
Bauphysik

Wärme T02: Transportmechanismen

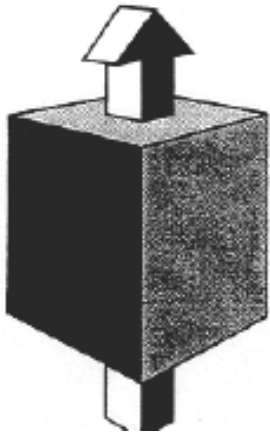
Prof. Dr.-Ing. Petra Rucker-Gramm

Vorlesungsunterlagen nur für studentische Zwecke. Eine Weitergabe oder Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur nach schriftlicher Genehmigung durch die Verfasserin erlaubt.

Wärmetransportmechanismen

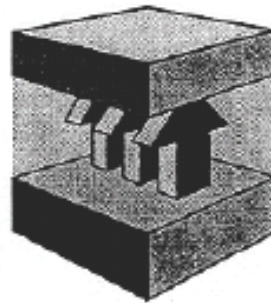
Welche Wärmeübertragungsphänomene gibt es?

Leitung



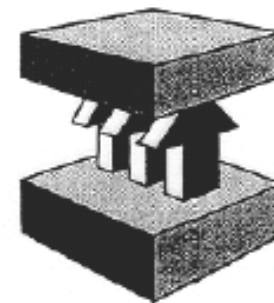
Innerhalb eines Materials
oder bei direktem Kontakt
zwischen zwei Körpern

Konvektion



Wärmeenergie wird durch
Strömen eines Mediums
mittransportiert

Strahlung



Ausstrahlung oder
Aufnahme elektromagn.
Strahlung

→ Im Festkörper dominiert die Wärmeleitung, während im Gasraum
Konvektion und Strahlung dominieren

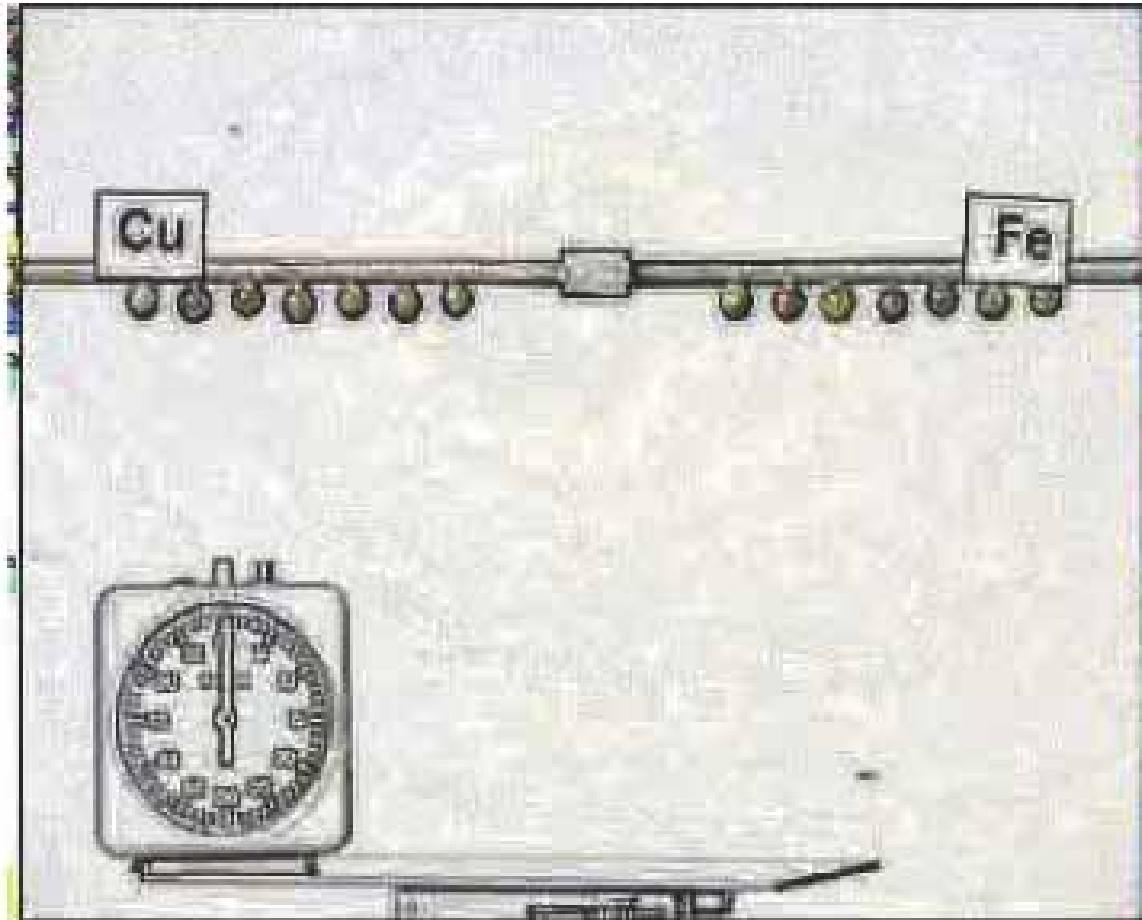
Wärmeleitung

Was passiert bei der Wärmeleitung?

- Ein Molekül wird durch Wärmezufuhr angeregt zu schwingen
- Je nach Art des Stoffes reagiert das benachbarte Molekül nach kürzerer oder längerer Zeit ebenfalls mit Schwingungen
- Diese Weiterleitung der Schwingung ist ein Transport von Wärmeenergie
- D.h. Wärme wird innerhalb eines Stoffes von Teilchen fortgeleitet, ohne dass die Teilchen selbst transportiert werden

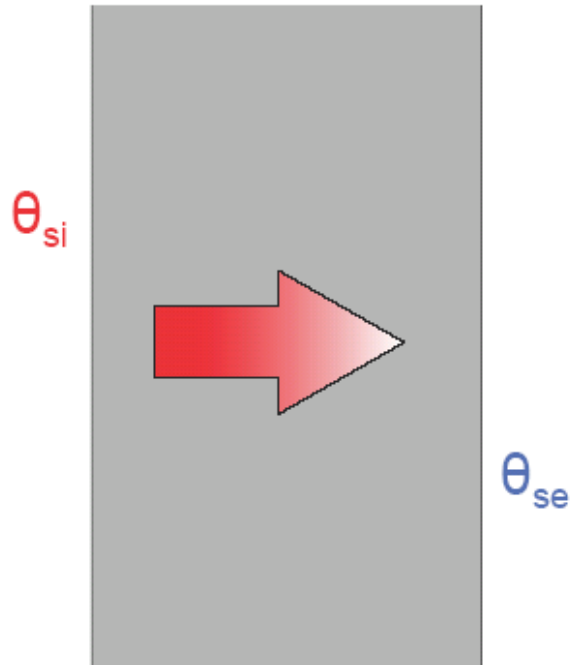
Wärmeleitung

Film



Wärmeleitung

Wärmestrom durch das Bauteil infolge Wärmeleitung



θ_s Oberflächentemperaturen
innen (i), außen (e)

$$\dot{Q} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot A \cdot (\theta_{si} - \theta_{se})$$

- $\theta_{si} > \theta_{se}$, Transport der Wärme von innen nach außen
- θ_{si} und θ_{se} konstant : stationärer Wärmetransport, d.h. es ließt je Zeiteinheit und an jedem Ort die gleiche Wärmemenge

Wärmeleitung

Einflussgrößen auf den Wärmestrom

$$\dot{Q} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot A \cdot (\theta_{si} - \theta_{se})$$

- Temperatur
- durchströmte Fläche
- Bauteildicke
- Wärmeleitfähigkeit

Wärmeleitung

Wärmeleitfähigkeit λ

$$\dot{Q} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot A \cdot (\theta_{si} - \theta_{se})$$

- Stoffeigenschaft, abhängig von Rohdichte, Porenform/-größe, mineralischer Struktur und Feuchte
- Wärmeenergie, die bei einer Temperaturdifferenz von 1K je Sekunde durch 1m² einer 1m dicken Schicht fließt
→ Einheit W/(m·K)

