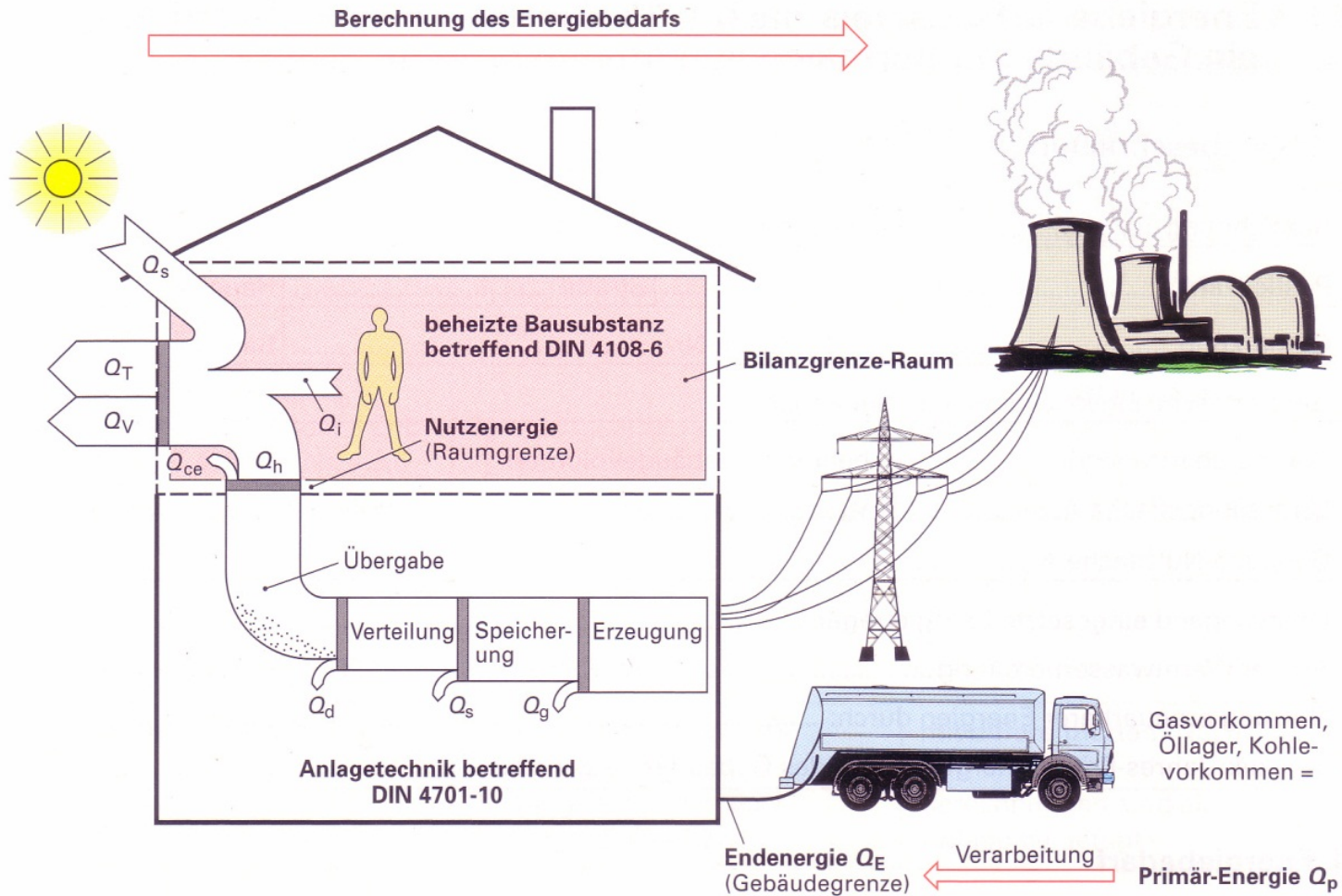


Wärme

Begriffe, Transportmechanismen

Energiebilanzen am und im Gebäude



Temperatur – Thermische Energie – Wärme: Alles dasselbe?

„Thermische Energie“

= Energie der ungeordneten Bewegung von Atomen und Molekülen

= kinetische Energie

$$E_{th} = m \cdot c \cdot T$$

mit:	m	Masse in kg
	c	spezifische Wärmekapazität in J/(kg·K)
	T	absolute Temperatur in K

$$[E_{th}] = J = Ws$$

Temperatur – Thermische Energie – Wärme: Alles dasselbe?

Thermische Energie = Wärme(menge)

nicht zu verwechseln mit

Temperatur

Beispiel:

Schmelzvorgang von Eis zu Wasser bei 0°C erfordert Zufuhr von thermischer Energie = Wärme;
die Temperatur bleibt dabei gleich!

