

Die Hauptaufgabe der Bauphysik in diesem Abschnitt 4.1 besteht in der Ermittlung des Heizwärmebedarfs aus der Bilanzierung der Verlust- und Gewinnwärmeströme am Gebäude: Transmissionswärmeverluste, Lüftungswärmeverluste, Strahlungswärmegewinne durch die Fenster, Strahlungswärmegewinne über die opaken Bauteile und interne Wärmegewinne während der winterlichen Heizperiode bei mitteleuropäischen Klimaverhältnissen.

Diese be- und entlastenden Wärmeströme sind in Bild 4.1 dargestellt. In Deutschland begrenzt der Gesetzgeber in der Energieeinsparverordnung ENEC 2002 (Novellierungen 2004 und 2007 [21]) die Primärenergie, eine fiktive Energie, die den Bedarf mit den Verlusten der technischen Anlagen (siehe Flussbild 4.2) aber auch mit der volkswirtschaftlichen „Güte“ der Eingangsenergien (es ist z.B. im Jahr 2006 sträflicher Elektroenergie anstatt Erdgas zu benutzen) gewichtet. Die Primärenergie darf nicht mit der erforderlichen und vom Verbraucher wirklich zu bezahlenden Endenergie verwechselt werden. Der Quotient aus maximal zulässiger Primärenergie und erforderlicher Heizenergie (Heizwärme- und Trinkwassererwärmungsbedarf) wird als Anlagenaufwandszahl bezeichnet. Die technische Anlage muss so ausgelegt sein, dass dieser Wert nicht überschritten wird. Letzteres ist eine Aufgabe der Technischen Gebäudeausrüstung.

Das Energie-Flussbild 4.2 zeigt auf der linken Seite die Energien, die am Gebäudeeingang zur Verfügung stehen müssen (Endenergie), auf der rechten Seite steht der Bedarf, der durch die Gebäudekonstruktion und die Nutzung bestimmt wird. Der Hauptanteil wird durch den Heizwärmebedarf gestellt. Der Trinkwasserwärmebedarf wird in diesem Kapitel mit einem Festwert von $12,5 \text{ kWh/m}^2$ Nutzfläche angenommen. Die Senkung des Heizenergiebedarfs von Gebäuden trägt maßgeblich zur Reduktion der atmosphärischen CO_2 -Verschmutzung bei.

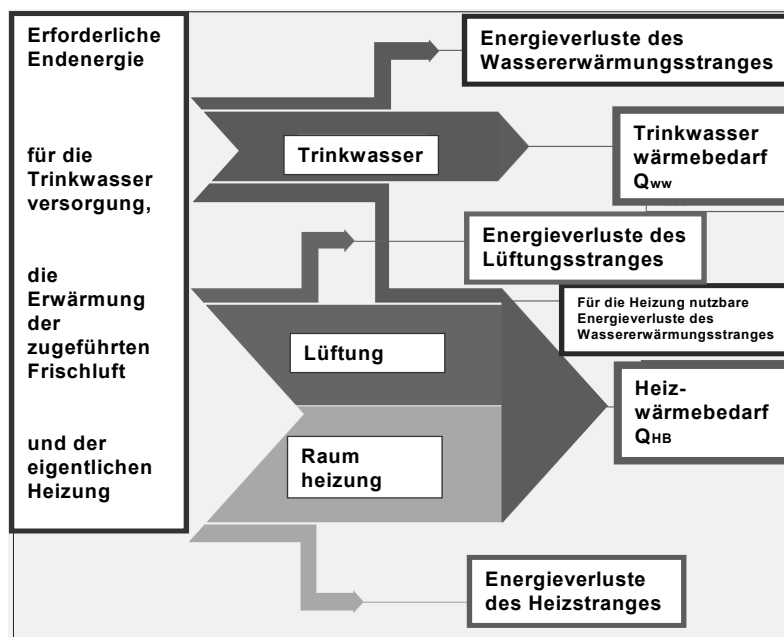


Bild 4.2 Energieflussbild für ein Gebäude

4.1.1 Wärmestrombilanz während der Heizperiode – Heizwärmebedarf

4.1.1.1 Bilanz der Verlust- und Gewinnwärmeströme zur Berechnung des Heizwärmebedarfs

Ein wesentlicher Bestandteil der erforderlichen Gebäudeendenergie ist der Heizwärmebedarf. Er soll aus der Wärmestrombilanz des Gebäudes für konstante Klimarandbedingungen während der Heizperiode näherungsweise berechnet und später begrenzt werden. Die folgende Übersicht enthält die Verlust- und Gewinnwärmeströme. Sie werden in den anschließenden Abschnitten separat abgeleitet und anhand eines Beispiels ausführlich erläutert.

Mittlere Raum- und Außenlufttemperatur θ_i, θ_e während der Heizperiode in °C

$\theta_i := 19 \quad \theta_e := 3.3$
 Die deutsche Energieeinsparverordnung 2002 basiert auf $t_h=185$ Tage bzw. 4440h für eine Heizgrenztemperatur von 10°C. Eine genauere Ableitung nach Abschnitt 4.1.3 liefert $t_h = 196$ Tage.