Wärmeleitung

$$G \propto \frac{W}{(K \cdot m)}$$

Wärmeleitfähigkeit λ

Alu 220

Beton 2,1

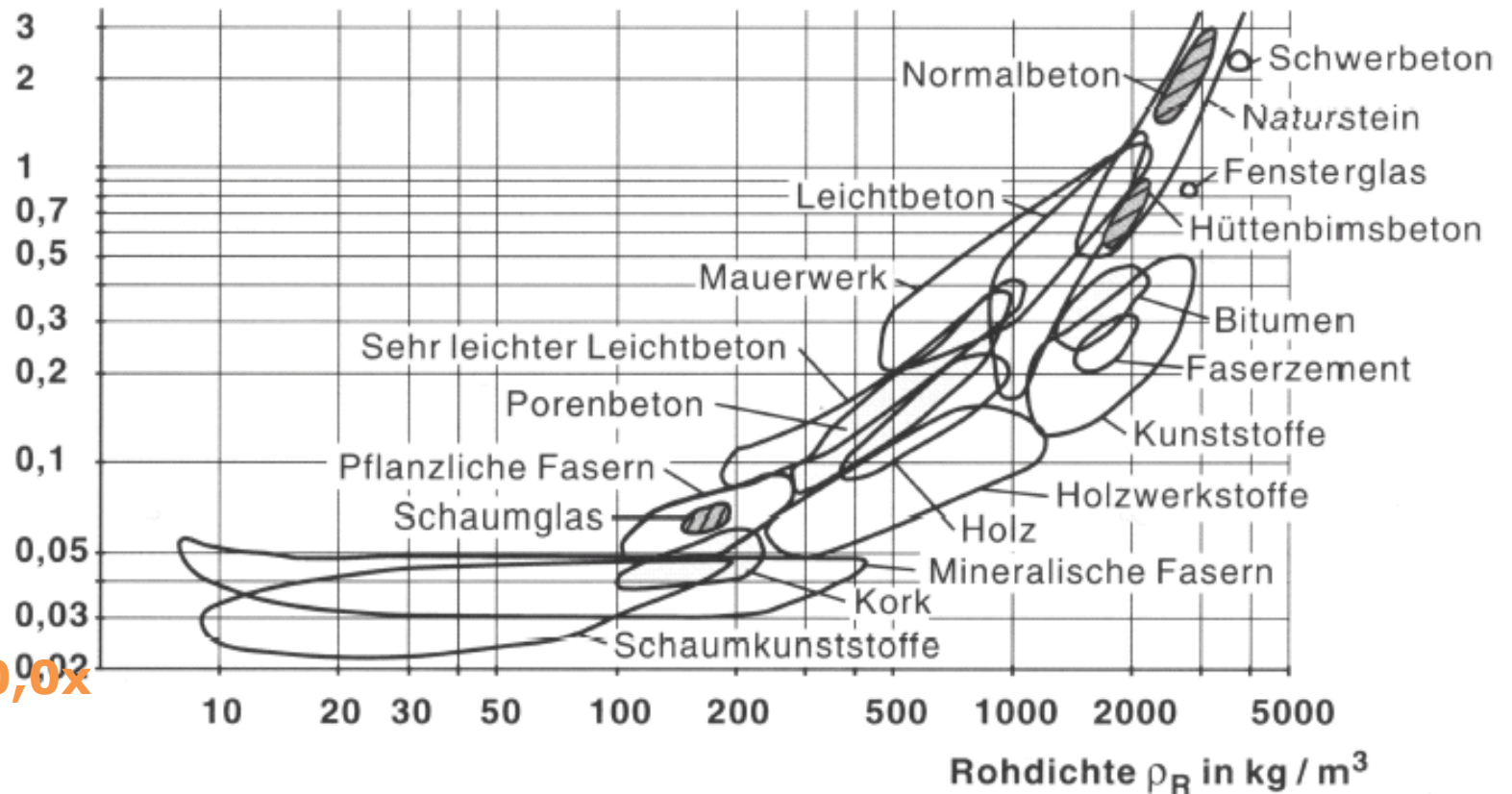
Wasser 0,6

Holz 0,1

Luft 0,03

Dämmung 0,0x

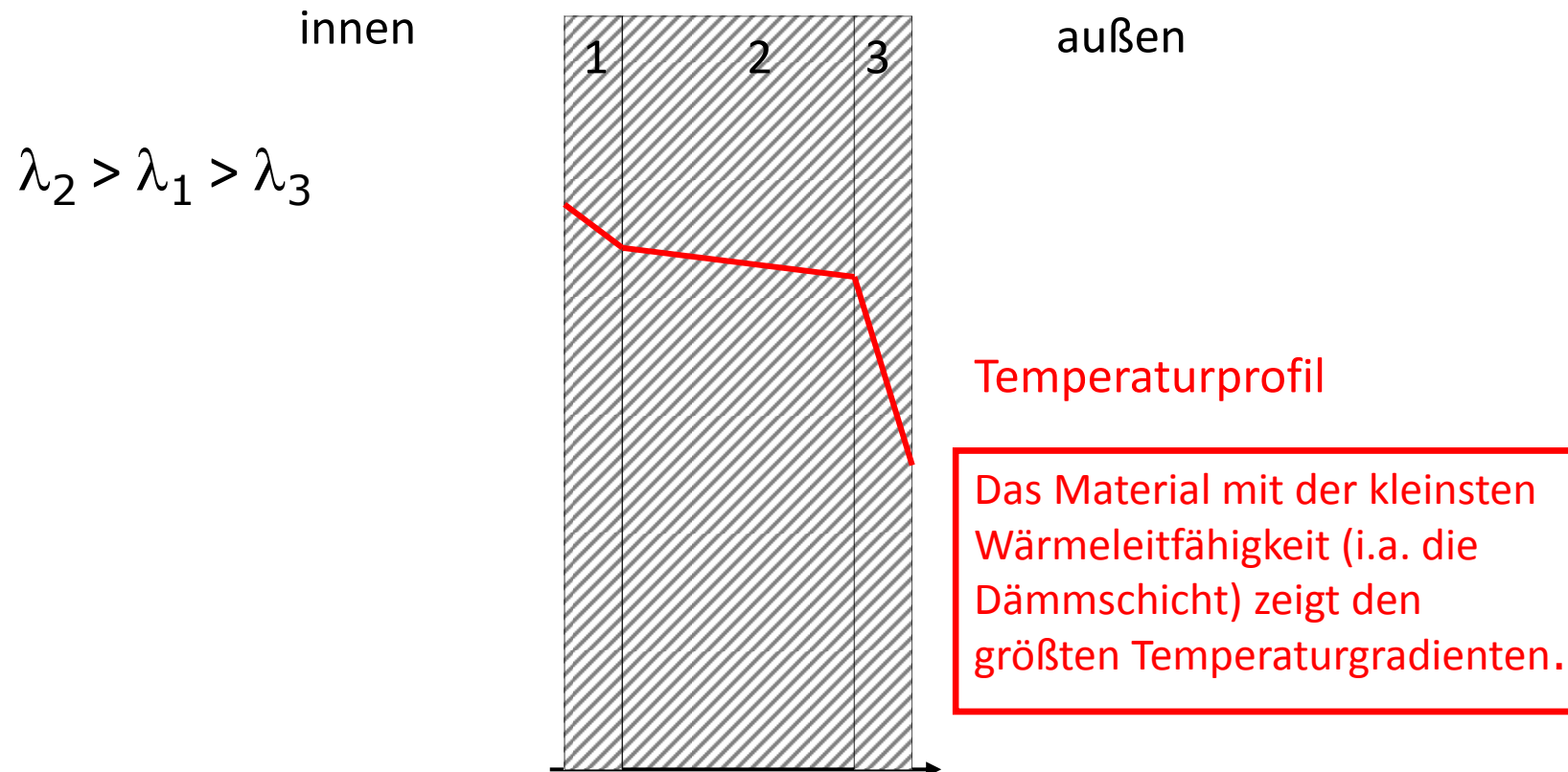
Wärmeleitfähigkeit λ in $W / (K \cdot m)$



Wärmeleitung

Wärmeleitfähigkeit λ und Temperaturgradienten

Gegeben seien die Wärmeleitfähigkeiten der Materialschichten eines Bauteils. Zeichnen Sie qualitativ einen möglichen Verlauf der Temperatur unter stationären Bedingungen.



Wärmeleitung

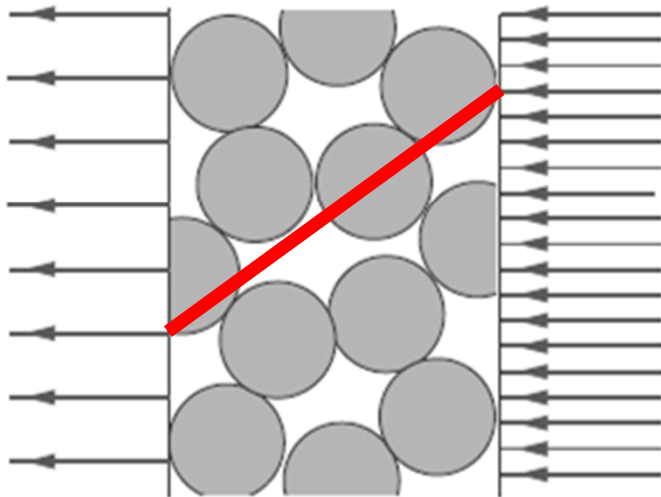
Wärmeleitfähigkeit λ und Feuchtegehalt

Luft $\lambda = 0,026$

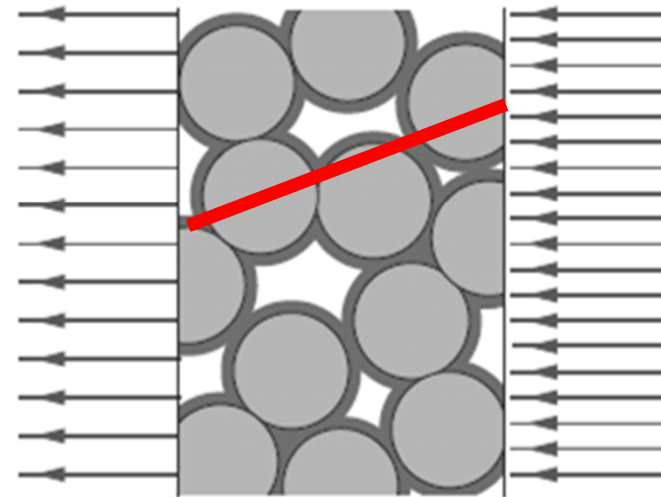
Wasser $\lambda = 0,60$

 $\times 23$

trockener Stoff



feuchter Stoff



Frage: Wo ist der steilere Temperaturgradient zu erwarten?

Wärmeleitung

Wärmeleitfähigkeit λ und Temperaturgradient - Wie war das?