Wärmestrom

Transportierte Wärmemenge pro Zeit
längs eines Temperaturgefälles:

$$\phi = \dot{Q} = \frac{Q}{t}$$

mit Φ Wärmestrom in W
 Q Wärmemenge in J bzw. W·s
 t Zeiteinheit in s

Wärmestromdichte

Wärmestrom pro beteiligtem Querschnitt:

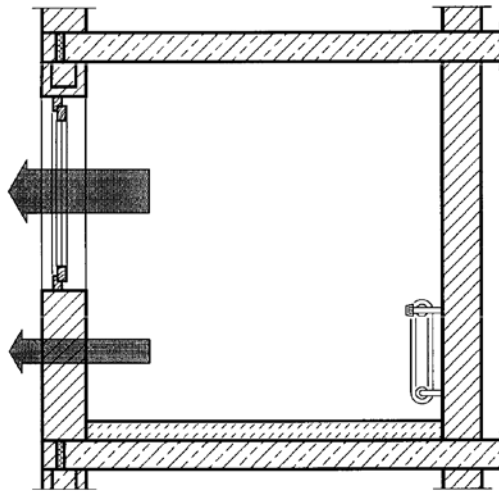
$$q = \frac{\phi}{A} = \frac{Q}{A \cdot t}$$

mit Φ Wärmestrom in W
 Q Wärmemenge in J bzw. W·s
 A Fläche in m²
 t Zeiteinheit in s

Wärmetransportmechanismen

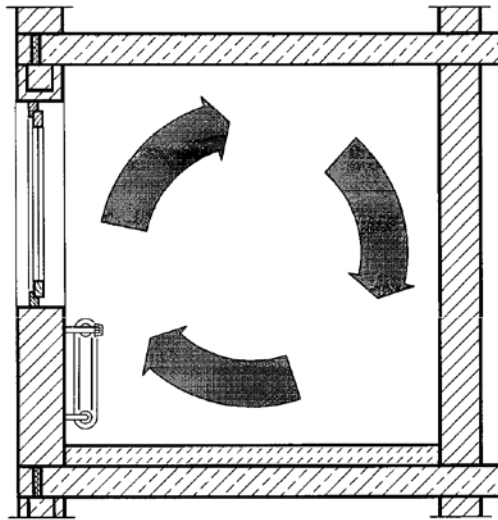
1. Wärmeleitung
2. Konvektion
3. Strahlung

Wärmeleitung



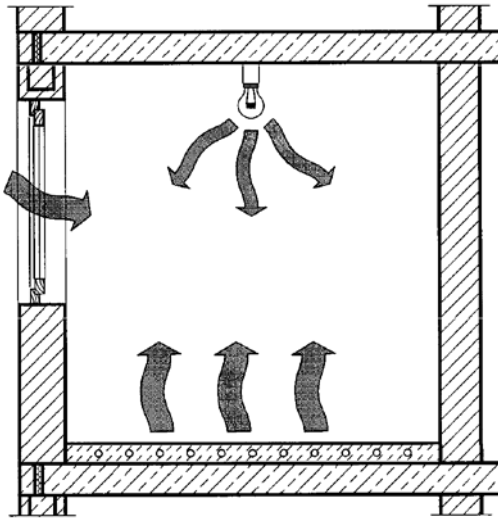
- Atome / Moleküle geben Bewegungsenergie aneinander ab (von warm nach kalt), ohne sich selbst zu bewegen
- Mechanismus in festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen

Konvektion



- Wärmetransport durch Bewegung der Materie selbst
- In flüssigen und gasförmigen Medien
- Erzwungen durch Ventilatoren oder frei durch Luftdichteunterschiede

Strahlung



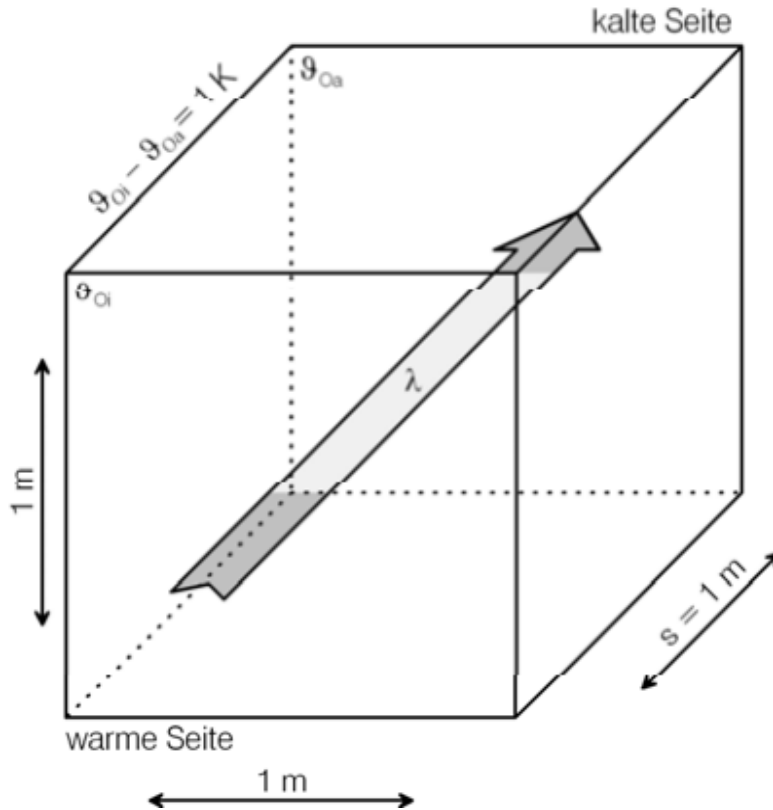
- Energieübertragung durch el.magn. Strahlung
- Stoffunabhängig, auch im Vakuum möglich
- Strahlung wird reflektiert, absorbiert, transmittiert:
$$\rho + \alpha + \tau = 1$$
- Absorbierte Energie wird wieder abgestrahlt (Kirchhoff):

