

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Wärme- und Kälteschutz von betriebstechnischen
Anlagen in der Industrie und in der
Technischen Gebäudeausrüstung

Berechnungsgrundlagen

Thermal insulation of heated and refrigerated
operational installations in the industry and the
building services

Calculation rules

VDI 2055

Blatt 1 / Part 1

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this guideline shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt	Seite	Contents	Page
Vorbemerkung	5	Preliminary note	5
Einleitung	5	Introduction	5
1 Anwendungsbereich	6	1 Scope	6
2 Begriffe	7	2 Terms and definitions	7
3 Formelzeichen und Indizes	7	3 Symbols and indices	7
4 Grundlagen des Wärmeschutzes	10	4 Principles of thermal insulation	10
4.1 Physikalische Gesetzmäßigkeiten	10	4.1 Physical laws	10
4.1.1 Wärmetransport	10	4.1.1 Heat transfer	10
4.1.2 Einfluss der Feuchtigkeit im Dämmstoff auf die Wärmeleit- fähigkeit	15	4.1.2 Influence of moisture in the insulant upon the thermal conductivity	15
4.2 Berechnung der Wärmeströme durch Dämmschichten im stationären Zustand	16	4.2 Calculation of heat flow rates through insulation layers in the steady state	16
4.2.1 Wärmetransport in Dämmschichten	16	4.2.1 Heat transfer in insulation layers	16
4.2.2 Wärmeübergang	26	4.2.2 Surface heat transfer	26
4.2.3 Wärmedurchgang	35	4.2.3 Thermal transmission	35
4.2.4 Temperaturen an Oberflächen und Schichtgrenzen	41	4.2.4 Temperatures at surfaces and layer boundaries	41
5 Berechnung von Wärmeverlusten oder -einträgen, Temperaturen und Wasserdampf- diffusionsvorgängen	43	5 Calculation of heat losses or ingresses, temperatures and water vapour diffusion processes	43
5.1 Gesamtwärmeverlust oder -eintrag und die Einflussgrößen	43	5.1 Total heat loss or ingress and pertinent factors	43
5.1.1 Praktische Gegebenheiten und Randbedingungen	44	5.1.1 Practical matters and boundary conditions	44
5.1.2 Zuschlagswerte $\Delta\lambda$ zur Berechnung von λ_B	45	5.1.2 Supplementary values $\Delta\lambda$ for calculating λ_B	45
5.1.3 Gesamtwärmedurchgangs- koeffizient k'_i	45	5.1.3 Total thermal transmission coefficient k'_i	45

VDI-Gesellschaft Energietechnik

Ausschuss Wärme- und Kälteschutz

VDI-Handb

VDI-Handbuch Energietechnik

ng/Projektierung

This is a preview. Click here to purchase the full publication.