Holzwand



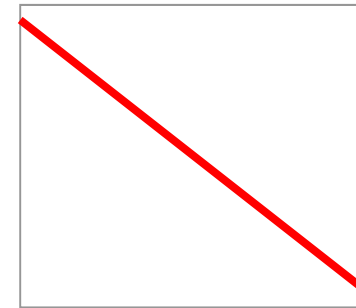
λ ca. 0,1

Betonwand

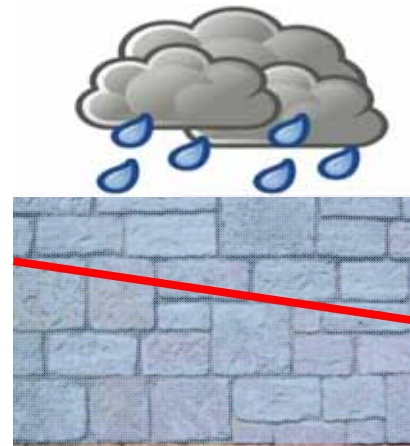


λ ca. 2,1

Luftschicht



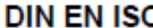
λ ca. 0,03



weil $\lambda_{\text{Luft}} < \lambda_{\text{Wasser}}$

Wärmeleitung

Wärmeleitfähigkeit λ – Materialkennwerte nach Norm

DEUTSCHE NORM		März 2017
	DIN 4108-4	
ICS 91.120.10	Ersatz für DIN 4108-4:2013-02	
Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte		
Thermal insulation and energy economy in buildings – Part 4: Hygrothermal design values		
Isolation thermique et économie d'énergie en bâtim Partie 4: Valeurs de calcul hygrothermiques		
		

DEUTSCHE NORM		Mai 2010
	DIN EN ISO 10456	DIN
ICS 91.100.01; 91.120.10	Ersatz für DIN EN ISO 10456:2008-04	
Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte (ISO 10456:2007 + Cor. 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 10456:2007 + AC:2009		

Wärmeleitfähigkeit λ – Materialkennwerte nach Norm

DIN EN ISO 10456:2010-05
EN ISO 10456:2007 + AC:2009

Tabelle 3 — Wärmeschutztechnische Bemessungswerte für Baustoffe, die gewöhnlich bei Gebäuden zur Anwendung kommen

Stoffgruppe oder Anwendung	Rohdichte ρ kg/m ³	Bemessungs- wärmeleit- fähigkeit λ W/(m · K)	Spezifische Wärme- speicher- kapazität c_p J/(kg · K)	Wasserdampf- diffusionswider- standszahl μ	
				trocken	feucht
Asphalt	2 100	0,70	1 000	50 000	50 000
Bitumen als Stoff	1 050	0,17	1 000	50 000	50 000
Membran/Bahn	1 100	0,23	1 000	50 000	50 000
Beton ^a					
mittlere Rohdichte	1 900	1,15	1 000	100	60
	2 000	1,35	1 000	100	60
	2 200	1,65	1 000	120	70
hohe Rohdichte	2 400	2,00	1 000	130	80
armiert (mit 1 % Stahl)	2 300	2,3	1 000	130	80
armiert (mit 2 % Stahl)	2 400	2,5	1 000	130	80
Fußbodenbeläge					
Gummi	1200	0,17	1 400	10 000	10 000
Kunststoff	1700	0,25	1 400	10 000	10 000
Unterlagen, poröser Gummi oder Kunststoff	270	0,10	1 400	10 000	10 000
Filzunterlage	120	0,05	1 300	20	15
Wollunterlage	200	0,06	1 300	20	15
Korkunterlage	< 200	0,05	1 500	20	10
Korkfliesen	> 400	0,065	1 500	40	20
Teppich/Teppichböden	200	0,06	1 300	5	5
Linoleum	1 200	0,17	1 400	1 000	800

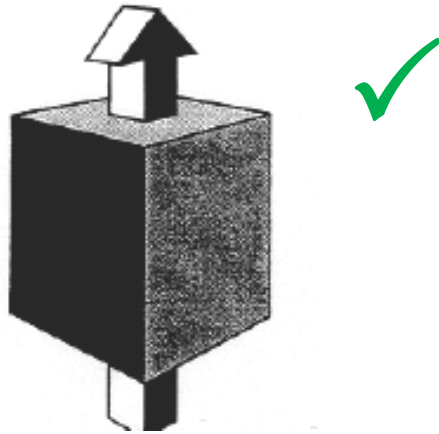
Tabelle 1 (fortgesetzt)

	Rohdichte ^{a,b} ρ kg/m ³	Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ W/(m · K)	Richtwert der Wasserdampf- Diffusions- widerstands- zahl ^c μ
	Siehe DIN EN ISO 10456		
lit EN 206-1 /erwendung je nach iz ^d	800	0,39	70/150
	900	0,44	
	1 000	0,49	
	1 100	0,55	
	1 200	0,62	
	1 300	0,70	
	1 400	0,79	
	1 500	0,89	
	1 600	1,0	
	1 800	1,15	
	2 000	1,35	
nach	350	0,11	5/10
	400	0,13	
	450	0,15	
	500	0,15	
	550	0,18	
	600	0,19	
	650	0,21	

Wärmetransportmechanismen

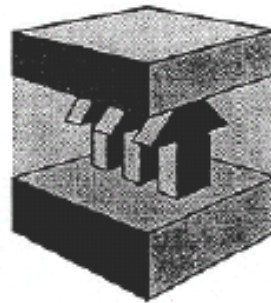
Welche Wärmeübertragungsphänomene gibt es?

Leitung



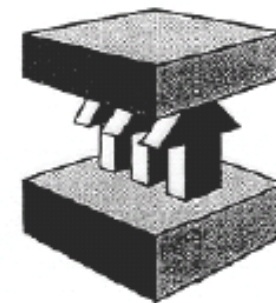
Innerhalb eines Materials
oder bei direktem Kontakt
zwischen zwei Körpern

Konvektion



Wärmeenergie wird durch
Strömen eines Mediums
mittransportiert

Strahlung



Ausstrahlung oder
Aufnahme elektromagn.
Strahlung

→ Im Festkörper dominiert die Wärmeleitung, während im Gasraum
Konvektion und Strahlung dominieren

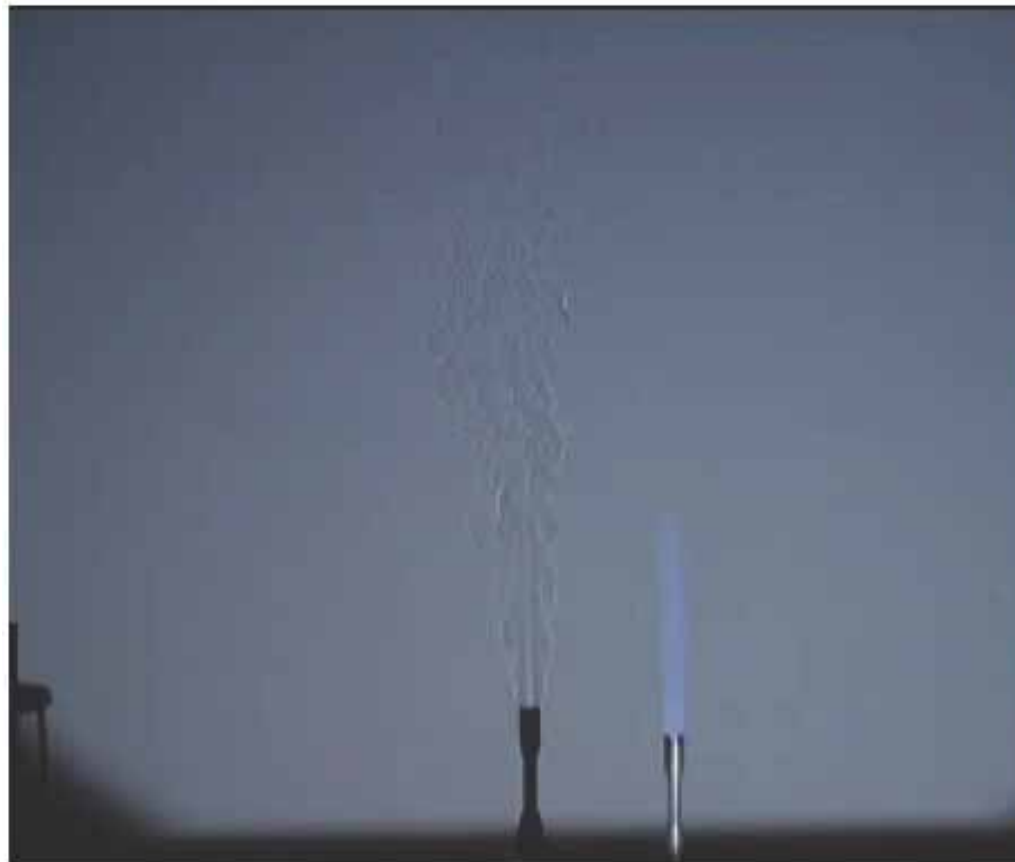
Wärmekonvektion

Wärmekonvektion = Wärmemitführung

Was passiert bei der Wärmekonvektion?