$$\alpha = \varepsilon$$

Typische Emissionsgrade

Oberfläche	Emissionsgrad ε [-]
Aluminium, walzblank	0,05
Beton	0,93
Dachpappe	0,93
Glas	0,90
Heizkörperlack	0,93
Holz	0,94
Lehm, nass	0,98
Putz, Mörtel	0,93
Sand, trocken	0,88
Silber, poliert	0,03
Stahl, frisch gewalzt	0,24
Stahl, oxidiert	0,80
Ziegelstein, rot	0,93

Wärmeleitfähigkeit /-leitzahl λ in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$



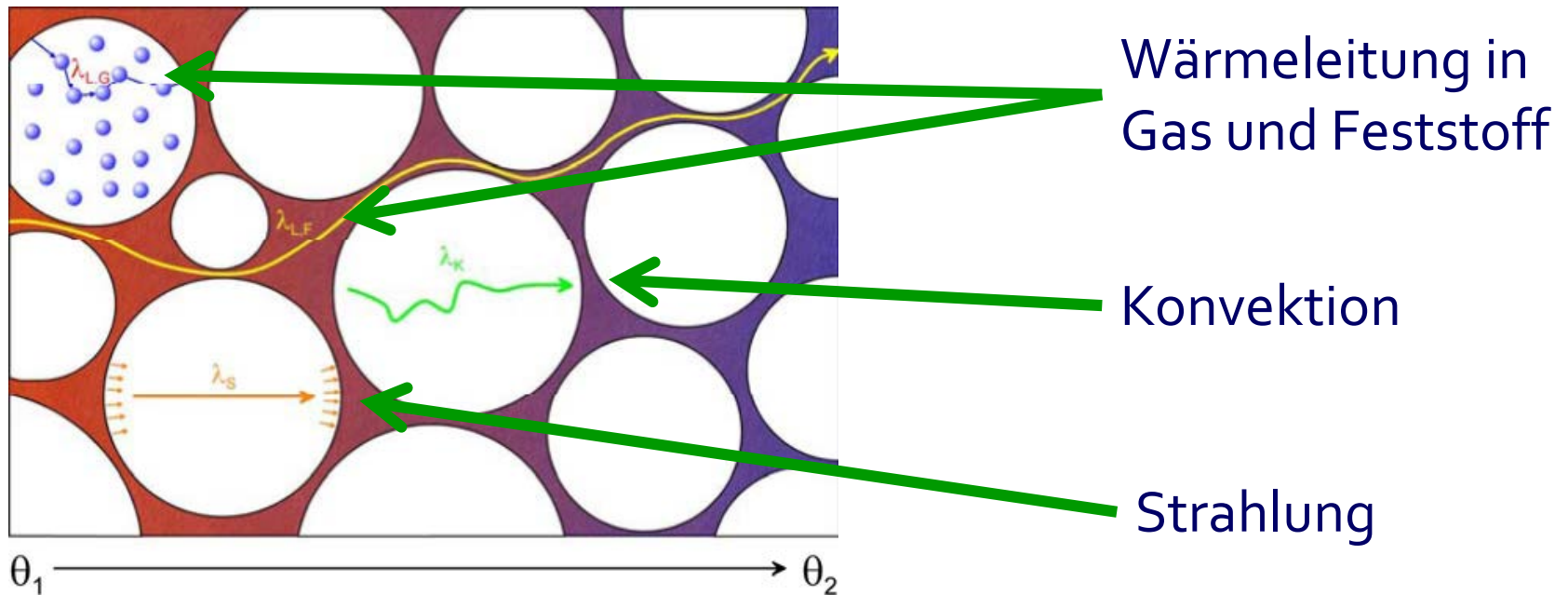
$$Q = \frac{\lambda}{d} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \cdot A \cdot t$$

Praktische Anwendung
mit:

$d=1\text{m}$, $\Delta T=1\text{K}$, $A=1\text{m}^2$,
 $t=1\text{h}$

Wärmeleitfähigkeit in porösen Stoffen

unter Beteiligung aller Wärmetransportmechanismen



$$\lambda_{ges} \approx \lambda_{L,K} + \lambda_{L,F} + \lambda_K + \lambda_S$$

Wärmeleitfähigkeit: typische Werte

Baustoff	Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K)
Kupfer	380
Aluminium	160
Stahl	50
Edelstahl	17
Stahlbeton	2,3
Zementestrich	1,4
Kalkzementputz	1,0
Kalkgipsputz	0,7
Mauersteine	0,07 bis 1,1
Porenbeton	0,10 bis 0,30
Nadelholz	0,13
Luft	0,025
Wärmedämmstoffe	0,02 bis 0,10
Vakuumdämmung	0,0034 bis 0,011

Weitere Beispiele: Wikipedia

Wärmeübergang an Grenzflächen

- Konvektion und Strahlung als relevante Mechanismen
- Wärmeübergangskoeffizienten h_c, h_r in $W/(m^2 \cdot K)$
- Zusammenfassung in Wärmeübergangswiderstand:

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r}$$

- Typische Werte
außen:

innen, Wärmestrom aufwärts:

$$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot K/W$$

innen, Wärmestrom horizontal:

$$R_{si} = 0,10 \text{ m}^2 \cdot K/W$$

innen, Wärmestrom abwärts:

$$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot K/W$$

$$R_{si} = 0,17 \text{ m}^2 \cdot K/W$$

Wärmetransport in Bauteilen

Wärmedurchlasswiderstand

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

mit: d Schichtdicke in m
 λ Wärmeleitzahl in W/(mK)

$$[R] = \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Wärmedurchlasswiderstand ruhender Luftschichten

	1	2	3	4
1	Dicke der Luftschicht [mm]	Richtung des Wärmestroms		
2		aufwärts	horizontal ³⁾	abwärts
3	0	0,00	0,00	0,00
4	5	0,11	0,11	0,11
5	7	0,13	0,13	0,13
6	10	0,15	0,15	0,15
7	15	0,16	0,17	0,17
8	25	0,16	0,18	0,19
9	50	0,16	0,18	0,21
10	100	0,16	0,18	0,22
11	300	0,16	0,18	0,23

¹⁾ Zwischenwerte können geradlinig interpolieren werden

²⁾ Die Tabellenwerte gelten für Luftschichten ($d \leq 300$ mm) mit einer Dicke (in Wärmestromrichtung) von weniger als dem 0,1-fachen einer der beiden anderen Ausdehnungen

³⁾ Gilt für Richtungen des Wärmestroms $\pm 30^\circ$ zur horizontalen Ebene

Wärmedurchgangswiderstand

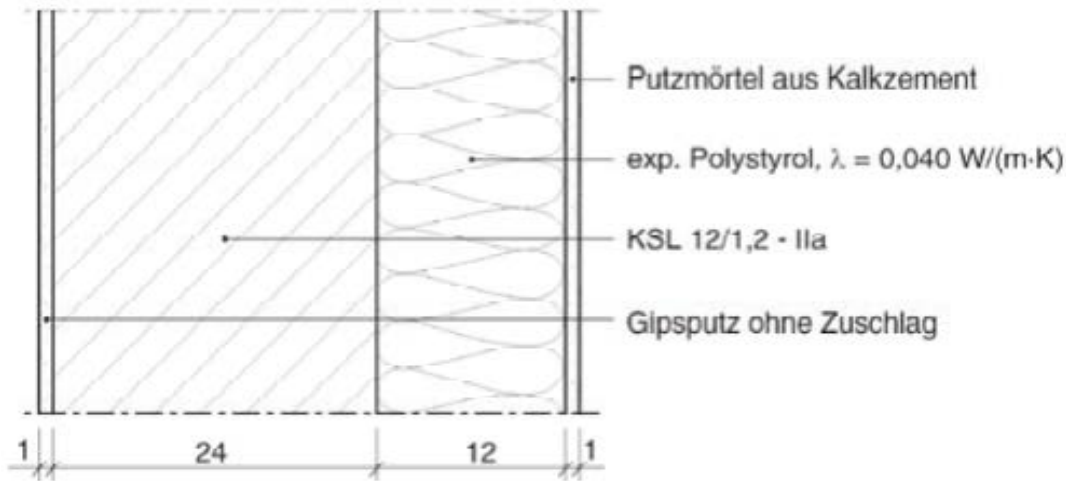
Zusammenfassung der Übergangs- und Durchlasswiderstände:

$$R_T = R_{si} + R + R_{se}$$

Für Materialien mit n Schichten:

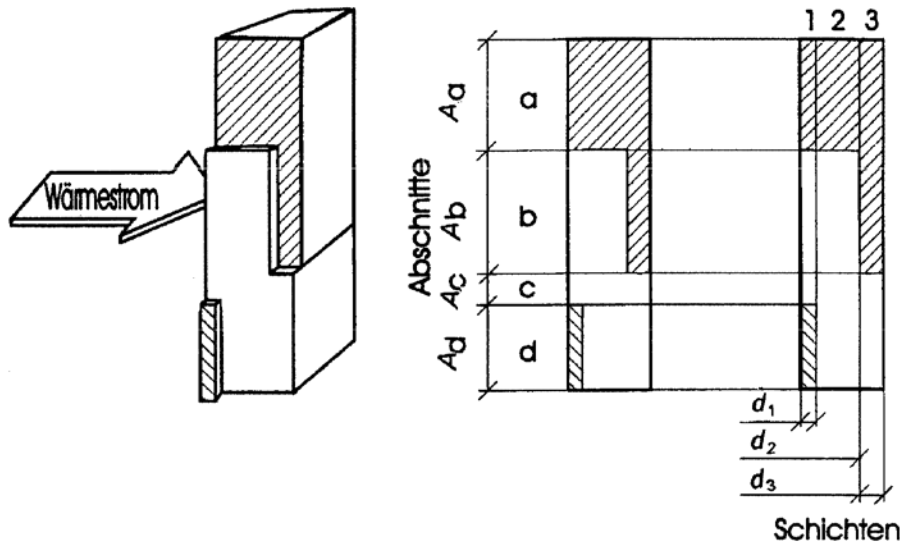
$$R_T = R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se}$$

Wärmedurchgangswiderstand: Beispiel



	1	2	3	4
1	Schicht	Schichtdicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Widerstand R bzw. R_s [m ² ·K/W]
2	Wärmeübergangswiderstand innen	-	-	0,13
3	Gipsputz ohne Zuschlag	0,01	0,51	0,020
4	KSL 12/1,2 – IIa	0,24	0,56	0,429
5	exp. Polystyrol	0,12	0,04	3,000
6	Putzmörtel aus Kalkzement	0,01	1,00	0,010
7	Wärmeübergangswiderstand außen	-	-	0,04
$R_T =$				3,63

Wärmedurchangswiderstand: inhomogen



Bei inhomogen
aufgebauten
Anordnungen:
Näherungsverfahren
unter Berücksichtigung
von Abschnittbreiten und
Schichtdicken
(hier nicht weiter
behandelt)

Wärmedurchgangskoeffizient U

$$U = \frac{1}{R_T} \quad [U] = W / m^2 \cdot K$$

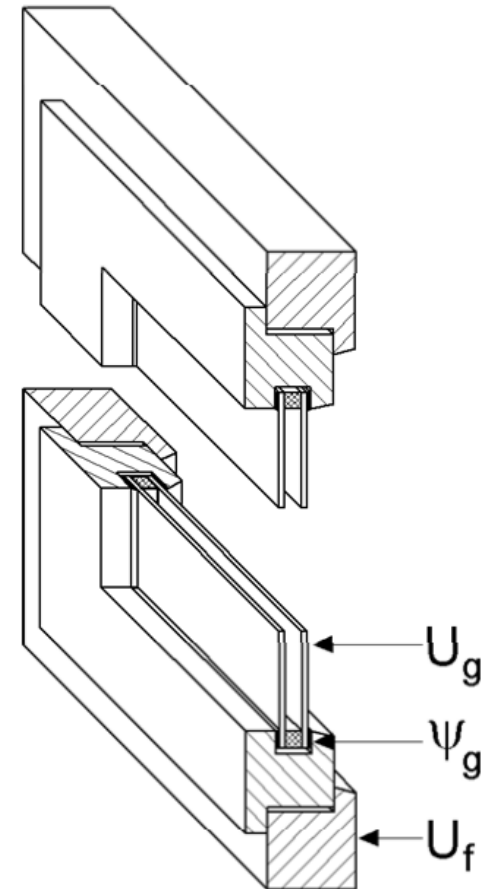
Speziell für Fenster:

$$U_w = \frac{\sum A_g \cdot U_g + \sum A_f \cdot U_f + \sum \ell_g \cdot \psi_g}{\sum (A_g + A_f)}$$

„f“ = „Frame“ / Fensterrahmen

„g“ = Glas

„w“ = „Window“ / gesamtes Fenster



Zuschläge zu U

$$U = \frac{1}{R_T} + \Delta U$$

$$\text{mit } \Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r$$

- Für Luftspalte in der Dämmung („g“)
- Befestigungselemente, die die Dämmschicht durchdringen („f“)
- Feuchtigkeitseintrag auf Dächern mit außenliegender Dämmung („r“)

Zusammenfassung

Wärmedurchgangswiderstand

$$R_u = \frac{1}{U}$$

$$R_u = R_i + R + R_e$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{h_i}$$

