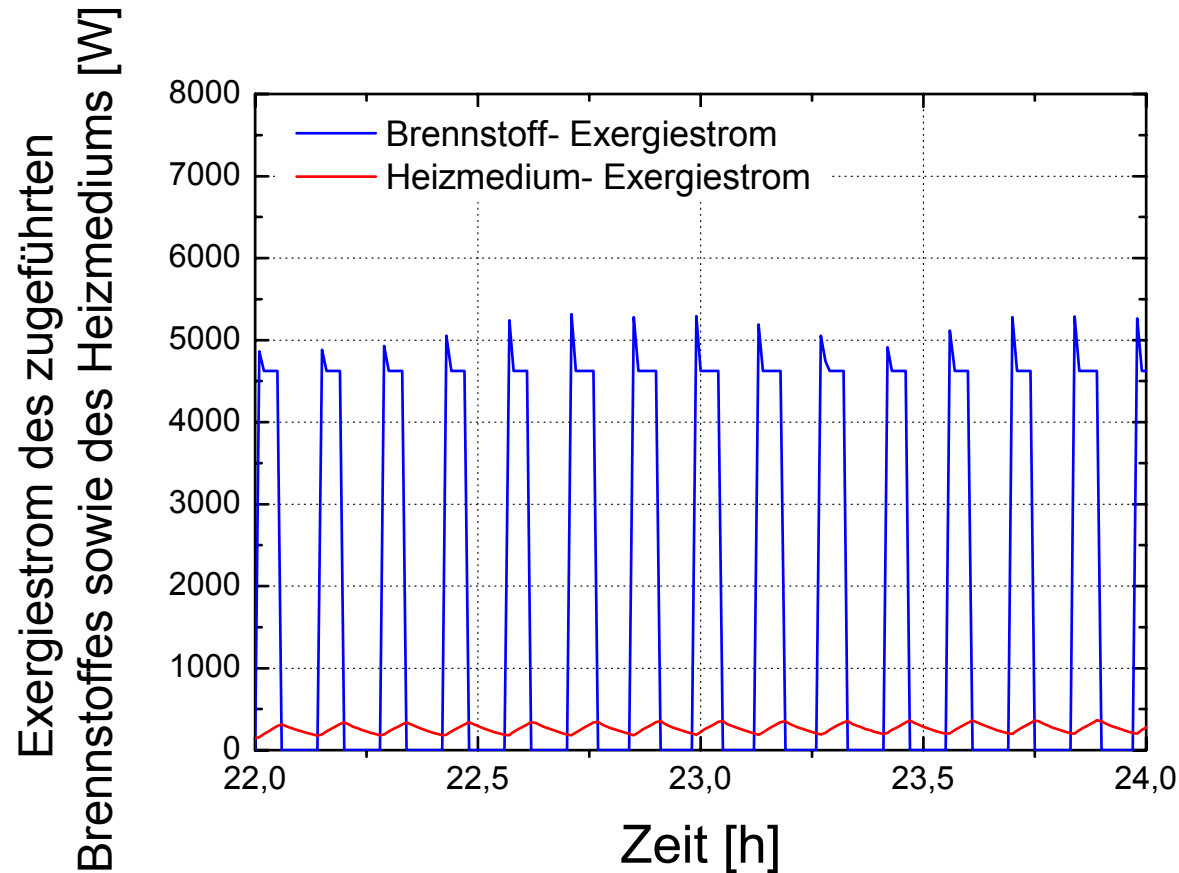
Äußere Randbedingungen: Wetter TRY-04
(Potsdam)



Schematische Darstellung des statistischen Einfamilienhauses



Wärme- und Exergieströme in einem repräsentativen Einfamilienhaus
(linke Seite: Wohnraum / rechte Seite: Bad)



Exergiestrom des zugeführten Brennstoffes sowie des Heizmediums für ein repräsentatives Einfamilienhaus (BW-Gerät / 30% Modulationsgrenze)

$$\dot{E} = \dot{E}_{\text{Bedarf}} + \dot{E}_{V,\text{Verteilung}} + \dot{E}_{V,\text{Übergabe}} + \dot{E}_{V,\text{Erzeugung}}$$

$$\dot{E}_{V,\text{Verteilung}} = \dot{Q} \cdot \eta_c + w_t$$

$$\dot{E}_{V,\text{Übergabe}} = \dot{E}_{\text{Übergabe}} - \dot{E}_{\text{Bedarf}}$$

$$\dot{E}_{V,\text{Erzeugung}} = \dot{E}_{\text{Brennstoff}} - \dot{E}_{\text{Bedarf}} - \dot{E}_{V,\text{Übergabe}} - \dot{E}_{V,\text{Verteilung}} + w_t$$

$$\dot{E} = \dot{E}_{\text{Bedarf}} + \underbrace{\dot{E}_{V,\text{Verteilung}} + \dot{E}_{V,\text{Übergabe}}}_{\text{Wärmetransfer}} + \dot{E}_{V,\text{Erzeugung}}$$