Länge der Heizperiode t_h in h oder d
 Gradtagwert Z in Kd

$t_h := 4440 \quad t_h := 185$
 $Z := (\theta_i - \theta_e) \cdot t_h \quad Z = 2905 \quad (4.1)$

Gradtagwerte Z einiger deutscher Städte für $t_h=212h$ und eine Heizgrenztemperatur von 12°C

Augsburg	3663 Kd	Hof	4369 Kd
Berlin	3410 Kd	Karlsruhe	2952 Kd
Dresden	3576 Kd	München	3626 Kd
Frankfurt/M	3322 Kd	Würzburg	3340 Kd

Transmissionswärmeverluststrom Φ_{TV} durch opake Bauteile und Fenster in W
 Spezifischer (temperaturbezogener) Transmissionswärmeverlust H_{TV} in W/K

$$\Phi_{TV} = \sum_{j=1}^n (U_j \cdot A_j \cdot r_j + \Delta U_B \cdot A) \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (4.2)$$

$$H_{TV} = \sum_{j=1}^n (U_j \cdot A_j \cdot r_j + \Delta U_B \cdot A)$$

Zunahme des U-Wertes in W/m²K der gesamten Hüllfläche durch Wärmebrücken

$\Delta U_B := 0.05$

Abminderungsfaktor r für die Temperaturdifferenz, wenn Bauteile nicht an die Außenluft grenzen

$r_W := 1$	Außenwände und Warmdach,
$r_D := 0.8$	Kaltdach
$r_{AB} := 0.5$	Unbeheizter Nebenraum
$r_K := 0.6$	Unbeheizter Keller, Kellerwand, Bodenplatte
$r_G := 0.9$	Garage
$r_{Wi} := 0.5, 0.6 \dots 0.9$	Wintergarten

Lüftungswärmeverluststrom
 Φ_{LV} in W
 oder mit $V_{\dot{L}} = dV/dt = n_L \cdot V_L$
 Luftwechselrate n_L in 1/h
 Dichte der Luft ρ_L in kg/m³,
 spezifische Wärmekapazität der
 Luft in Wh/kgK

$$\Phi_{LV} = [c_{pL} \cdot \rho_L \cdot V_L \cdot (\theta_i - \theta_e)] \quad \text{Luftvolumenstrom } V_L \text{ in m}^3/\text{h},$$

$$\Phi_{LV} = [c_{pL} \cdot \rho_L \cdot n_L \cdot V_L \cdot (\theta_i - \theta_e)] \quad \text{beheiztes Luftvolumen } V_L \text{ in m}^3$$

$$\rho_L := 1.24 \quad (4.3)$$

$$c_{pL} := \frac{1000}{3600}$$

spezifischer Lüftungswärmeverlust
 in W/K

$$H_{LV} = (c_{pL} \cdot \rho_L \cdot n_L \cdot V_L) \quad (4.4)$$

Strahlungsgewinnwärmestrom
 Φ_{SGF} durch die Fenster bzw.
 verglasten Bauteile in W

$$\Phi_{SGF} = \sum_{j=1}^n z_j \cdot f_{Rj} \cdot g_j \cdot G_j \cdot A_{Fj} \quad (4.5)$$

Von außen während der Heizperiode
 von Oktober bis April im Mittel
 zugeführte kurzwellige
 Strahlungswärmestromdichte
 G in W/m²

$$G_{\text{süd}} := 61 \quad G_{\text{nord}} := 23 \quad G_{\text{ost}} := 35 \quad G_{\text{west}} := 35$$

$$G_{45\text{süd}} := 72 \quad G_{45\text{nord}} := 31 \quad G_{45\text{ost}} := 47 \quad G_{45\text{west}} := 47$$

$$G_{\text{hor}} := 51$$

Effektiver
 Glasdurchlasskoeffizient g

$$g_1 := 0.74 \quad \text{Einfachverglasung}$$

$$g_2 := 0.65 \quad \text{Doppelverglasung ohne Infrarotbeschichtung}$$

$$g_{2b} := 0.55 \quad \text{Doppelverglasung mit Infrarotbeschichtung}$$

$$g_3 := 0.55 \quad \text{Dreifachverglasung ohne Infrarotbeschichtung}$$

$$g_{3b} := 0.40 \quad \text{Dreifachverglasung mit Infrarotbeschichtung}$$

Glasflächenanteil oder
 Rahmenfaktor f_R

$$f_R = \frac{A_{\text{glas}}}{A_{\text{glas}} + A_{\text{rahmen}}} \quad f_R := 0.7 \quad (4.6)$$

Verschattungsfaktor im Winter z

$$z := 0.9$$

Strahlungswärmegewinnstrom über die opaken Bauteile in W

$$\Phi_{SGW} = \left[\sum_{j=1}^n (a_j \cdot G_j - f \cdot \epsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er}) \cdot A_{Wj} \cdot U_{Wj} \right] \cdot R_{\text{sec}} \quad (4.7)$$

Der kurzwellige Strahlungszugewinn ergibt sich durch Multiplikation des Strahlungsangebotes während der Heizperiode aus Abschnitt 1.1.2.2 multipliziert mit den Absorptionskoeffizienten für kurzwellige Strahlung nach Abschnitt 2.3.1.

Kurzwelliges
 Strahlungsangebot
 während der
 Heizperiode

$G_{\text{süd}} := 61$	$G_{\text{nord}} := 23$	$G_{\text{ost}} := 35$	$G_{\text{west}} := 35$	
$G_{45\text{süd}} := 72$	$G_{45\text{nord}} := 31$	$G_{45\text{ost}} := 47$	$G_{45\text{west}} := 47$	$G_{\text{hor}} := 51$

Absorptionsgrad a
 der opaken Bauteile
 für kurzwellige Strahlung
 (siehe auch
 Tafel 2.5)

Putz weiß	$a=0.21$	Beton bewittert	$a=0.65$
Putz grau	$a=0.65$	Holz imprägniert	$a=0.85$
Ziegel rot	$a=0.54$	Bitumenanstrich	$a=0.90$
KS-Stein grau	$a=0.60$	Aluminium roh	$a=0.05$