	Seite		Page
5.2 Wärmeverluste oder -einträge sowie Temperaturen in Komponenten	53	5.2 Heat losses or ingresses and temperatures in components	53
5.2.1 Behälter	53	5.2.1 Vessel	53
5.2.2 Rohrleitungen und Kanäle	56	5.2.2 Pipes and ducts	56
5.3 Wasserdampfdiffusion	60	5.3 Water vapour diffusion	60
5.3.1 Allgemeines	60	5.3.1 General	60
5.3.2 Wasserdampfdiffusion in einer Kühlraumwand.	62	5.3.2 Water vapour diffusion in a cold store wall	62
5.3.3 Wasserdampfdiffusion in Kälte- dämmungen	63	5.3.3 Water vapour diffusion in cold insulations	63
5.4 Beispiele	68	5.4 Examples	68
5.4.1 Einlagige Wärmedämmung einer vertikalen Rohrleitung	68	5.4.1 Single-layer thermal insulation of a vertical pipe	68
5.4.2 Kälte-dämmung.	70	5.4.2 Cold insulation	70
5.4.3 Dämmung einer Kühlleitung zur Vermeidung von Tauwasser; Berechnung der Feuchteaufnahme.	71	5.4.3 Insulation of a cold pipe to avoid condensation; calculation of moisture absorption	71
5.4.4 Mehrschichtige Wärmedämmung	74	5.4.4 Multi-layered thermal insulation	74
5.4.5 Wärmeverlust eines Behälters	76	5.4.5 Heat loss from a vessel	76
5.4.6 Wärmestrom eines in einer Fuß- boden- oder Wandkonstruktion eingebetteten Rohres.	81	5.4.6 Heat flow rate of a pipe embedded in a floor or wall construction	81
6 Bemessung von Dämmschichten	84	6 Dimensioning of insulation layers	84
6.1 Allgemeine Gesichtspunkte für die Auswahl von Dämmstoffen und die Festlegung von Dämmschichtdicken	84	6.1 General considerations regarding the selection of insulation materials and the determination of insulation layer thicknesses	84
6.1.1 Bemessungskriterien.	84	6.1.1 Dimensioning criteria	84
6.1.2 Wahl des Dämmstoffes	85	6.1.2 Selection of the insulation material	85
6.2 Ermittlung von Dämmschichtdicken beim Wärmeschutz	85	6.2 Determination of insulation layer thicknesses for thermal protection	85
6.2.1 Ermittlung von Dämmschicht- dicken nach technischen Gesichts- punkten.	85	6.2.1 Determination of insulation layer thicknesses on the basis of technical considerations	85
6.2.2 Bestimmung der Dämmschicht- dicke nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten	91	6.2.2 Determination of insulation layer thickness on the basis of economic considerations	91
6.2.3 Beispiele	99	6.2.3 Examples	99
6.3 Besonderheiten beim Kälteschutz	105	6.3 Special conditions for cold protection	105
6.3.1 Allgemeines	105	6.3.1 General	105
6.3.2 Bestimmung der Dämmschicht- dicke nach betriebstechnischen Gesichtspunkten	105	6.3.2 Determination of insulation layer thickness on the basis of operational considerations.	105
Anhang A	107	Annex A	108
A1 Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten	107	A1 Comparison of thermal conductivities	108
A2 Anhaltswerte für das Produkt aller wirksamen Faktoren f_{ges} gemäß Gleichung (8) und Anhang A3	109	A2 Reference values for the product of all effective factors f_{ges} according to Equation (8) und Annex A3	112
A3 Faktoren zur Ermittlung der Betriebs- wärmeleitfähigkeit gemäß Abschnitt 4.2.1.1c	115	A3 Factors for the determination of the operational thermal conductivity according to Section 4.2.1.1c	117
A3.1 Faktor $f_{\Delta\theta}$	116	A3.1 Factor $f_{\Delta\theta}$	118