Gebäude

Wärmetransfer

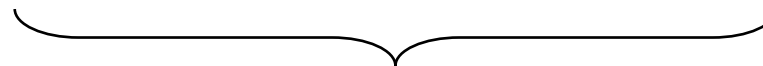
Erzeugung



$$\dot{E}_{\text{Bedarf}}$$

$$\frac{\dot{E}_{V,\text{Verteilung}} + \dot{E}_{V,\text{Übergabe}}}{\dot{E}_{\text{Bedarf}}}$$

$$\frac{\dot{E}_{V,\text{Erzeugung}}}{\dot{E}_{\text{Bedarf}}}$$



κ_T



κ_E

exergetische Aufwandszahlen

$$\dot{E} = \dot{E}_{\text{Bedarf}} \cdot (1 + \kappa_T + \kappa_E)$$

↑ ↑ ↑

Gebäude Wärmetransfer Erzeugung

\dot{E}_{Bedarf} - Kennzahl für das Gebäude

$(1 + \kappa_T + \kappa_E)$ - Kennzahl für das Versorgungssystem

- Randbedingungen:
 - Raum 16 m² (Südaußenwand, Fenster 3 m², Innenwände adiabat)
 - Monate Januar-März, Testreferenzjahr Potsdam
 - Wärmeversorgung mit Standard-Heizkörper Typ 22
 - Einfaches Heizsystem: Pumpe und Wärmeerzeuger (Gas-Brennwert-Kessel)
 - Regelung der Vorlauftemperatur und der Pumpenleistung
 - Einsatz eines Thermostatventils am Heizkörper
- Exergiebedarf des Raumes folgt aus idealer Betrachtung:
 - Berechnung der Exergieströme durch die Außenwand (Transmission und Lüftung) bei konstanter Raumlufttemperatur von 21 °C

- Exergiebedarf des Raumes

94,8 kWh / 90 Tage

entsprechen durchschnittlich 44 W oder 2,75 W/m²

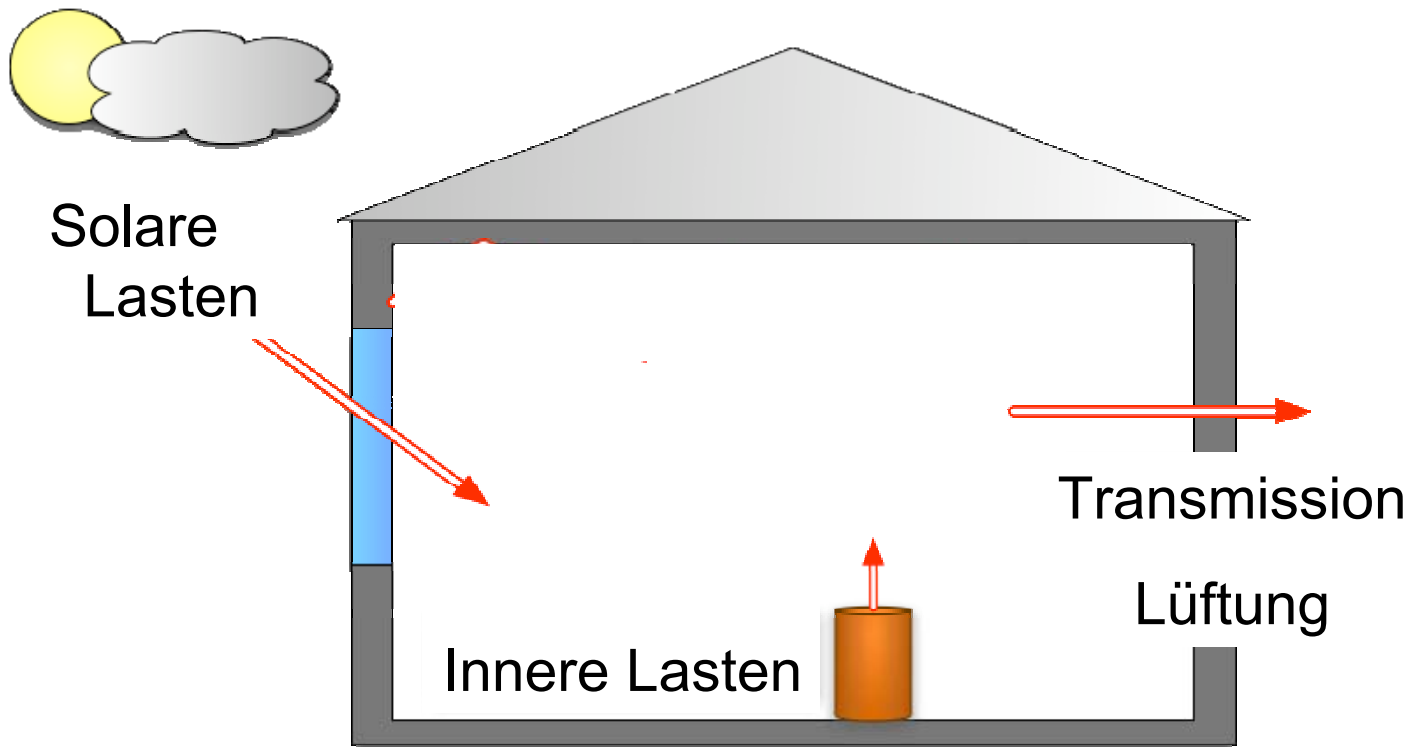
- Exergetische Aufwandszahl der Wärmeerzeugung