Der kurzwellige Strahlungszugewinn a_G muss bei opaken Bauteilen durch die langwellige Abstrahlung abgemindert werden (Gl. (4.8) und (4.9)).	$q_{erh} := f_h \cdot \varepsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er}$ (4.8)
	$q_{erv} := f_v \cdot \varepsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er}$ (4.9)
Mittlere Temperaturdifferenz $\Delta\theta_{er}$ zwischen Bauteiloberfläche und Troposphärenengrenze in K	$\Delta\theta_{er} := 60$
Stefan-Boltzmann-Konstante σ in W/m^2K^4	$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8}$
Mittlere Außenoberflächentemperatur θ_{se} während der Heizperiode in $^{\circ}C$	$\theta_{se} := 3.5$
Emissionskoeffizient ε der Himmelsgegenstrahlung im langwelligen Bereich	$\varepsilon := 0.15$
	$h_{er} := 4 \cdot \sigma \cdot (273 + \theta_{se})^3$
Strahlungsübergangskoeffizient h_{er} in W/m^2K	$h_{er} = 4.794$
Abminderungsfaktor f_h für Dachflächen bis 45°	$f_h := 0.76$
Abminderungsfaktor f_v für vertikale Wandflächen	$f_v := 0.28$
Abgegebener langwelliger Strahlungswärmestromdichte q_{erh} und q_{erv} in W/m^2	$q_{erh} = 32.8$
	$q_{erv} = 12.1$
Konvektiver Übergangswiderstand in m^2K/W	$R_{sec} := 0.05$

Wärmegewinnstrom durch interne Wärmequellen (Personen, Geräte, Beleuchtung) in W

Nutzflächenbezogene Ergiebigkeit der inneren Wärmequellen, A_N	$\Phi_{Gi} = \sum_{j=1}^n q_{ij} \cdot A_{Nj}$ (4.10)
Nutzfläche des beheizten Gebäudevolumens in m^2	
q_i in W/m^2 für den Wohnungsbau	$q_i := 5$

Werden die Gewinn- und Verlustwärmeströme bilanziert und mit der Länge der Heizperiode multipliziert, ergibt sich näherungsweise der Wärmeenergiebedarf für die Heizung des Gebäudes. Durch Unterbrechung des Heizungsbetriebes lassen sich die Verluste etwas reduzieren ($\eta_V = 0.95$). Die zeitlich nicht konstanten Gewinne können durch die begrenzte Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile nicht vollständig ausgenutzt werden (Ausnutzungsgrad $\eta_G = 0.95$). Daraus folgt schließlich für den **vorhandenen Heizwärmebedarf während der Heizperiode in Wh**:

$$Q_{HB} = (\Phi_{TV} + \Phi_{LV}) \cdot \eta_V \cdot t_h - (\Phi_{SGF} + \Phi_{SGW} + \Phi_{Gi}) \cdot \eta_G \cdot t_h$$

$$Q_{HB} = \sum_{j=1}^n [(U_j \cdot A_j \cdot t_j + \Delta U_{Bj}) + (c_{pL} \cdot \rho_L \cdot \eta_L \cdot V_L)] \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot \eta_V \cdot t_h - \left[\sum_{j=1}^n z_j \cdot f_{Rj} \cdot g_j \cdot G_j \cdot A_{Fj} + \sum_{j=1}^n (a_j \cdot G_j - f \cdot \varepsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er}) \cdot A_{Wj} \cdot U_{Wj} \cdot R_{sec} + q_i \cdot A_N \right] \cdot \eta_G \cdot t_h \quad (4.11)$$

4.1.1.2 Transmissionswärmestrom und Transmissionswärmeverlust

Ausgehend von der stationären Wärmestromdichte q_T durch das einzelne Bauteil ergibt sich durch Multiplikation mit der Bauteilfläche A_B der Transmissionswärmestrom $dQ/dt=\Phi_T$ in W

$$\Phi_T = U \cdot [(\theta_i - \theta_e) A_B] \quad (4.12)$$

Wie die numerische Simulation des instationären Wärmedurchgangs mit den Stundenwerten der bauklimatischen Außen- und Raumklimakomponenten über den Zeitraum der Heizperiode von Anfang Oktober bis Anfang April ($t_h=185$ d) zeigt, spielt die Wärmespeicherung bei Mittelung über diesen langen Zeitraum keine Rolle mehr, und der stationäre Wärmedurchgangswert U ist tatsächlich ein thermisches Gütekriterium für das Außenbauteil (siehe auch Abschnitt Thermisches Verhalten von Bauteilen). Der Gesamttransmissionswärmestrom durch die Hüllkonstruktion, die das beheizte Gebäudevolumen umgibt, lässt sich durch Parallelschalten der einzelnen Bauteile, dh. durch eine einfache Addition der Bauteilwärmeströme berechnen. Daraus folgt

$$\Phi_T = \sum_{j=1}^n (U_j \cdot A_j) \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (4.13a)$$

Wie das Eingangsmodellbild zeigt, liegt nicht an allen Bauteilen die volle Temperaturdifferenz an. Durch einen Abminderungsfaktor r_j wird der jeweiligen Situation (unbeheizter Nebenraum, Kaltdach, Bodenplatte, Wintergarten usw.) Rechnung getragen.

$$\Phi_T = \sum_{j=1}^n (U_j \cdot A_j \cdot r_j) \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (4.13b)$$

Wärmebrücken führen zu einer Erhöhung der Transmissionswärmestromes durch die Umfassungskonstruktion. Dieser Zuwachs wird durch eine pauschale Erhöhung des U -Wertes der Gesamtfläche A der Umfassungskonstruktion um $\Delta U_B=0.05$ W/m² K berücksichtigt.

$$\Phi_{TV} = \sum_{j=1}^n (U_j \cdot A_j \cdot r_j + \Delta U_B \cdot A) \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (4.1)$$

Der jährliche Gesamttransmissionswärmeverlust ergibt sich schließlich durch Multiplikation mit der Heizzeit t_h

$$Q_{TV} = \sum_{j=1}^n (U_j \cdot A_j \cdot r_j + \Delta U_B \cdot A) \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot t_h \quad (4.14)$$