	Seite		Page
A3.2	Koeffizient a_c für Mineralwolle zur Berechnung von f_{VD} im Temperaturbereich 50 °C bis 600 °C	A3.2	Coefficient a_c for mineral wool for the calculation of f_{VD} in the temperature range 50 °C to 600 °C
	119		119
A3.3	Parameter für die modifizierte Nusselt-Zahl zur Ermittlung von f_k	A3.3	Parameter for the modified Nusselt number for the determination of f_k
	119		119
A3.4	Koeffizient a_ψ zur Ermittlung des Feuchtefaktors f_F	A3.4	Coefficient a_ψ for the determination of the moisture factor f_F
	120		120
A3.5	Dickenkoeffizient a_s für IR-strahlungsdurchlässige Dämmstoffe (Temperaturbereich 20 °C bis 60 °C)	A3.5	Thickness coefficient a_s for insulants permeable for IR radiation (Temperature range 20 °C to 60 °C)
	120		120
A4	Zuschlagswerte $\Delta\lambda$ zur Ermittlung der Betriebswärmeleitfähigkeit gemäß Abschnitt 4.2.1.1c	A4	Supplementary values $\Delta\lambda$ for the determination of operational thermal conductivity according to Section 4.2.1.1c
	121		122
A5	Anhaltswerte für Verluste über dämmtechnisch bedingte Wärmebrücken oder Einbauten	A5	Reference values for losses from thermal-bridges or inserts.
	123		125
A6	Anhaltswerte für Dämmstoffeigenschaften	A6	Reference values for insulation material properties
	127		127
A6.1	Koeffizienten zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeitskurven nach Anhang A6	A6.1	Coefficients for the calculation of thermal conductivity curves according to Annex A6
	132		132
A7	Stoffwerte der trockenen Luft.	A7	Properties of dry air.
	136		136
A8	Emissionsgrad ε verschiedener Oberflächen bei Temperaturen zwischen 0 °C und 200 °C	A8	Emissivity ε of various surfaces at temperatures between 0 °C and 200 °C
	137		137
A9	Einstrahlzahl φ_{12}	A9	Irradiation factor φ_{12}
	138		138
A10	Parameter c , n und κ zur Berechnung des mittleren Wärmeübergangskoeffizienten bei freier Konvektion	A10	Parameters c , n , κ for the calculation of the average heat transfer coefficient with free convection
	140		140
A11	Gleichungen zur Berechnung des Wärmedurchlasskoeffizienten Λ bei Luftspalten infolge freier Konvektion und Wärmeleitung.	A11	Equations for the calculation of coefficient of thermal conductance Λ for air spaces caused by free convection and thermal conductivity
	142		142
A12	Beziehungen zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten bei erzwungener Konvektion α_k	A12	Relationships for calculating heat transfer coefficient α_k with forced convection.
	144		144
A13	Konstruktive Wärmebrücken (WB)	A13	Structural thermal bridges (WB)
	145		145
A14	Anhaltswerte für Verluste über anlagenbedingte Wärmebrücken der Einbauten.	A14	Reference values for plant related thermal bridges
	146		146
A15	Anhaltswerte für Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen μ und diffusionsäquivalente Luftschichtdicken s_d	A15	Reference values for water vapour diffusion resistance factor μ and diffusion-equivalent air layer thickness s_d
	148		148
A16	Differenz $\Delta\vartheta_{\text{Tau}}$ in K zwischen Luft- und Oberflächentemperatur bei Beginn der Tauwasserbildung	A16	Difference $\Delta\vartheta_{\text{Tau}}$ in K between air and surface temperature at the beginning of dew formation
	149		149
Anhang B	Diagramme	Anhang B	Diagrams
	150		150
B1a	Faktor Ψ zur Berechnung des Wärmeverlustes von auskragenden Wärmebrücken	B1a	Factor Ψ for calculation heat loss from projecting thermal bridges
	150		150

	Seite		Page
B1b	Formfaktor S_R zur Berechnung des Wärmeverlustes von Versteifungsrippen	B1b	Form factor S_R for the calculation of heat losses at reinforcing profiles 151
B2	Linien konstanter Drosselkoeffizienten $\delta_{h,D}$ von Wasser und Dampf in einem Druck-Temperatur-Diagramm.	B2	Lines of constant throttle coefficients $\delta_{h,D}$ of water and steam in a pressure-temperature diagram 152
B3.1	Berechnung der Wärmeströme von Rohrleitungen in Fußbodenaufbauten	B3.1	Calculation of heat flow rates in pipes in floor constructions. 153
B3.2	Berechnung der Wärmeströme von Rohrleitungen in Wänden	B3.2	Calculation of heat flow of pipes in walls 154
B4	Bestimmung der Dämmschichtdicke für eine Rohrleitung bei vorgegebener Wärmestromdichte	B4	Determination of insulation layer thickness for a pipe at a set density of heat flow rate. 155
B5	Dämmschichtdicke für Rohrleitungen in Abhängigkeit vom Wärmestrom je m Rohrlänge, der Temperaturdifferenz zwischen Medium und Luft, der Wärmeleitfähigkeit, der Kenngröße G und dem Rohrdurchmesser	B5	Insulation layer thickness for pipes as a function of heat flow per m pipe length, temperature difference between medium and air, thermal conductivity, parameter G and pipe diameter 156
B6	Bestimmung der Dämmschichtdicke von Rohrleitungen und ebenen Wänden in Abhängigkeit von der Übertemperatur der Dämmschichtoberfläche gegenüber der Umgebungsluft, dem Rohrdurchmesser, der Wärmeleitfähigkeit und dem äußeren Wärmeübergangskoeffizienten	B6	Determination of insulating layer thickness of pipes and walls as a function of excess temperature of the insulating layer surface in comparison with the ambient air, the pipe diameter, the thermal conductivity and the external heat transfer coefficient 157
Schrifttum		Bibliography	 158
Index		Index	 162

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser VDI-Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi-richtlinien.de), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser VDI-Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Einleitung

Die Richtlinie VDI 2055 erscheint in drei Blättern, die sich an die Zielgruppen Anwender, Planer, Dämmstoffhersteller sowie Prüf- und Überwachungsinstitutionen richten.