R_u gesamter Wärmedurchgangswiderstand in $[m^2 K/W]$

R_i Wärmeübergangswiderstand auf der Innenseite des Bauteils in $[m^2 K/W]$

R Wärmedurchlaßwiderstand in $[m^2 K/W]$

R_e Wärmeübergangswiderstand auf der Außenseite des Bauteils in $[m^2 K/W]$

U Wärmedurchgangskoeffizient in $[W/(m^2 K)]$

h_i Wärmeübergangskoeffizient Innen in $[W/(m^2 K)]$

h_e Wärmeübergangskoeffizient Außen in $[W/(m^2 K)]$

Λ Wärmedurchlaßkoeffizient in $[W/(m^2 K)]$

Temperaturverteilungen

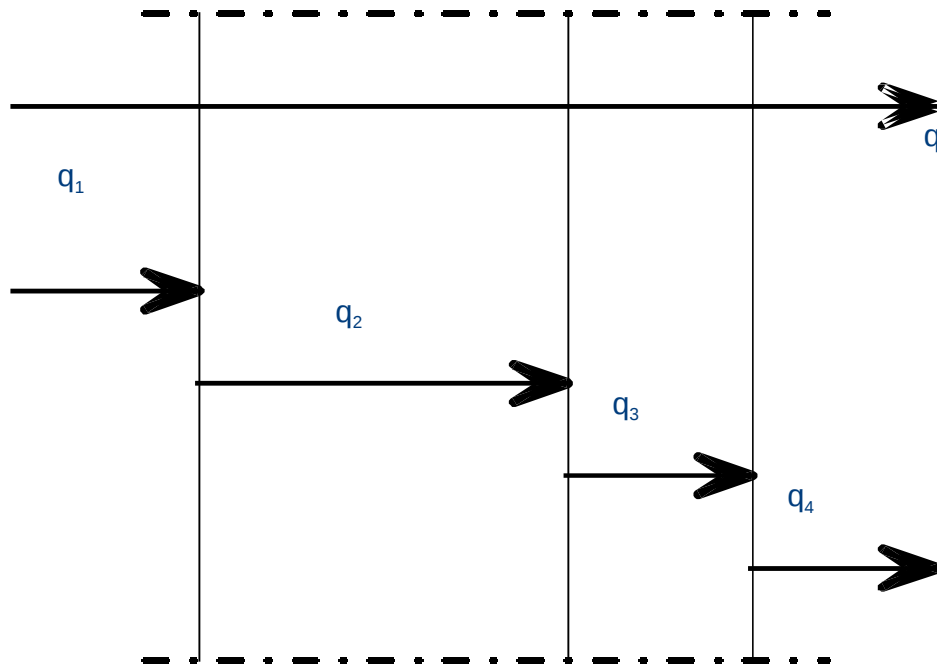
Kenntnis wichtig für die
Beurteilung von:

- Gefahr von Tauwasser- / Schimmelpilzbildung?
- Temperaturbedingte Verformungen?

Annahmen für die Rechnung:

- Einfache Querschnitte
- Stationäre Verhältnisse
- Keine Wärmequellen/-senken

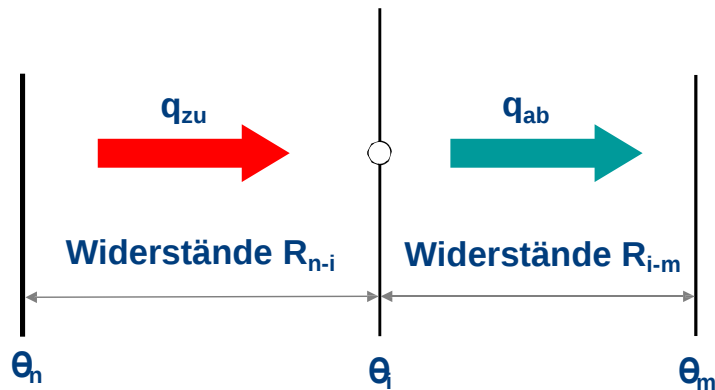
-> Konstante Wärmestromdichte



$$q_1 = q_2 = \dots = \text{const.}$$

Temperaturbestimmung aus Widerstandsverhältnissen

Ähnlich Spannungsteiler der Elektrotechnik:



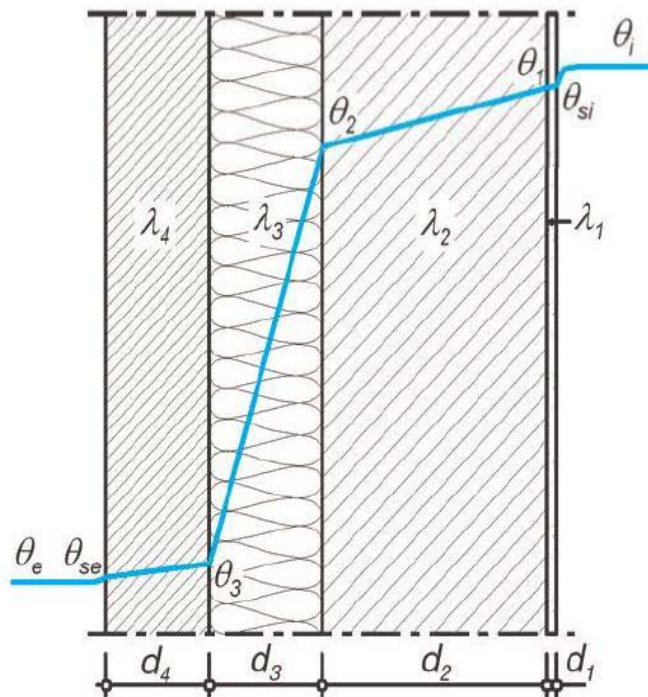
$$q_{zu} = q_{ab}$$

$$q_{zu} = \frac{1}{\sum_{n \rightarrow i} R_{n \rightarrow i}} (\theta_n - \theta_i)$$

$$q_{ab} = \frac{1}{\sum_{i \rightarrow m} R_{i \rightarrow m}} (\theta_i - \theta_m)$$

-> Auflösen nach θ_i

Beispiel: Außenwand zweischalig mit Kerndämmung



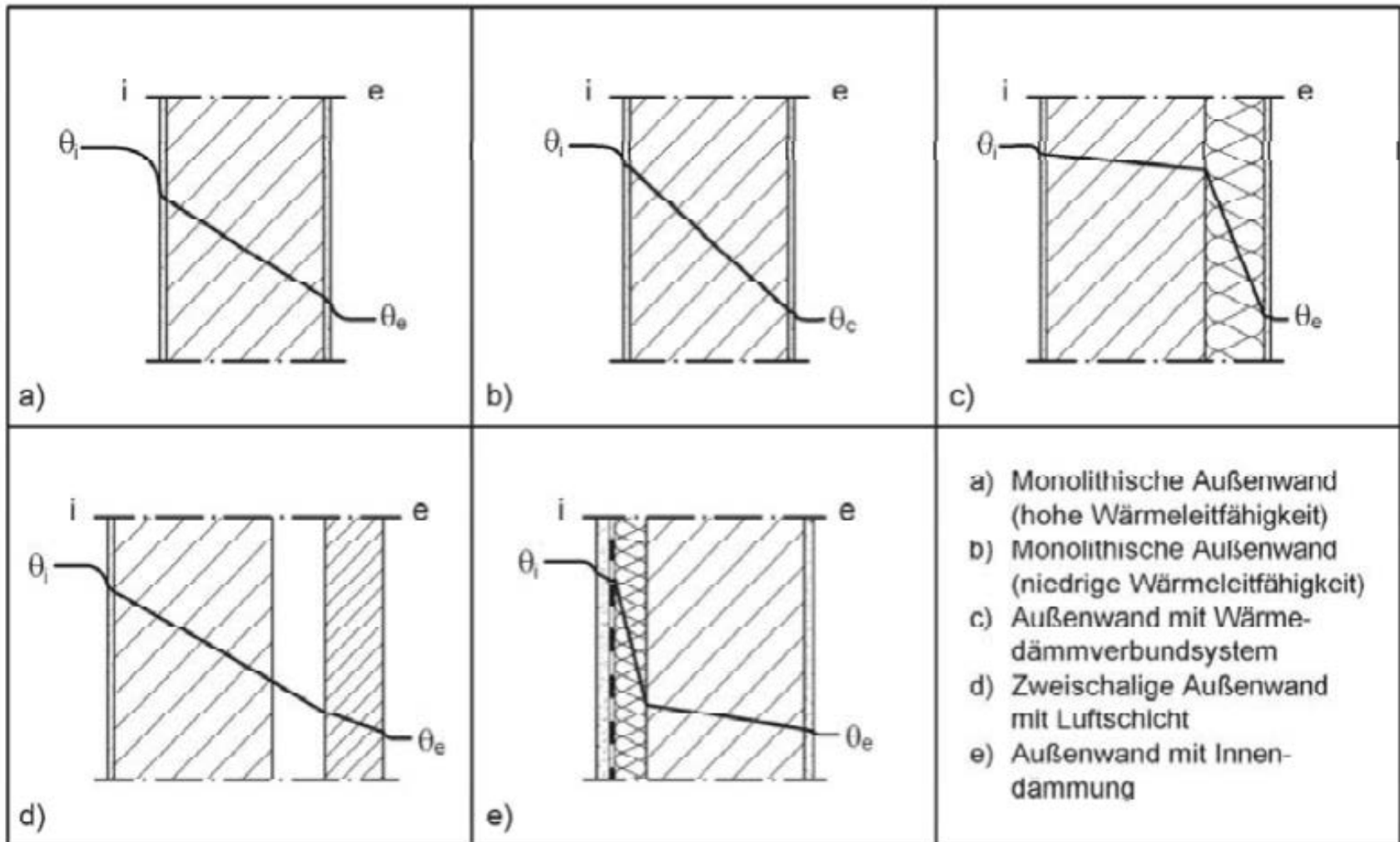
$$\left. \begin{aligned} q &= h_i \cdot (\theta_i - \theta_{si}) \\ q &= \frac{\lambda_1}{d_1} \cdot (\theta_{si} - \theta_1) \\ &\vdots \\ q &= \frac{\lambda_4}{d_4} \cdot (\theta_3 - \theta_{se}) \\ q &= h_e \cdot (\theta_{se} - \theta_e) \end{aligned} \right\}$$