4.1.1.3 Lüftungswärmestrom und Lüftungswärmeverlust

Die Grundlage dieses Kapitels bildet die freie Lüftung über Fenster, Türen und definierte Lüftungsöffnungen. Die kalte Außenluft der Temperatur θ_e strömt in den Raum und muss auf die Raumlufttemperatur θ_i erwärmt werden. Die warme Raumluft wird (zunächst) ohne Wärmerückgewinnung nach außen abgeführt. Die dazu erforderliche Leistung $dQ_L/dt=\Phi_L$ ergibt sich aus der Multiplikation des Luftvolumenstromes $dV/dt=V_t$ mit der spezifischen Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck $c_{pL}=1000$ Ws/kgK bzw. $c_{pL}=0.278$ Wh/kgK und der mittleren Luftdichte $\rho_L=1.24$ kg/m³

$$\Phi_{LV} = [c_{pL} \cdot \rho_L \cdot V_t \cdot (\theta_i - \theta_e)] \quad V_t = \frac{d}{dt} V_i \quad n_L = \frac{V_t}{V_i} \quad (4.3)$$

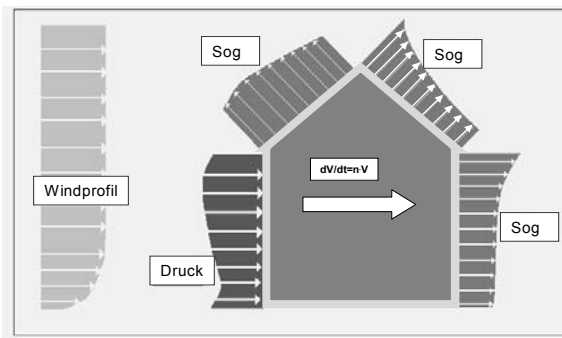
Der Luftvolumenstrom $dV_L/dt=V_L$ kann durch die anschauliche Luftwechselrate n_L wie folgt ersetzt werden $V_L=n_L \cdot V_L$ (Luftvolumenstrom in m^3/h , Luftwechselrate in $1/h$, vergleiche (1.67)). V_L ist das Gebäudeluftvolumen, das während der Heizperiode t_h von θ_e auf θ_i tatsächlich erwärmt werden muss. Die Luftwechselraten liegen bei freier Lüftung in folgendem Bereich:

- Fenster und Türen geschlossen 0 ...0.5/h
- Fenster gekippt, keine Rolladen 0.3...1.5/h
- Fenster offen 5 ...15/h

Der Luftwechsel wird bei freier Lüftung durch die am Gebäude anliegenden Wind- und Auftriebsdruckdifferenzen verursacht. Diese werden auf den folgenden Seiten abgeschätzt. Sie liegen während der Heizperiode jeweils in der Größenordnung von 10Pa. Der jährliche Gesamtlüftungswärmeverlust ergibt sich schließlich ebenfalls durch Multiplikation mit der Heizzeit t_h .

$$Q_{LV} = [c_{pL} \cdot \rho_L \cdot n_L \cdot V_L \cdot (\theta_i - \theta_e)] \cdot t_h \tag{4.15}$$

Bild 4.3
Druckverteilung um ein windangeströmtes Gebäude und winddruckbedingte Durchlüftung des Gebäudes



Die Druckdifferenz an einem Gebäude infolge Windeinwirkung ergibt sich aus dem Staudruck.

$$\rho := 1.25$$

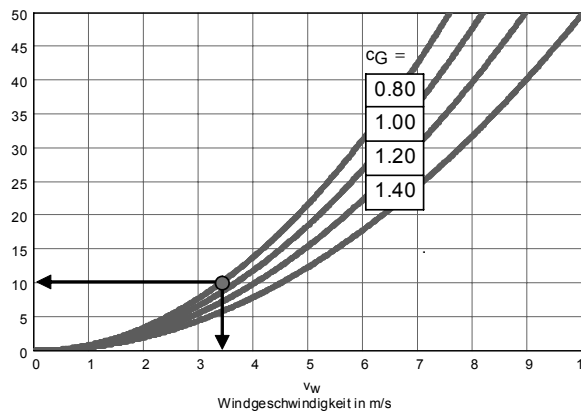
$$\Delta p_{wind}(c_G, v_w) := c_G \frac{\rho}{2} \cdot v_w^2$$

$$c_G := 0.8, 1.0 \dots 1.4$$

$$v_w := 0, 0.01 \dots 10$$

Winddruck in Pa
••••• $\Delta p_{wind}(c_G, v_w)$

c_G : Widerstandsbeiwert des Gebäudes
 v_w : Windgeschwindigkeit in m/s



Aus dem Diagramm 4.4 ist zu erkennen, dass die Winddruckdifferenzen am Gebäude für 3.5m/s etwa bei maximal 10Pa liegen.

Bild 4.4
Winddruck in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Die vertikale Druckverteilung an einem Gebäude wird verursacht durch den Temperaturunterschied zwischen Raum- und Außenluft $\theta_i - \theta_e$ und thermisch bedingte Durchlüftung des Gebäudes (Kaminwirkung). Die Druckdifferenz an einem Gebäude infolge des thermischen Auftriebes ergibt sich aus dem temperaturabhängigen Dichteunterschied zwischen der Außen- und Innenluft. Aus der Gasgleichung folgt:

Bild 4.5
Vertikale Druckverteilung an einem Gebäude

$$\rho_i := \rho_e - \rho \frac{\theta_i - \theta_e}{T_m}$$

$$\Delta p_{\text{Auftrieb}}(z, \theta_e) := \rho \cdot g \cdot z \frac{\theta_i - \theta_e}{T_m} \quad (4.17)$$

$$\theta_i := 20$$

$$\theta_e := 0, 5, \dots, 25$$

$$\Delta p_{\text{Auftrieb}} := (\rho_i - \rho_e) \cdot g \cdot z$$

$$g := 9.81 \quad \rho := 1.25$$

Mittlere Temperatur in K

$$T_m := 283$$

Halbe Gebäudehöhe in m

$$z := -6, -5, \dots, 6$$

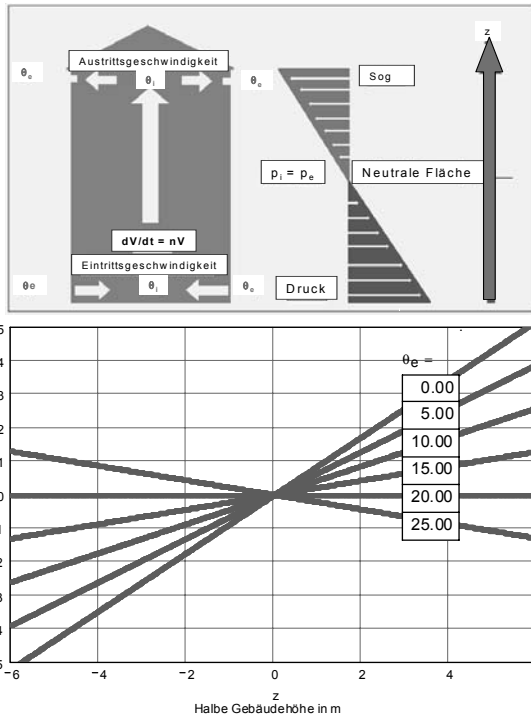


Bild 4.6 Schweredruckdifferenz in Abhängigkeit von der Höhe

Aus Bild 4.6 ist zu erkennen, dass die vertikalen Druckdifferenzen am Gebäude infolge des unterschiedlichen Auftriebes im Winter ebenfalls bei etwa 10Pa liegen (Gebäudehöhe $h=2z=12m$).

Erfolgt der Luftwechsel im Gebäude nur über die definierten Fenster- und Türfugen, gilt für den Luftvolumenstrom $V_t = dV_t/dt$ in m^3/h näherungsweise die Gl. (4.18). Im Spaltgebiet herrscht eine Strömung, die zwischen laminaren und turbulenten Verhältnissen wechselt. Bei einer laminaren Strömung wächst die Stromstärke linear mit der Druckdifferenz, bei einer turbulenten Strömung hingegen etwa mit der Wurzel aus der Druckdifferenz. Der Exponent $2/3$ liegt dazwischen. Die Größe a in $m^3/mhPa^{2/3}$ wird Fugendurchlasskoeffizient genannt. Er liegt im Bereich zwischen $0.1m^3/mhPa^{2/3}$ (neue, sehr dichte Fenster und Türen, keinerlei „Falschfugen“) und $0.7m^3/mhPa^{2/3}$.

$$V_{tl} := c_l \cdot \Delta p_l \quad \text{laminar} \quad a := 0.1, 0.3 \dots 0.7$$

$$V_{tt} := c_t \cdot \Delta p_t \frac{1}{2} \quad \text{turbulent} \quad l := 30$$

$$V := 60$$

$$\Delta p := 2, 2.02 \dots 60$$

Fugenlüftung:

$$V_t(a, \Delta p) := a \cdot (\Delta p)^{\frac{2}{3}} \quad (4.18)$$

$$n(a, \Delta p) := \frac{V_t(a, \Delta p)}{V} \quad (4.19)$$

Die Gesamtfugenlänge beträgt für den gewählten Beispielraum $V=60\text{m}^3$, 3 Fenster, 2 Türen, $l=30\text{m}$. Die am Gebäude anliegenden Druckdifferenzen variieren zwischen 2Pa und 60Pa . Die Luftwechselrate für das Gebäude bzw. den betrachteten Raum ergibt sich schließlich nach Gleichung (4.19)

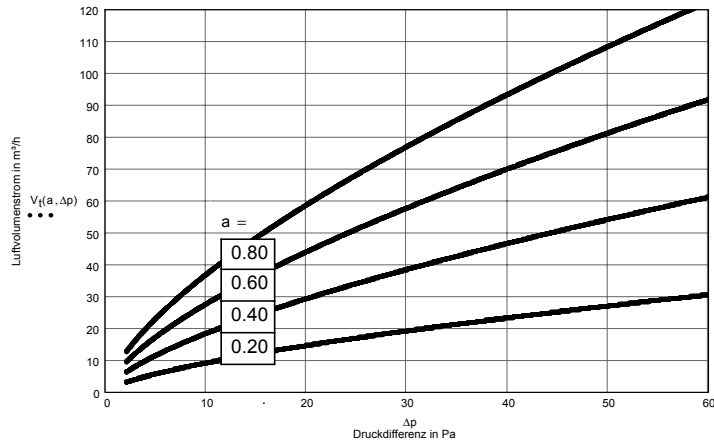


Bild 4.7 Luftvolumenstrom in einem Gebäude in Abhängigkeit von der anliegenden Wind- bzw. Schweredruckdifferenz und dem Fugendurchlasskoeffizienten (Fenster und Türen geschlossen)

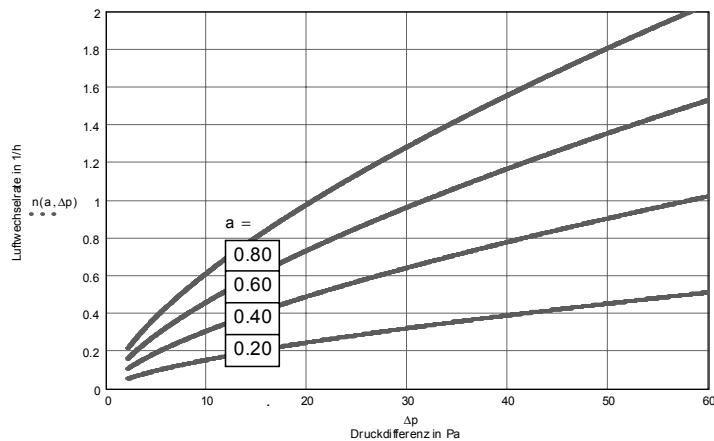


Bild 4.8 Luftwechselrate in einem Gebäude in Abhängigkeit von der anliegenden Wind- bzw. Schweredruckdifferenz und dem Fugendurchlasskoeffizienten (Fenster und Türen geschlossen)