$$K_E = \frac{E_{\text{Erzeugung}}}{E_{\text{Bedarf}}} = \frac{1011,5 \text{ kWh}}{94,8 \text{ kWh}} = 10,67$$

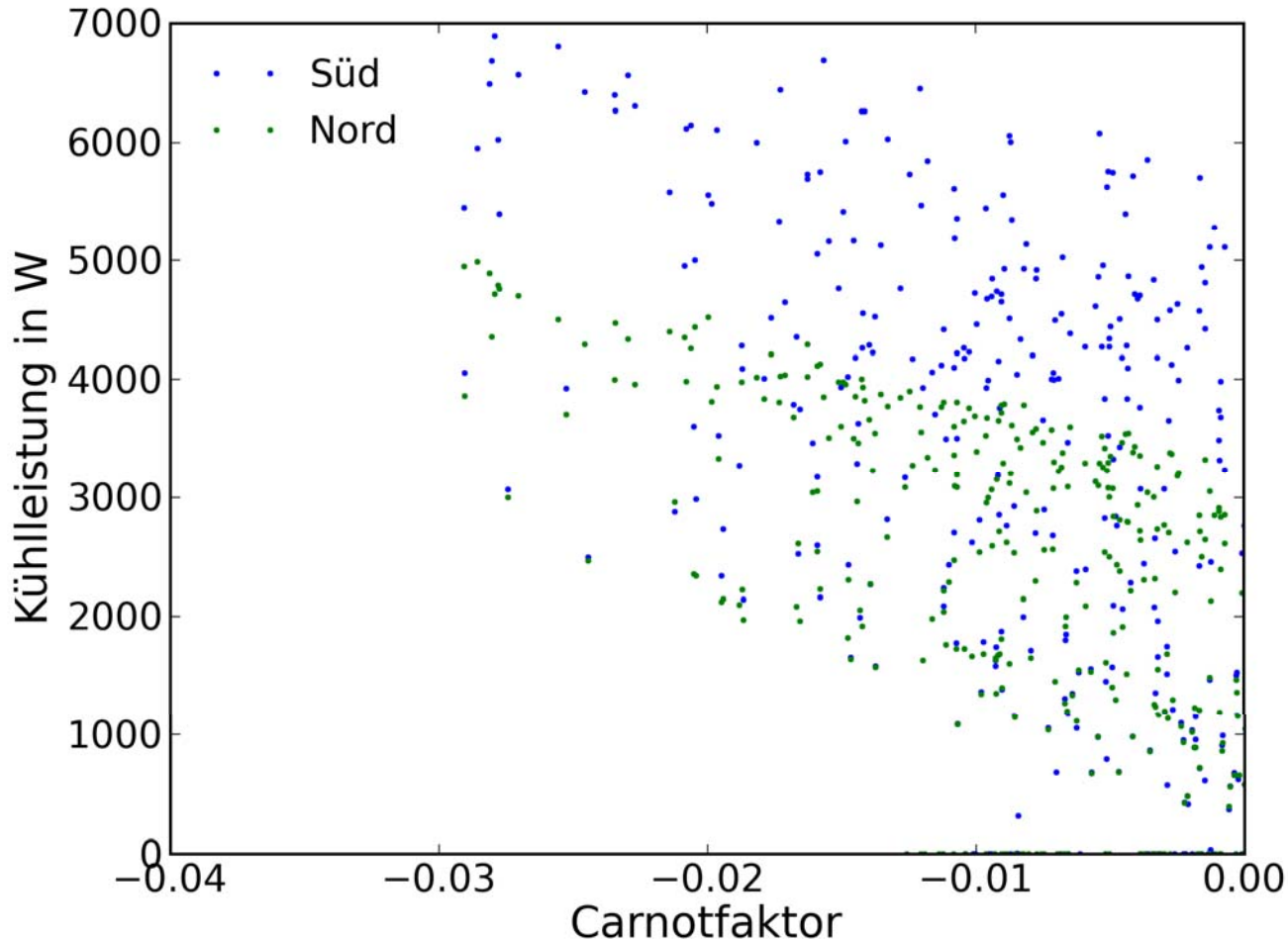
- Exergetische Aufwandszahl der für den Wärmetransfer