- Transport ist an die Bewegung eines gasförmigen oder flüssigen Mediums gebunden (z.B. Umgebungsluft oder Wasser)
- Durch die Bewegung des Mediums wird Wärme übertragen
z.B.: durch Rühren in einer Flüssigkeit
bei Luft in Folge von Durchzug
durch die Bewegung von Menschen
- Unterscheidung in freie Konvektion:
infolge von Dichteunterschieden von warmer und kalter Luft
- Und erzwungene Konvektion:
infolge von äußeren Kräften (Wind) und Ventilation

Film



Wärmekonvektion – ein kleiner Exkurs

Dichte Olivenöl rd. 910 kg/m^3



Dichte Essig $> 1000 \text{ kg/m}^3$

Dichte Olivenöl rd. 910 kg/m^3



Dichte Wasser rd. 1000 kg/m^3

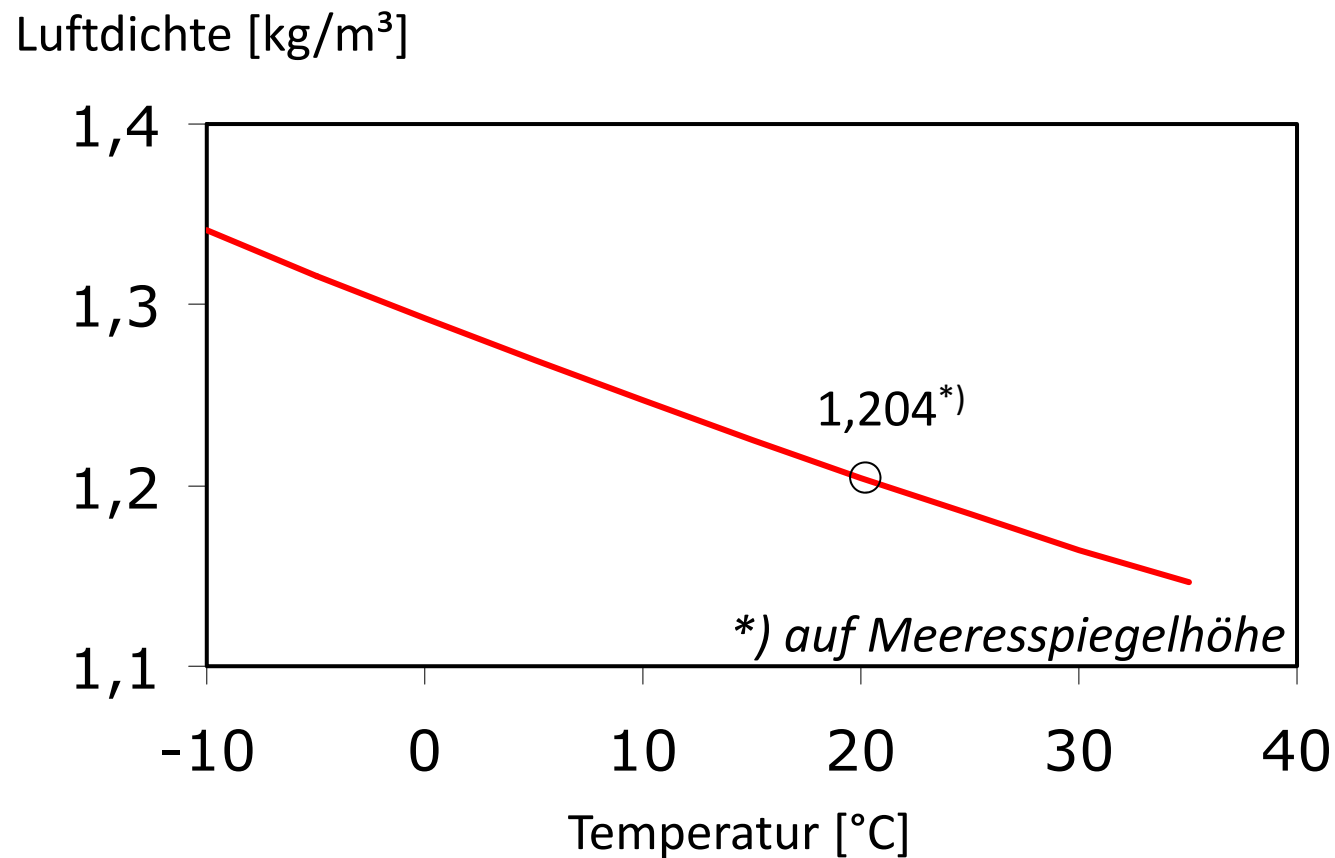
Dichte Holz rd. 500 kg/m^3



Dichte Wasser rd. 1000 kg/m^3

[www.fotoalbum.wdr.de]