Die Diagramme 4.7 und 4.8 zeigen, dass die Mindestluftwechselrate $n=0,5/\text{h}$ bei einer Druckdifferenz von $Dp=10\text{Pa}$ nur bei dem sehr großen Fugendurchlasskoeffizienten von $a=0.6\text{m}^3/\text{mhPa}^{2/3}$ erreicht werden. Der Normalwert liegt bei den derzeitigen dichten Fenstern bei $a=0.2\text{m}^3/\text{mhPa}^{2/3}$, (Grundluftwechselrate $n_{\text{Grund}}=0.2/\text{h}$) d.h. die Fugenlüftung muss auch im Winter durch eine regelmäßige Stoßlüftung ergänzt werden. In etwa gelten folgende Luftwechselraten:

- Fenster und Türen geschlossen 0- 0.5/h,
- Fenster gekippt, keine Rollläden 0.3 -1.5/h,
- Fenster offen 5 - 15/h.

4.1.1.4 Strahlungswärmestrom und Wärmegewinn durch die verglasten Bauteile

Auf die Gebäudehülle trifft von außen die kurzwellige Strahlungswärmestromdichte G (in W/m^2). Beim Durchgang durch die Verglasung wird sie durch den Glasdurchlasskoeffizienten g , den Glasflächenanteil oder Rahmenfaktor $f_R = A_{Glas} / (A_{Glas} + A_{Rahmen})$ und den Verschattungsfaktor z geschwächt, z lässt sich in einen Verschattungsfaktor durch die Umgebungsbebauung und den Bewuchs F_s und einen Verschattungsfaktor durch die Sonnenschutzvorrichtung F_c aufteilen $z = F_s \cdot F_c$. Daraus folgt schließlich für die Strahlungswärmestromdichte durch die Fenster die Gl. (4.5)

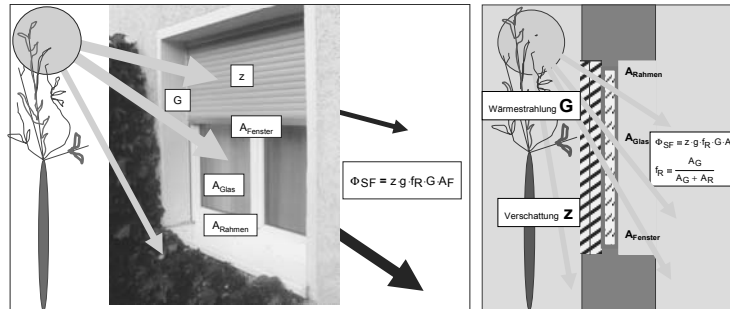


Bild 4.9 Strahlungswärmegewinn über die Fenster

$$\Phi_{SF} = \sum_{j=1}^n z_j \cdot f_{Rj} \cdot g_j \cdot G_j \cdot A_{Fj} \tag{4.5}$$

Die von außen während der Heizperiode ($t_h = 185$ Tage = 4440h von Anfang Oktober bis Mitte April) im Mittel zugeführte kurzwellige Strahlungswärmestromdichte G in W/m^2 beträgt (vgl. Abschnitt 1.1.3).

Tafel 4.1 Kurzwellige Strahlungswärmestromdichte während der Heizperiode

$G_{Süd} := 61$	$G_{Nord} := 23$	$G_{Ost} := 35$	$G_{West} := 35$	
$G_{45Süd} := 72$	$G_{45Nord} := 31$	$G_{45Ost} := 47$	$G_{45West} := 47$	$G_{hor} := 51$

Für die verglasten Bauteile gelten die in Tafel 4.2 aufgelisteten Kennwerte

Tafel 4.2 Glasdurchlasskoeffizient, Glasflächenanteil und Verschattungsfaktor

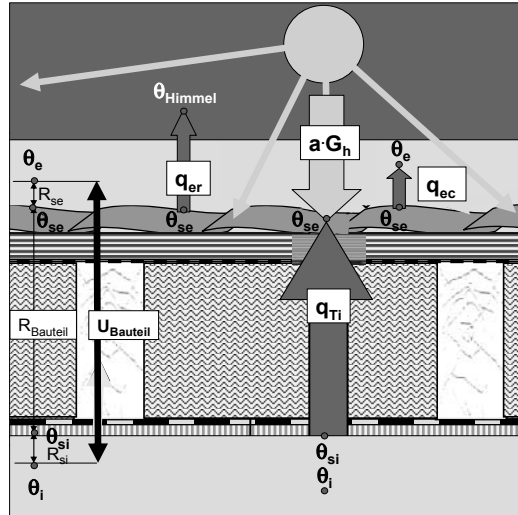
Effektiver Glasdurchlasskoeffizient g		$g_1 := 0.74$
Einfachverglasung		$g_2 := 0.65$
Doppelverglasung ohne Infrarotbeschichtung		$g_{2b} := 0.55$
Doppelverglasung mit Infrarotbeschichtung		$g_3 := 0.55$
Dreifachverglasung ohne Infrarotbeschichtung		$g_{3b} := 0.40$
Dreifachverglasung mit Infrarotbeschichtung		
Glasflächenanteil oder Rahmenfaktor des Fensters f_R	$f_R = \frac{A_{Glas}}{A_{Glas} + A_{Rahmen}}$	$f_R := 0.7$
Verschattungsfaktor im Winter z		$z := 0.9$