$$K_E = \frac{E_{\text{Verteilung}} + E_{\text{Übergabe}}}{E_{\text{Bedarf}}} = \frac{19,2 \text{ kWh} + 106,6 \text{ kWh}}{94,8 \text{ kWh}} = 1,33$$

- Stärkerer Einfluss innerer und solarer Wärmelasten
- Carnot-Faktor und Kühllast weniger voneinander abhängig

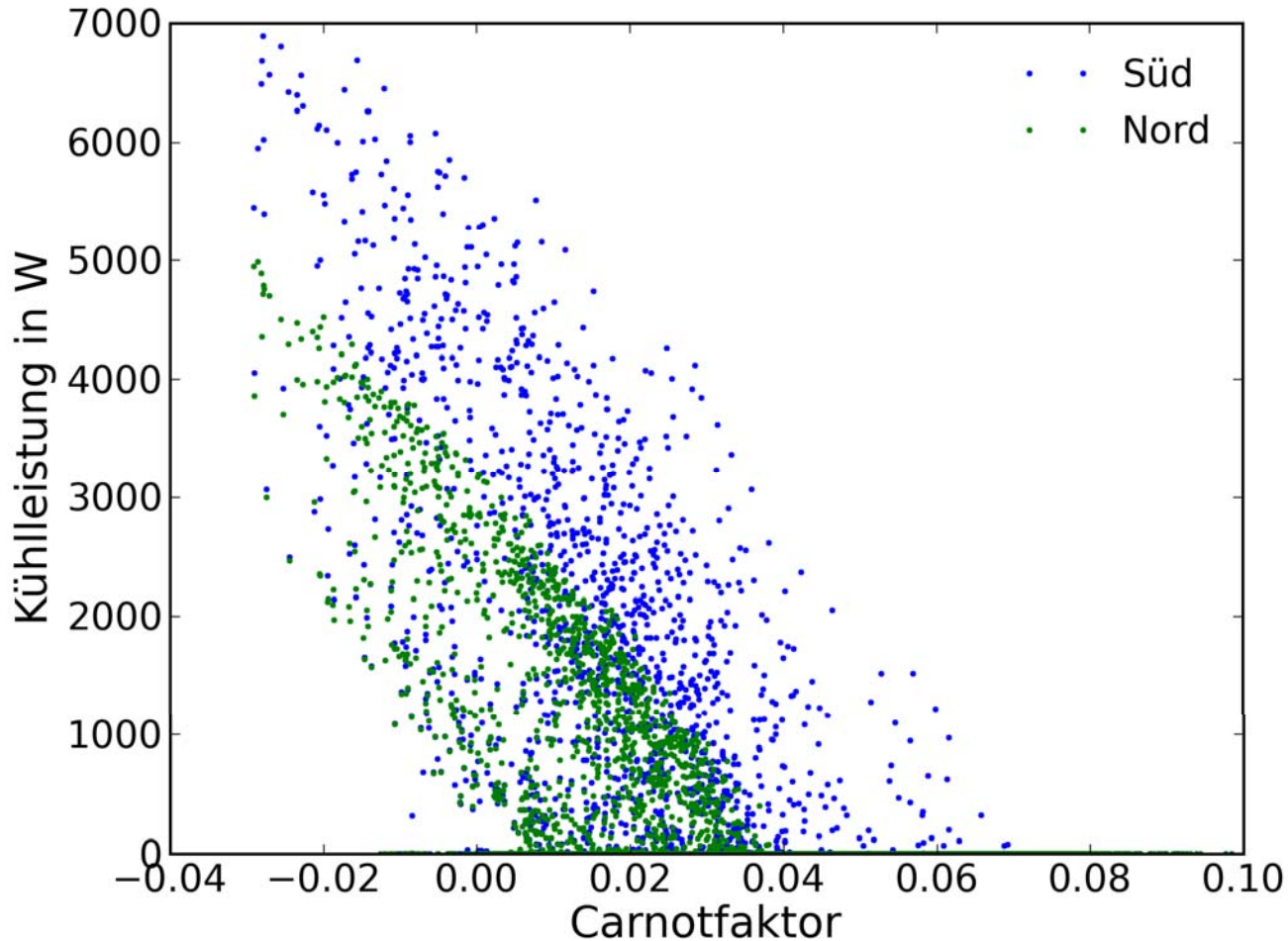


Carnot-Faktor vs. Kühlleistung (Sommerperiode)



Ideales Kühlsystem,
Typ. Büroprofil der