Wärmekonvektion – ein kleiner Exkurs



kalte Luft höhere Dichte

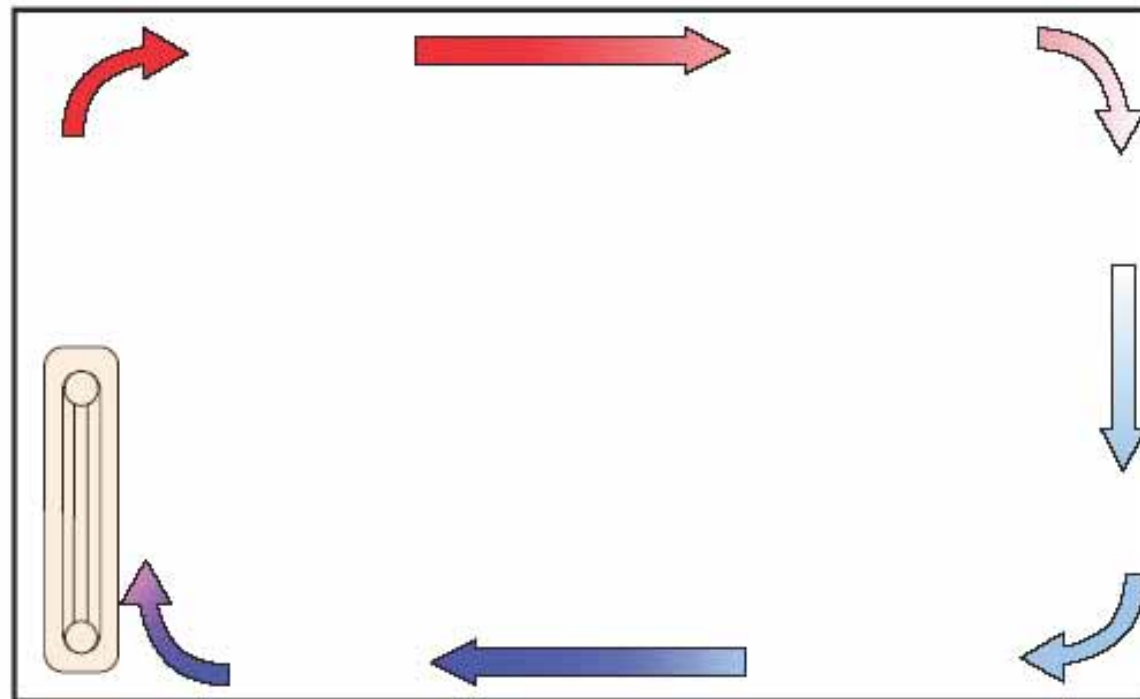
warme Luft geringere Dichte

→ freie Konvektion: bei Erwärmung steigt die Luft nach oben

Wärmekonvektion

freie Konvektion

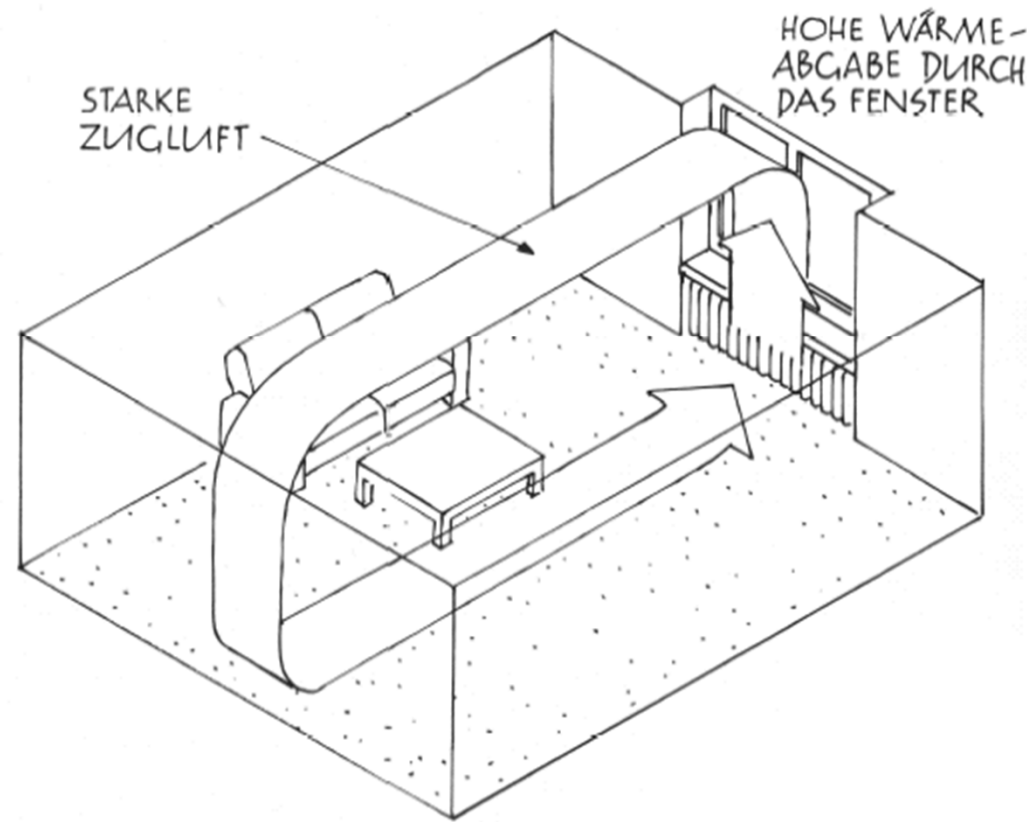
warme Luft
steigt
nach oben



Temperaturausgleich
in Richtung des
Temperaturgefälles

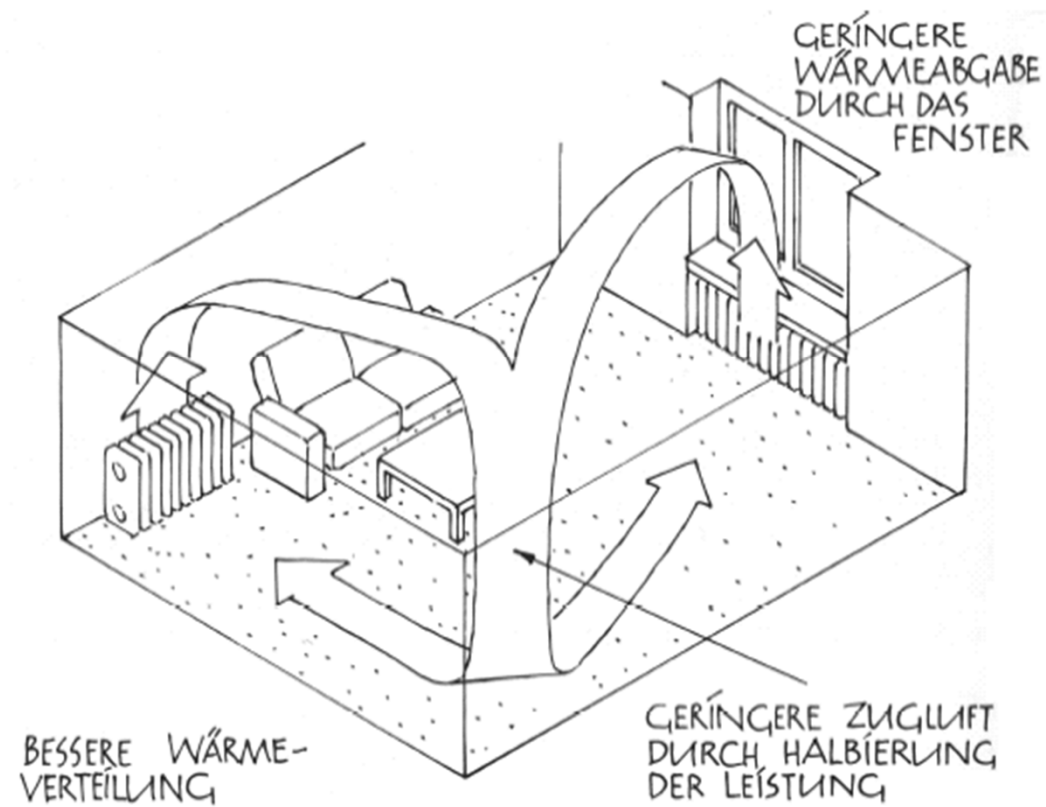
freie Konvektion

Luftbewegung bei üblicher Anordnung von Heizkörpern
(Haarich)



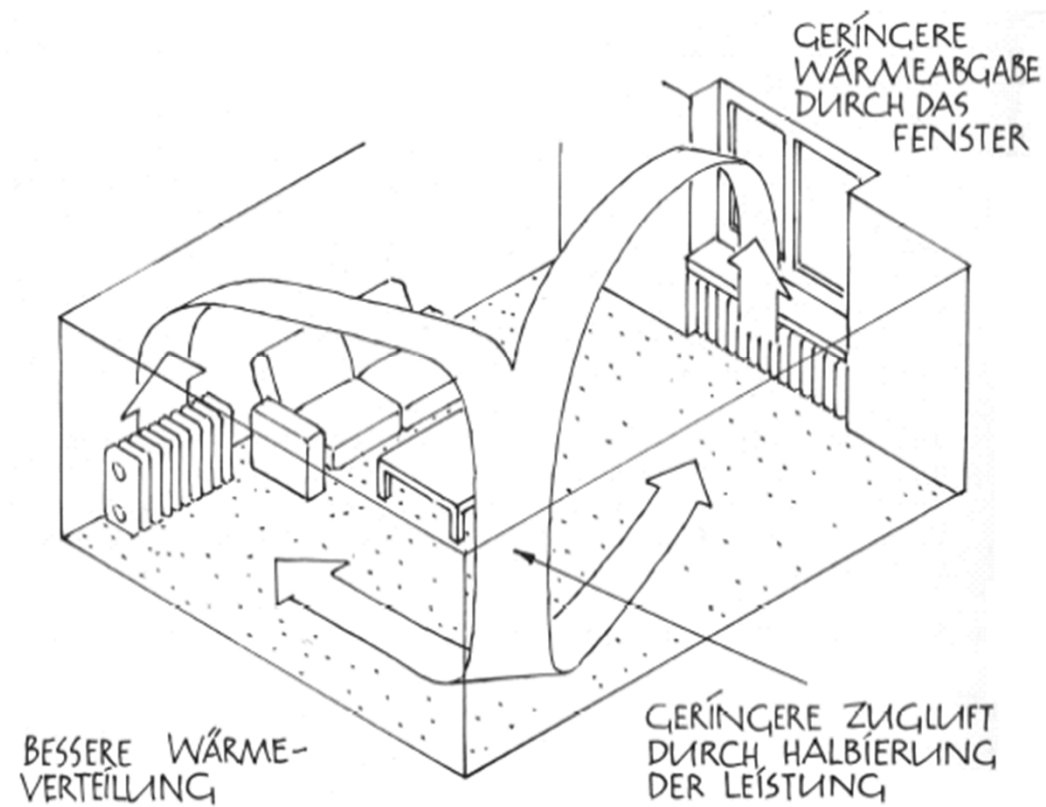
freie Konvektion

Empfehlung zur Anordnung von Heizkörpern nach Haarich

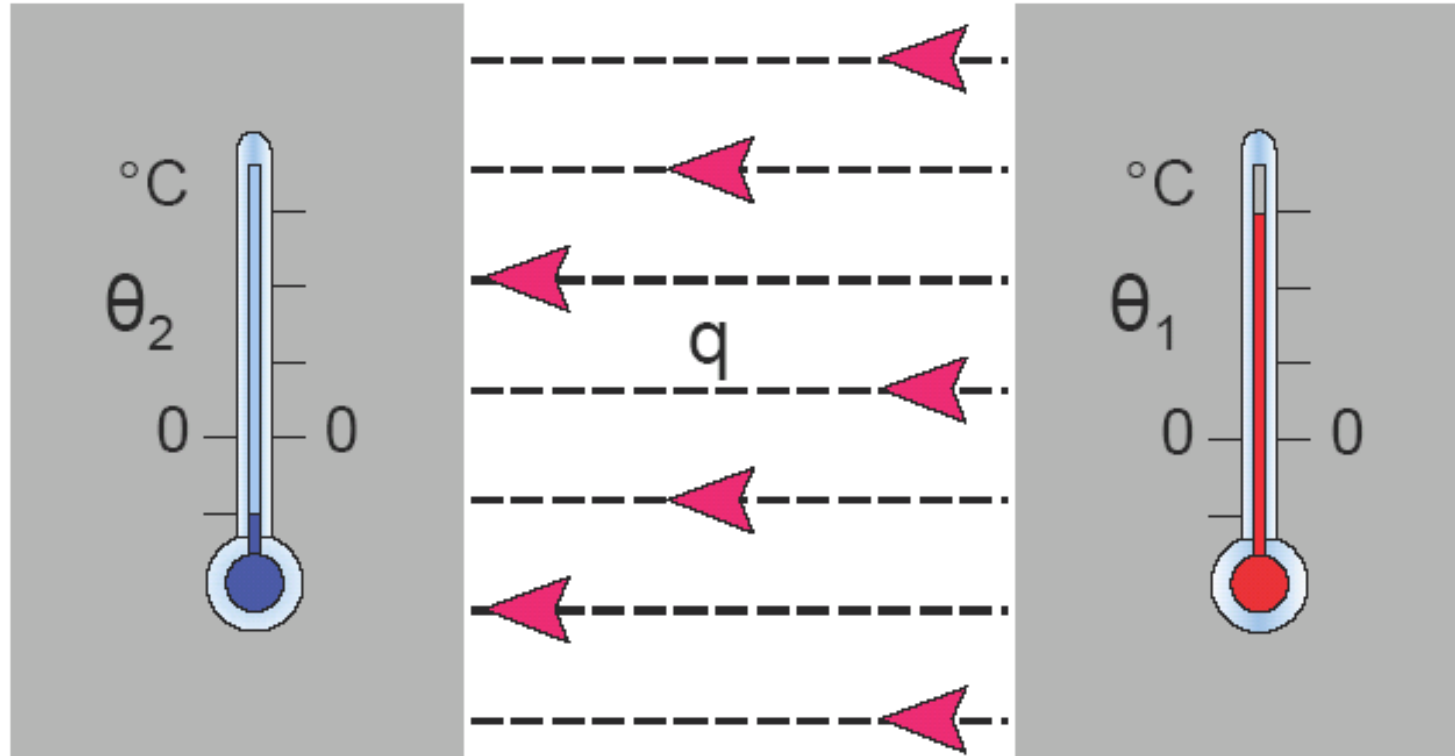


freie Konvektion

Empfehlung zur Anordnung von Heizkörpern nach Haarich



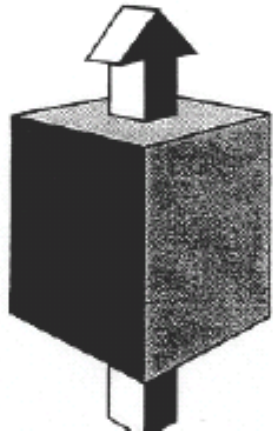
Wärmestrahlung



Wärmetransportmechanismen

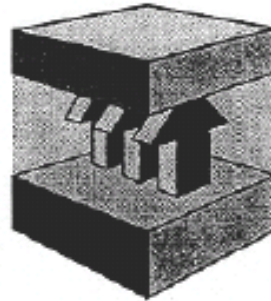
Welche Wärmeübertragungsphänomene gibt es?