Wird Φ_{SF} mit der Länge der Heizperiode t_h multipliziert, ergibt sich der Strahlungswärmegewinn durch die Fenster während der Heizperiode

$$Q_{SGF} = \sum_{j=1}^n f_{Rj} \cdot z_j \cdot g_j \cdot G_j \cdot A_{Fj} \cdot t_h \tag{4.20}$$

4.1.1.5 Strahlungswärmestrom und Wärmegewinn über die opaken Bauteile

Von der kurzwelligeren Strahlungswärmestromdichte G wird der Anteil aG durch die äußere Oberfläche der opaken Bauteile mit dem Absorptionsgrad a aufgenommen. ein Teil (q_{er}) aber wieder langwellig reflektiert. Daraus folgt im Regelfall eine Erwärmung der äußeren Bauteiloberfläche (Oberflächentemperatur θ_{se}), die auch den konvektiv an die Umgebung abgegebenen Anteil q_{ec} beeinflusst. Die damit verbundene Reduktion der Transmissionswärmeverluste q_{Ti} entspricht dem Strahlungswärmegewinn durch die opaken Bauteile.



Aus der Abbildung ist folgende Bilanz der Wärmestromdichten abzulesen:

$$q_{Ti} = (q_{ec} + q_{er} - a \cdot G_h) \quad (4.21) \quad \text{Bild 4.10 Strahlungswärmegewinn über die opaken Bauteile}$$

Für q_{Ti} und q_{ec} gelten die bekannten Beziehungen, wobei durch die separate Betrachtung der langwelligeren Abstrahlung mit q_{ec} nur die konvektiv übergehende Wärmestromdichte erfasst wird.

$$q_{Ti} = \frac{\theta_i - \theta_e}{R_W + R_{Si}} \quad R_W = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} \quad q_{ec} = \frac{\theta_{se} - \theta_e}{R_{sec}}$$

Die langwellige Abstrahlung q_{er} lässt sich aus der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Himmel- und Bauteiloberflächentemperatur $\Delta\theta_{er}$ sowie dem abgeminderten ϵ -Wert der Himmelsgegenstrahlung im langwelligeren Bereich (siehe Strahlungsdichte in Bild 2.17, Abschnitt 2.3.1) abschätzen.

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{er} &:= 60 & \sigma &:= 5.67 \cdot 10^{-8} & h_{er} &:= 4 \cdot \sigma \cdot (273 + \theta_{se})^3 \\ \theta_{se} &:= 3.5 & \epsilon &:= 0.15 & f_h &:= 0.76 & f_v &:= 0.28 \\ q_{erh} &:= f_h \cdot \epsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er} & q_{erh} &= 32.79 & & & & \text{Dächer} \end{aligned} \quad (4.22 a)$$

$$q_{erv} := f_v \cdot \epsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er} \quad q_{erv} = 12.08 \quad \text{Wände} \quad (4.22 b)$$

Werden die Wärmestromdichten q_{Ti} , q_{ec} , q_{er} in die Bilanzgleichung (4.21) eingesetzt, folgt daraus für die äußere Oberflächentemperatur z.B. einer Horizontalfläche

$$\theta_{se} := \frac{\theta_i \cdot R_{sec} + \theta_e \cdot (R_W + R_{Si}) + (R_W + R_{Si}) \cdot R_{sec} \cdot (a \cdot G_h - q_{erh})}{R_{Si} + R_W + R_{sec}} \quad (4.23)$$

Mit den Standardwerten für die Raumlufttemperatur, die Außenlufttemperatur, den konvektiven Wärmeübergangswiderstand an der Außenoberfläche und den Wärmeübergangswiderstand an der raumseitigen Oberfläche ergeben sich 4.0°C

$$\theta_i := 19 \quad \theta_e := 3.3 \quad R_{sec} := 0.048 \quad R_{Si} := 0.13 \quad \theta_{se} = 4.02$$

Wird die Oberflächentemperatur θ_{sc} in die Gleichung für θ_{Ti} eingesetzt, ergibt sich der Energieverlust für eine Horizontal- bzw. Vertikalfläche und mit U_W schließlich in der Version (4.24) und (4.25)

$$q_{Tih} := \frac{\theta_i - \theta_e}{R_{si} + R_W + R_{sec}} - (a \cdot G_h - f_h \cdot \varepsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er}) \frac{R_{sec}}{R_{si} + R_W + R_{sec}}$$

$$U_W := \frac{1}{R_{si} + R_W + R_{sec}}$$

$$q_{Tih} := U_W \left[(\theta_i - \theta_e) - [a \cdot G_h - (f_h \cdot \varepsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er})] \cdot R_{sec} \right] \quad (4.24)$$

$$q_{Tiv} := U_W \left[(\theta_i - \theta_e) - [a \cdot G_v - (f_v \cdot \varepsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er})] \cdot R_{sec} \right] \quad (4.25)$$

Durch die kurzwellige Strahlungswärmestromdichte wird die Transmissionswärmestromdichte um

$$a \cdot G_h \frac{R_{sec}}{R_{si} + R_W + R_{se}} \quad \text{verringert, was einem Gewinn gleichkommt.}$$

$$\Phi_{SGW} = \left(\sum_{j=1}^n a_j \cdot G_j \cdot A_{Wj} \cdot U_{Wj} \right) \cdot R_{sec} \quad (4.26)$$

Die Verringerung kann aber auch durch eine fiktive Erhöhung der Außenlufttemperatur (**Sonnenlufttemperatur**) interpretiert werden.

$$\theta_{er} := \theta_e + a \cdot G_h \cdot R_{sec} \quad \theta_{er} = 5.26$$

Dieser Gewinn wird allerdings wie oben beschrieben durch die langwellige Abstrahlung q_{er} bei klarem Himmel namentlich für Dachflächen verringert.