inneren Lasten,
Raumlufthtemperatur und
Luftwechsel

Carnot-Faktor vs. Kühlleistung (Jahresperiode)



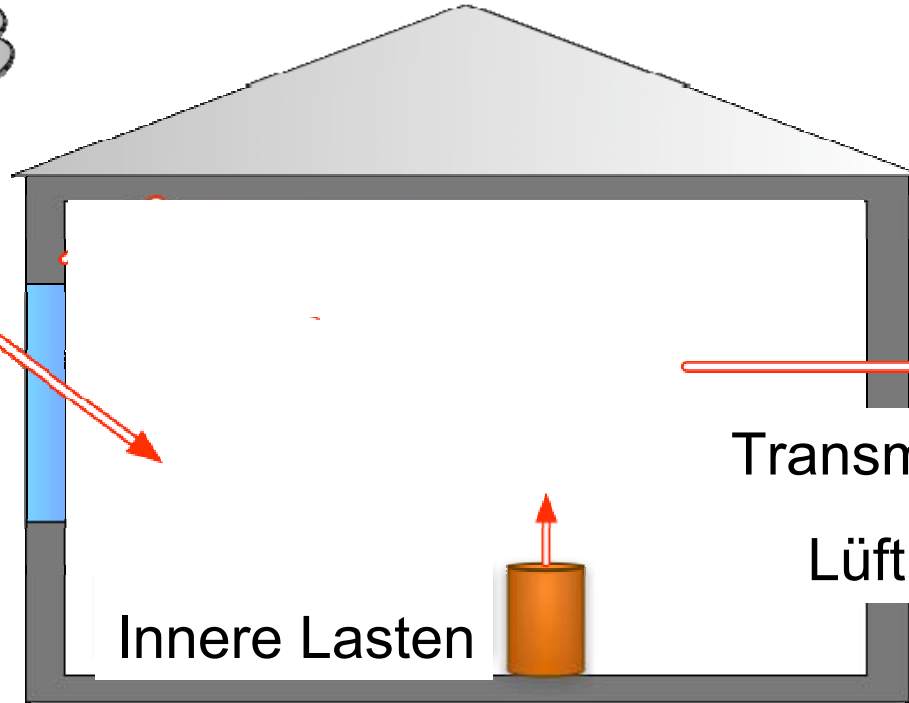
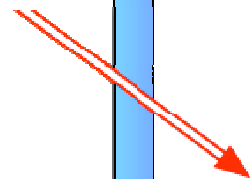
Ideales Kühlsystem,
Typ. Büroprofil der
inneren Lasten,
Raumlufthtemperatur
und Luftwechsel

Negativer Exergiebedarf wenn :

$$T_{\text{Raum}} > T_{\text{Umgebung}} \text{ und } \dot{Q}_{\text{Bedarf}} < 0 \text{ kW}$$