Das Blatt 1 enthält die Beziehungen zur Auslegung von Wärme- und Kälte­dämmungen. Neu aufgenommen im Vergleich zur VDI 2055:1994-07 wurden Berechnungen aus dem Bereich der Technischen Gebäudeausrüstung.

Folgende weitere Blätter der VDI 2055 sind in Vorbereitung:

- Blatt 2 für die Aufgabenbereiche: Messen, Prüfen und Zertifizieren von Dämmstoffen
- Blatt 3 für die Abnahme von Dämmsystemen und für Lieferbedingungen

Die bisher vorliegende VDI 2055 wurde überarbeitet und auch hinsichtlich der Formelzeichen weitgehend an die europäische Normung angeglichen. Tabelle 1 stellt die wichtigsten Bezeichnungen der neuen VDI 2055 den Entsprechungen des europäischen Normenwerks gegenüber.

Preliminary note

The content of this guideline has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the guideline VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this guideline without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions specified in the VDI notices (www.vdi-richtlinien.de).

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this guideline.

Introduction

The guideline VDI 2055 is issued in three parts, addressing the clients technical engineers, insulation material manufacturers, testing and certification institutions and insulation contractors.

Part 1 contains the calculation rules for the design of thermal and cold insulations. The calculations covering the area of building equipment have been newly added (cf. VDI 2055:1994-07).

The following additional parts of VDI 2055 are in preparation:

- Part 2 for the areas: measurements, testing and certification of insulation materials
- Part 3 for the acceptance of insulation systems and the supply conditions

The VDI 2055 has been revised and also adjusted to the European standardisation regarding the symbols used in equations. Table 1 below shows the most important terms of the new VDI 2055 against their equivalents in the European standards.

Tabelle 1. Gegenüberstellung der Formelzeichen nach EN ISO 12241 und VDI 2055 /
Table 1. Comparison of symbols according to EN ISO 12241 and VDI 2055

Bedeutung / Meaning	EN ISO 12241	VDI 2055
Wärmestrom / heat flow rate	Φ	$\dot{Q}$
Wärmestromdichte / density of heat flow rate	q	q
längenbezogene Wärmestromdichte / longitudinal density of heat flow rate	q_l	q_l
Temperatur / temperature in °C	θ	ϑ
Wärmeübergangskoeffizient / surface coefficient of heat transfer	h	α
Enthalpie / enthalpy	h	h
Wärmedurchgangskoeffizient / overall heat transfer coefficient	U	k
Dämmschichtdicke / insulation layer thickness	d	s
Zeit / time	t	t
Geschwindigkeit / velocity	v	w
Durchmesser / diameter	D	d
Höhe / height	H	H
Wärmedurchlasswiderstand / coefficient of thermal resistance	R	R
längenbezogener Wärmedurchlasswiderstand / longitudinal coefficient of thermal resistance	R_l	R_l
Umfang / perimeter	P	U
Wärmeübergangswiderstand / surface resistance to heat transfer	R_s	$1/\alpha$

1 Anwendungsbereich

Der Zweck dieser Richtlinie ist es, Verfahren für

- die Berechnung von Wärmeströmen und Diffusionsvorgängen und
- die Bemessung von Dämmschichtdicken nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten festzulegen.

Der Geltungsbereich der Richtlinie umfasst den Wärme- und Kälteschutz an betriebstechnischen Anlagen der Industrie und in der Technischen Gebäudeausrüstung wie Rohrleitungen, Kanälen, Behältern, Apparaten und Maschinen sowie Kühllhäusern. Die Mindestdämmschichtdicken bei Wärmeverteilungs- und Warmwasserleitungen in der Technischen Gebäudeausrüstung sind für Deutschland in der „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden“ (*Energieeinsparverordnung – EnEV*)¹⁾ geregelt. Die in der vorliegenden Richtlinie aufgeführten Gesichtspunkte können zu anderen Dämmschichtdicken führen.