$$\Phi_{SGW} = \left[\sum_{j=1}^n (a_j \cdot G_j - q_{er}) \cdot A_{Wj} \cdot U_{Wj} \right] \cdot R_{sec} \quad (4.27)$$

Mit $\Delta\theta_{er} = 60\text{K}$ (mittlere Temperaturdifferenz zwischen Bauteiloberfläche und Troposphären­grenze in K) und $\theta_{sc} = 3.5^\circ\text{C}$ folgt für q_{erh} und q_{erv} :

$$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \quad \varepsilon := 0.15 \quad f_h := 0.76 \quad f_v := 0.28 \quad \text{und} \quad h_{er} := 4 \cdot \sigma \cdot (273 + \theta_{se})^3 \quad h_{er} = 4.79$$

$$q_{erh} := f_h \cdot \varepsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er} \quad q_{erh} = 32.79 \quad \text{Dachflächen}$$

$$q_{erv} := f_v \cdot \varepsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er} \quad q_{erv} = 12.08 \quad \text{Wandflächen}$$

und schließlich für den **Gesamtzugewinn über die opaken Bauteile** für die Heizperiode

$$\Phi_{SGW} = \sum_{j=1}^n [a_j \cdot G_j - (f_j \cdot \varepsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er})] \cdot U_{Wj} \cdot A_{Wj} \cdot R_{sec} \cdot t_h \quad (4.28)$$

Der Umgebung kann jetzt die **Strahlungslufttemperatur** zugeordnet werden.

$$\theta_{erh} := \theta_e + [a \cdot G_h - (f_h \cdot \varepsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er})] \cdot R_{sec} \quad \theta_{erh} = 3.69$$

$$\theta_{erv} := \theta_e + [a \cdot G_v - (f_v \cdot \varepsilon \cdot h_{er} \cdot \Delta\theta_{er})] \cdot R_{sec} \quad \theta_{erv} = 4.60$$

Für den Übergangswiderstand an der Außenoberfläche ist nur der konvektive Anteil anzusetzen

$$C := 12 \quad v := 3 \quad R_{sec} := \frac{1}{C \sqrt{v}} \quad R_{sec} = 0.048$$

Es folgt noch eine Zusammenstellung der abgeminderten Strahlungswärmestromdichten in W/m²:

a = 1 günstigster Fall

G _{süd} := 49	G _{nord} := 11	G _{ost} := 23	G _{west} := 23	
G _{45süd} := 39	G _{45nord} := -2	G _{45ost} := 14	G _{45west} := 14	G _{hor} := 18

a = 0.6 normaler Fall

G _{süd} := 25	G _{nord} := 2	G _{ost} := 9	G _{west} := 9	
G _{45süd} := 10	G _{45nord} := -14	G _{45ost} := 5	G _{45west} := 5	G _{hor} := -2

Dächer haben auf Grund der langwelligen Abstrahlung in oftmals sogar eine negative Wärmestrahlungsbilanz während der Heizperiode.

4.1.1.6 Wärmestrom der internen Wärmequellen

Der Wärmegewinnstrom verursacht durch die internen Wärmequellen (Personen, Geräte, Beleuchtung) in W ergibt sich durch Multiplikation des nutzungsflächenbezogenen Kennwertes q_i in W/m² mit der **Nutzfläche** A_N in m² des beheizten Gebäudevolumens. Die Nutzfläche A_N lässt bei einer lichten Geschosshöhe h = 2.6m nach (4.30) abschätzen. Der Gesamtgewinn durch interne Quellen folgt nach Multiplikation mit der Heizzeit t_h.

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^n q_{ij} \cdot A_{Nj}$$

$$Q_{GI} = \sum_{j=1}^n q_{ij} \cdot A_{Nj} \cdot t_h \quad A_N = \left(\frac{V_L}{2.6} \right) = \left(0.8 \frac{V}{2.6} \right) = 0.32 \cdot V \quad (4.29)$$

Wohngebäude q_w = 5W/m²,
 Büro- und Verwaltungsgebäude während der Arbeitszeit 15W/m²
 außerhalb der Arbeitszeit 2W/m²

4.1.2 Näherungsbeziehungen für den vorhandenen Heizwärmebedarf und den zulässigen Heizwärmeverbrauch

4.1.2.1 Näherungsbeziehungen für den vorhandenen spezifischen Heizwärmebedarf

Der vorhandene Heizwärmebedarf (Gl. (4.11) in Abschnitt 4.1.1.1) lässt sich in einen nutzflächenbezogenen Anteil (Lüftungswärmeverluste und interne Wärmegewinne, erste Zeile in (4.31)) und einen umschließungsflächenbezogenen Anteil (Strahlungswärmegewinne durch Fenster und Wände sowie Transmissionswärmeverluste durch Fenster und Wände, zweite Zeile in (4.31)) aufsplitten.

$$Q_{HB} = \left[(c_{pL} \cdot \rho_L \cdot \eta_L) \cdot 2.6 \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot \eta_V \cdot t_h - q_i \cdot \eta_G \cdot t_h \right] \cdot A_N \quad (4.31)$$

$$- \left[\sum_{j=1}^n z_j \cdot f_{Rj} \cdot g_j \cdot G_j \cdot A_{Fj} + \sum_{j=1}^n (a_j \cdot G_j - f_{\epsilon} \cdot h_{er} \cdot \Delta \theta_{er}) \cdot A_{Wj} \cdot U_{Wj} \cdot R_{sec} \right] \cdot t_h \cdot \eta_G + \left[\sum_{j=1}^n (U_j \cdot A_j \cdot r_j + \Delta U_B \cdot A) \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot \eta_V \cdot t_h \right]$$