Solare Lasten



Transmission

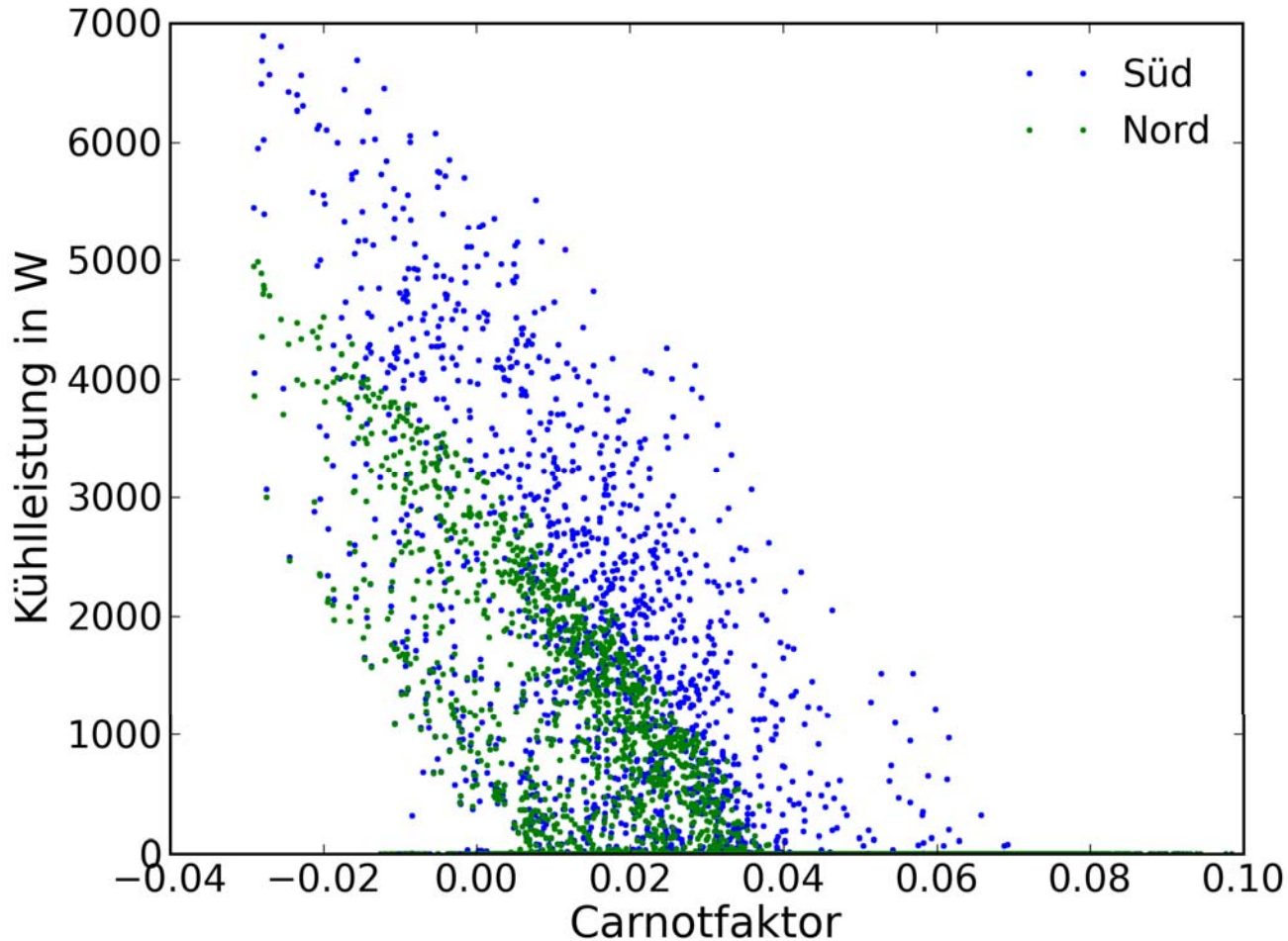
Lüftung

Innere Lasten

Carnot-Faktor vs. Kühlleistung



E.ON Energy Research Center



Ideales Kühlsystem,
Typ. Büroprofil der
inneren Lasten,
Raumlufthtemperatur und
Luftwechsel

Abweichung
Exergiebedarf:

1481 % (Nord)

595 % (Süd)

- Exergieanalyse erlaubt thermodynamisch objektive Bewertung von Gebäude und Versorgungsstruktur
- Dynamische Verfahren erlauben eine detaillierte Auswertung der Einzelverluste unter wechselnden Randbedingungen
- Insbesondere die Erzeugungs- und Übergabeverluste unterscheiden sich von den analogen Werten einer energetischen Analyse
- Einheitliches Berechnungs- und Bewertungsverfahren für den Heiz-, Kühl- und Klimatisierungsfall ist zu entwickeln