Gleichsetzen mit

$$q = U \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_{si} &= \theta_i - R_{si} \cdot q \\ \theta_1 &= \theta_{si} - R_1 \cdot q \\ &\vdots \\ \theta_{se} &= \theta_3 - R_4 \cdot q \\ \theta_e &= \theta_{se} - R_{se} \cdot q \end{aligned} \right.$$

Weitere Beispiele



Bauteil- Nummer	Bauteil-Beschreibung	Wärmedurchlasswiderstand R des Bauteils ^b in m ² K/W
1	Wände beheizter Räume : gegen Außenluft, Erdreich, Tiefgaragen, nicht beheizte Räume (auch nicht beheizte Dachräume oder nicht beheizte Kellerräume außerhalb der wärmeübertragenden Umfassungsfläche)	1,20 ^c
2	Dachschrägen beheizter Räume gegen Außenluft	1,20
3	Decken beheizter Räume nach oben und Flachdächer	
3.1	gegen Außenluft	1,20
3.2	zu belüfteten Räumen zwischen Dachschrägen und Abseitenwänden bei ausgebauten Dachräumen	0,90
3.3	zu nichtbeheizten Räumen, zu bekriechbaren oder noch niedrigeren Räumen	
3.4	zu Räumen zwischengedämmten Dachschrägen und Abseitenwänden bei ausgebauten Dachräumen	0,35

Bauteil-Nummer	Bauteil-Beschreibung	Wärmedurchlasswiderstand R des Bauteils ^b in m ² K/W
4	Decken beheizter Räume nach unten	
4.1 ^a	gegen Außenluft, gegen Tiefgarage, gegen Garagen (auch beheizte) Durchfahrten (auch verschließbare) und belüftete Kriechkeller	1,75
4.2	gegen nicht beheizten Kellerraum	0,90
4.3	unterer Abschluss (z.B. Sohlplatte) von Aufenthaltsräumen unmittelbar an das Erdreich grenzend bis zu einer Raumtiefe von 5 m	
4.4	über einem nicht belüfteten Hohlraum, z.B. Kriechkeller, an das Erdreich grenzend	
5	Bauteile an Treppenräumen	
5.1	Wände zwischen beheiztem Raum und direkt beheiztem Treppenraum, Wände zwischen beheiztem Raum und indirekt beheiztem Treppenraum, sofern die anderen Bauteile des Treppenraums die Anforderungen der Tabelle erfüllen	0,07
5.2	Wände zwischen beheiztem Raum und indirekt beheiztem Treppenraum, wenn nicht alle Bauteile des Treppenraums die Anforderungen der Tabelle erfüllen	0,25
5.3	oberer und unterer Abschluss eines beheizten oder indirekt beheizten Treppenraumes	wie Bauteile beheizter Räume

Mindestwärmeschutz schwere Bauteile: Zahlenwerte

Bauteil-Nummer	Bauteil-Beschreibung	Wärmedurchlasswiderstand R des Bauteils ^b in m ² K/W
6	Bauteile zwischen beheizten Räumen	
6.1	Wohnungs- und Gebäudetrennwände zwischen beheizten Räumen	0,07
6.2	Wohnungstrenndecken, Decken zwischen Räumen unterschiedlicher Nutzung	0,35
a Vermeidung von Fußkälte b bei erdberührten Bauteilen: konstruktiver Wärmedurchlasswiderstand c bei niedrig beheizten Räumen 0,55 m ² · K/W		

Mindestwärmeschutz leichte Bauteile: Zahlenwerte

(< 100 kg/m²)

Bauteil-Beschreibung		Wärmedurchlasswiderstand R in m ² K/W
ein- und mehrschalige Bauteile mit einer flächenbezogenen Masse unter 100 kg/m ²		1,75
Skelett-, Rahmen- und Holzständerbauweise; Pfosten-Riegel-Konstruktionen	im Gefachbereich	1,75
	als Mittelwert	1,00
Rollladenkästen	als Mittelwert	1,00
	für den Deckel	0,55
opake Ausfachung von transparenten und teiltransparenten Bauteilen(z.B. Vorhangfassaden, Pfosten-Riegel-Konstruktionen, Glasdächer, Fenster, Fenstertüren und Fensterwände ¹⁾)		1,20
Transparente Teile		mindestens Isolierglas oder 2 Glasscheiben
¹⁾ Der Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens muss kleiner als 2,9 W/(m ² K) sein		