Leitung



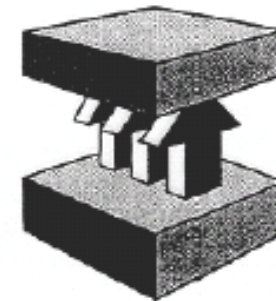
Innerhalb eines Materials
oder bei direktem Kontakt
zwischen zwei Körpern

Konvektion



Wärmeenergie wird durch
Strömen eines Mediums
mittransportiert

Strahlung



Ausstrahlung oder
Aufnahme elektromagn.
Strahlung

→ Im Festkörper dominiert die Wärmeleitung, während im Gasraum
Konvektion und Strahlung dominieren

Wärmestrahlung

Was passiert bei der Wärmestrahlung?

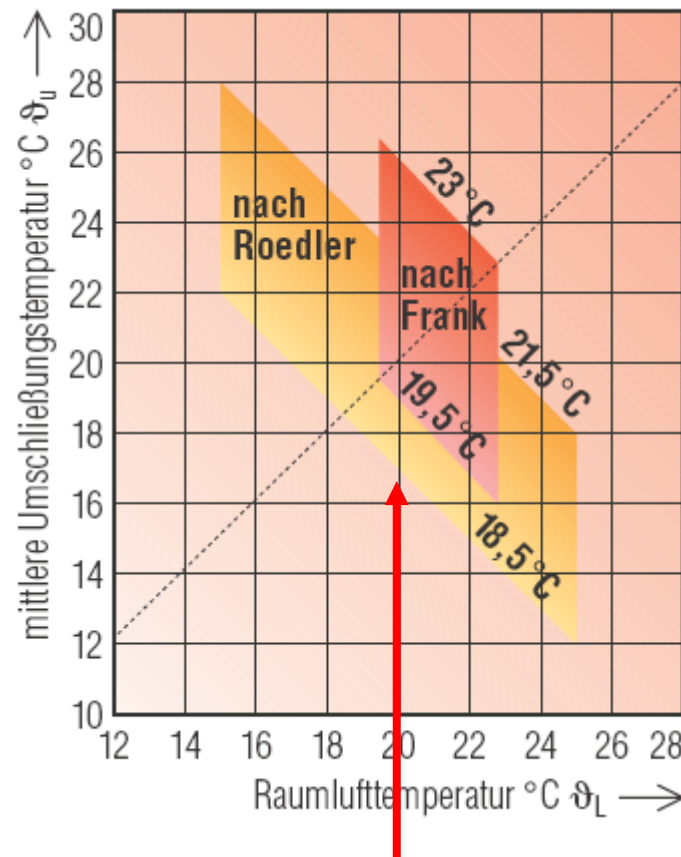
- ein Objekt gibt in Abhängigkeit von seiner Temperatur und Oberflächenbeschaffenheit elektromagnetische Strahlung ab
- Jeder Körper gibt Temperaturstrahlung ab (Emission) und nimmt aus der Umgebung Temperaturstrahlung auf (Absorption)
- Je höher die Temperatur, umso höher die Abstrahlung

- Strahlungsbilanz:

Ein Körper, der die gleiche Temperatur hat, wie seine Umgebung, gibt genauso viel Strahlung ab, wie er empfängt, d.h. die Temperatur bleibt gleich

Ist ein Körper wärmer als die Umgebung, gibt er mehr Strahlung ab als er von der Umgebung empfängt → Abkühlung

Wärmestrahlung



[ökologisches Bauen mit Ziegeln]

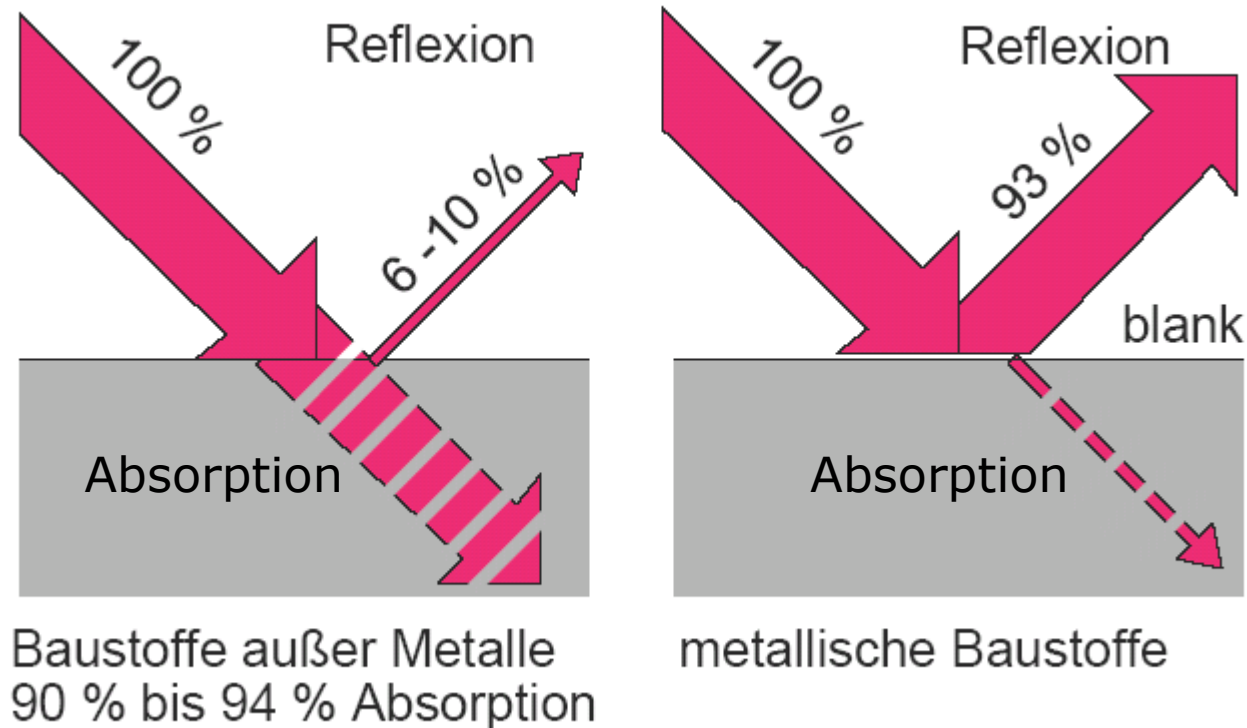
Wohlgefühl, wenn
Wandtemperatur > 17°C

Grund?

Je geringer die Wandtemperatur,
desto mehr Strahlung gibt der Mensch an diese ab
→ je geringer die Wandtemperatur, desto unangenehmer

Wärmestrahlung

- Wärmestrahlung kann durch strahlungsundurchlässige Stoffe unterbrochen werden (Baustoffe, Ausnahme z.B. Glas)



Spiegel?

Wärmestrahlung

Einfluss der Oberfläche auf das Absorptionsverhalten

Oberfläche

Anteil Absorption [%]

verputzte Oberflächen

heller Anstrich	40
gedeckter Anstrich	60
dunkler Anstrich	80

Dächer

Ziegelrot	50
dunkle Oberfläche	80
Metall	20
Bitumenpappe	40

Mauerwerk

Klinkermauerwerk	80
helles Sichtmauerwerk	50



?



Strahlungswärme

Absorptionsgrade für langwellige und kurzwellige Strahlung unterscheiden sich:

kurzwellige Strahlung (Sonne)

	α
Dachpappe	0,93
Ölfarbenanstrich, dunkel	0,87
Putz, grau	0,65
Putz, weiß	0,36
Beton	0,55
Ziegelstein, rot	0,55
Putz, weiß	0,36
Metalle, poliert	$\approx 0,25$
Aluminium anodisiert, eloxiert	0,20-0,40
Aluminium poliert	0,10-0,40
Fensterglas	0,04-0,40
(je nach Durchlässigkeit)	

→ Für den Absorptionsgrad ist die **Farbe (Helligkeit)** entscheidend

→ Bei kurzwelliger Strahlung treten geringere Absorptionsgrade als bei langwelliger Strahlung auf

Strahlungswärme

Absorptionsgrade für langwellige und kurzwellige Strahlung unterscheiden sich:

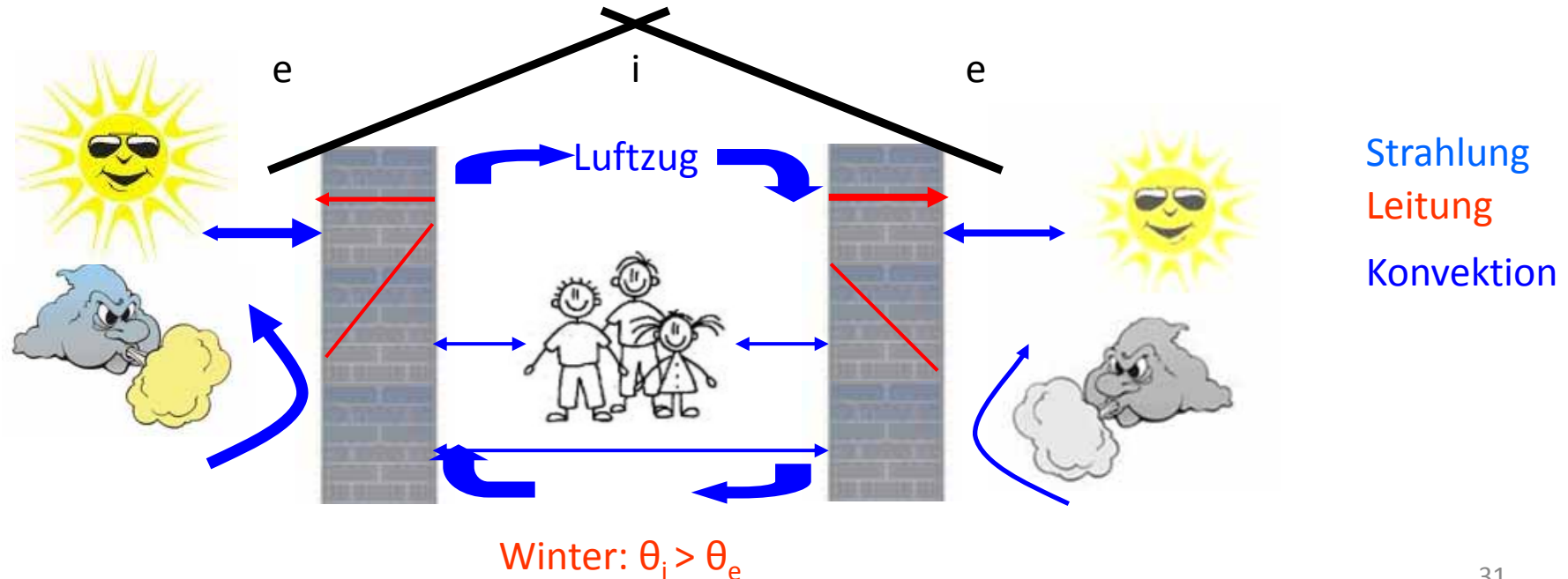
langwellige Strahlung (Körper zwischen 0 und 100°C)

	α	
Dachpappe	0,93	} alle nichtmetallische Baustoffe absorbieren (und emittieren) beträchtlich, nahezu in der gleichen Größenordnung
Ölfarbenanstrich, schwarz, glänzend	0,88	
Ölfarbenanstrich, weiß	0,89	
Putz, Beton, Mörtel	0,93	
Ziegelstein, rot	0,93	
Fensterglas	0,90	
Aluminium anodisiert, eloxiert	0,90	
Aluminium poliert	$\approx 0,30$	} polierte metallische Oberflächen absorbieren (und emittieren) sehr wenig
Silber, poliert	0,03	

→ Für den Absorptionsgrad ist die **Oberflächenstruktur, nicht die Helligkeit** entscheidend

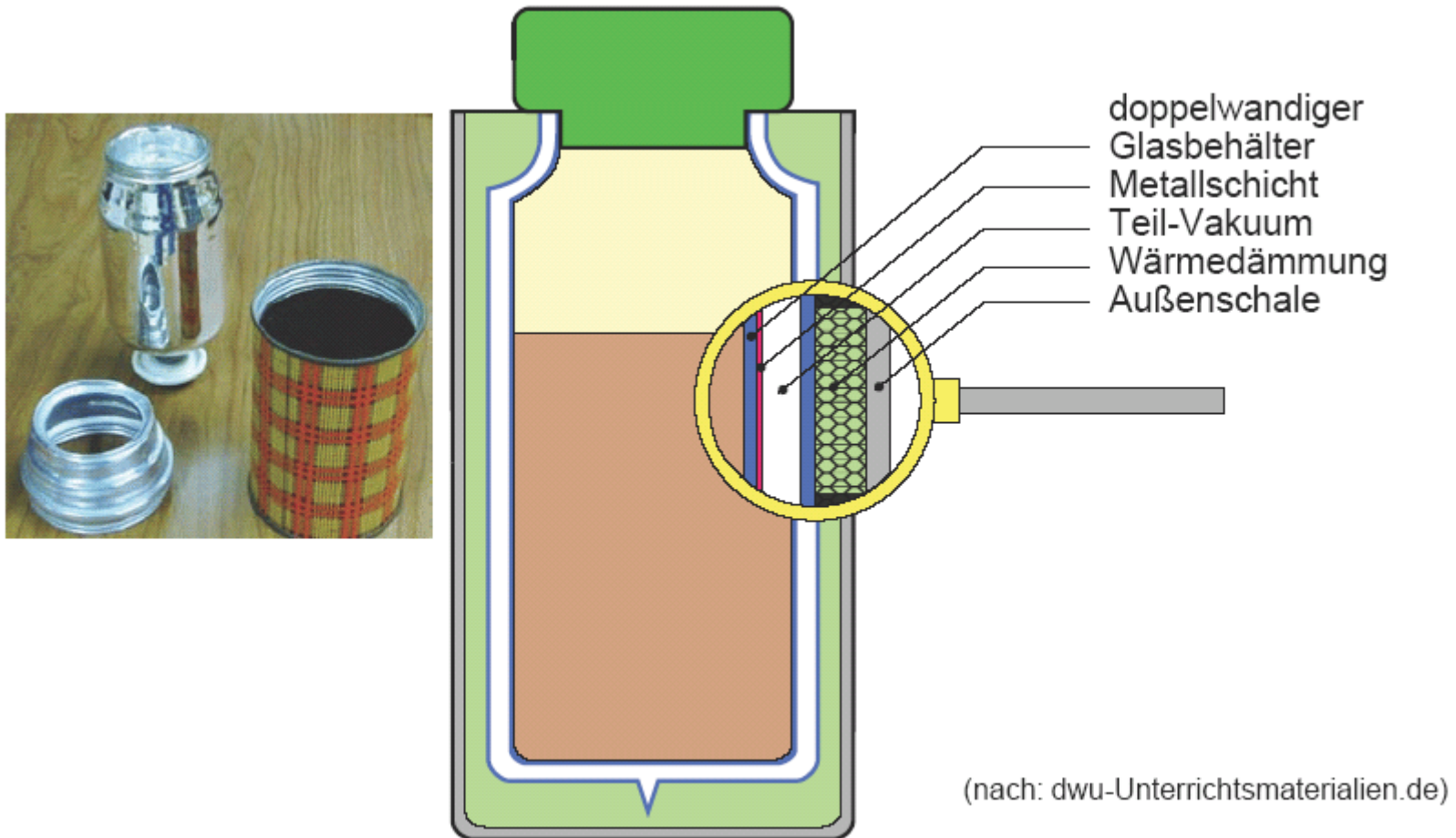
Zusammenfassung Wärmetransportmechanismen

- drei Arten des Wärmetransport mit unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten
- Wärmestrom zwischen zwei benachbarten Körpern bis Temperatenausgleich erreicht ist
- Richtung des Wärmestroms stets in Richtung des Temperaturgefälles



Zusammenfassung Wärmetransportmechanismen

Ein Beispiel: Thermosflasche, Schutz gegen alle drei Arten des Wärmetransports



Grundkennwerte

Wärmekapazität „c“

Wärmemenge, die einem Kilo des trockenen Baustoffs zugeführt werden muss, um diesen um ein Kelvin zu erwärmen

oder

Wärmemenge, die ein Kilo des trockenen Baustoffs abgibt, wenn er um ein Kelvin abkühlt

Wärmespeicherung und -transport

Wärmespeicherung

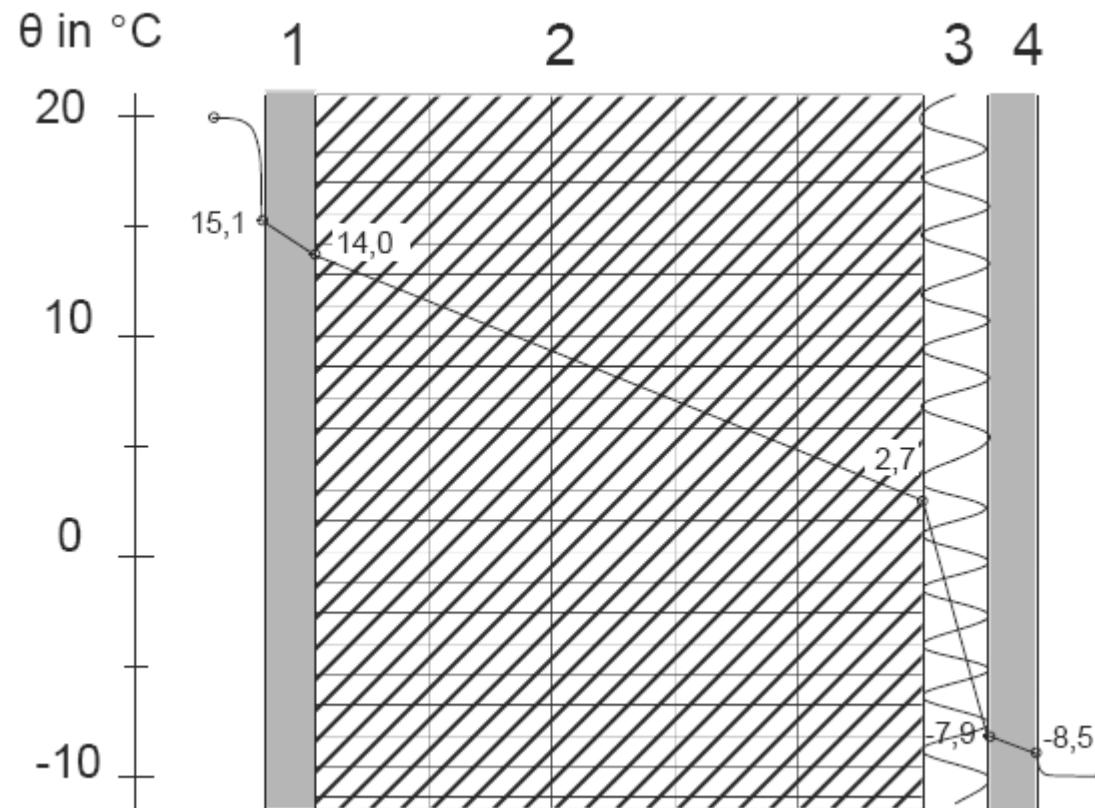
- Wärmespeicherfähigkeit c des trockenen Baustoffs
- Wärmespeicherfähigkeit c des enthaltenen Wassers

Bsp. Wasser: 4,18 kJ Energie erforderlich, um 1 kg Wasser um 1K zu erwärmen

⇒ Wasser kann viel Energie aufnehmen, ohne dass sich die Temperatur wesentlich erhöht, beim Abkühlen wird viel Energie frei

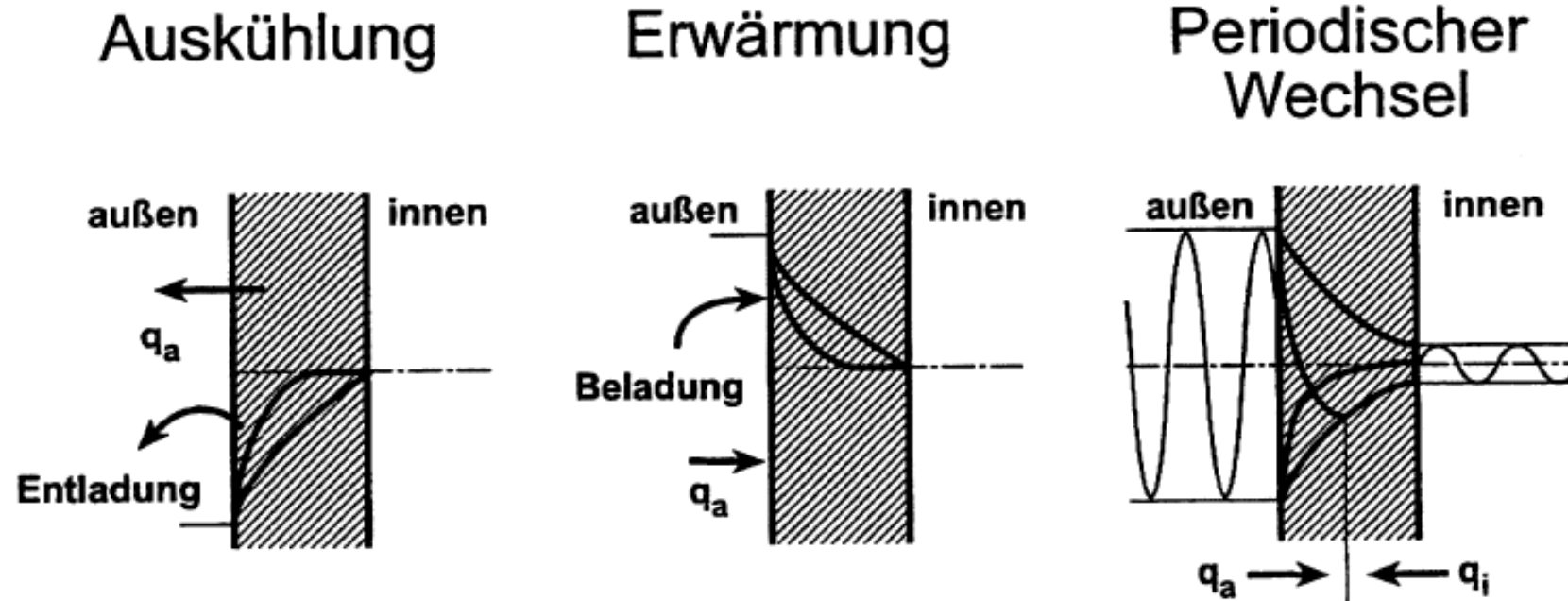
Material	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spez. Wärmekapazität c	
		[J/kgK]	[KJ/m ³ K]
Beton	2100	850	1785
Mineralfaser	30	840	25,2
Holz	400	1900	760
Holzfaserdämmstoff	150 – 270	1700 – 2100	
Luft	1	1005	1,005
Wasser	1000	4183	4183
Zelluloseflocken	25 – 70	2100	52,5-147

Grafische Darstellung des eines Temperaturverlaufs unter stationären Bedingungen:



Hinweis Realität: instationäre Temperaturverhältnisse

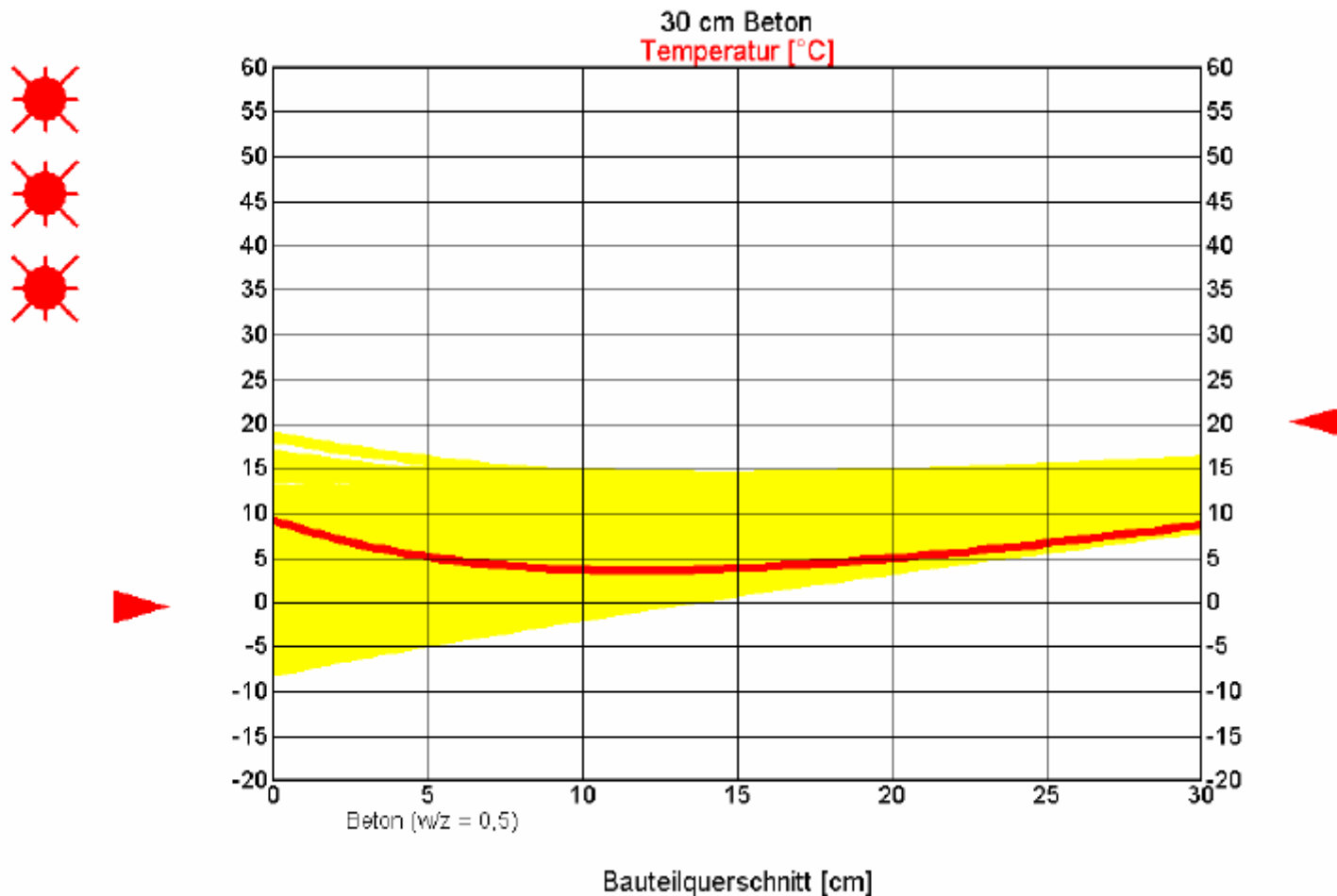
Das instationäre Temperaturverhalten wird beeinflusst durch die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmespeicherkapazität c



Hinweis Realität: instationäre Temperaturverhältnisse

Instationäre Temperaturverhältnisse

(durch zeitlich veränderliche Umgebungsbedingungen, z.B. Sonne, Heizung)



Quellen

- Vorlesung FH Rosenheim Prof. Klaus Sedlbauer, Dr. Martin Krus,
Fraunhofer-Institut für Bauphysik

2008: An dieser Stelle **danke** ich **Dr. Martin Krus** und **Prof. Klaus Sedlbauer** vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik, dass sie so hilfsbereit waren, mir die Unterlagen, der von ihnen entworfenen Vorlesung an der FH Rosenheim zu Lehrzwecken an der FH Frankfurt zur Verfügung zu stellen.

Genauso danke ich **Prof. Schulz**, dass er mich bei der Gestaltung der Vorlesung beraten und unterstützt hat und mir seine Unterlagen zur Verfügung gestellt hat.