Für den Wärmeschutz im Bauwesen gelten die *EnEV* sowie *DIN 4108*.

Bezüglich des Brandverhaltens von Dämmstoffen und Feuerwiderstandsklassen von Dämmungen sind ge-

¹⁾ Verweise auf deutsche Technische Regeln und deutsche Gesetze o.Ä. werden im Text *kursiv* dargestellt.

1 Scope

It is the purpose of this guideline to establish procedures for

- the calculation rules for heat flow rates and diffusion processes, and
- the dimensioning of insulation layer thicknesses upon technical and economic considerations.

The scope of this guideline embraces the thermal and cold protection of technical installations in the industry and in the building services such as pipes, ducts, vessels, appliances and machines, and the insulation of cold stores. In Germany, the insulation layer thicknesses required for heating and hot water supply installations in the building services have been regulated in the “Directive for Energy Saving Heat Protection and Energy-efficient Technical Building Equipment” (*Energy Savings Directive – EnEV*).¹⁾ The considerations put forth in this guideline may lead to other insulation layer thicknesses.

For thermal protection in buildings, *EnEV* together with *DIN 4108* apply.

Regarding the fire behaviour of insulation materials and fire resistance classes of insulation systems, the

¹⁾ References in the text to German Technical Regulations and Laws etc. are set in *italics*.

gesetzliche Vorschriften, z. B. Landesbauordnungen und Leitungsanlagen-Richtlinien der Bundesländer, zu beachten.

legal regulations must be observed, e. g., state building codes and building equipment regulations of the federal states.

2 Begriffe

Die Begriffe in dieser Richtlinie stützen sich auf das AGI-Arbeitsblatt *AGI Q 02* und die Norm *DIN 4140*.

2 Terms and definitions

The terms used in this guideline are defined in the working document *AGI Q 02* and standard *DIN 4140*.

3 Formelzeichen und Indizes

In dieser Richtlinie werden die nachfolgend aufgeführten Formelzeichen und Indizes verwendet:

3 Symbols and definitions

The following symbols and indices are used in this guideline:

Formelzeichen / Symbols	Bedeutung / Term/meaning	Maßeinheit / Unit
A	Fläche / area	m^2
b	Breite / width	m
b	Kapitaldienstfaktor / capital service factor	1/a, %/a
b	Faktor / factor	–
C_{12}	Strahlungskoeffizient / radiation coefficient	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
c	spezifische Wärmekapazität / specific heat capacity	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck / specific heat capacity at constant pressure	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_ψ	Koeffizient zur Berücksichtigung von Struktur und Rohdichte / coefficient for the inclusion of structure and apparent density	–
D	Diffusionskoeffizient / diffusion coefficient	m^2/s
d	Durchmesser / diameter	m
f	Faktor, Korrekturfaktor, Preisänderungsfaktor / factor, correction factor, price variation factor	–
g	Wasserdampf-Diffusionsstromdichte / water vapour diffusion flow density	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
Gr	Grashof-Zahl / Grashof number	–
H	Höhe / height	m
h	Enthalpie / enthalpy	J/kg
J	Investitionskosten / investment costs	$\text{€}/\text{m}^2$, $\text{€}/\text{m}$
K	Kosten der Dämmung / costs of the insulation	$\text{€}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $\text{€}/(\text{m} \cdot \text{a})$
k	Wärmedurchgangskoeffizient / thermal transmission coefficient	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, W/K
k'	Gesamtwärmedurchgangskoeffizient einschließlich Wärmebrücken / total thermal transmission coefficient including thermal bridges	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, W/K
l	Länge / length	m
m	Masse / mass	kg
$\dot{m}$	Massenstrom / mass flow rate	kg/s , kg/h
n	Nutzungsdauer / service life	a
Nu	Nußelt-Zahl / Nusselt number	–

Formelzeichen / Symbols	Bedeutung / Term/meaning	Maßeinheit / Unit
p	Druck / pressure	Pa
Pr	Prandtl-Zahl / Prandtl number	–
$\dot{Q}$	Wärmestrom / heat flow rate	W
q	Wärmestromdichte / density of heat flow rate	W/m ² oder W/m
R	Wärmedurchlasswiderstand / coefficient of thermal resistance	m ² · K/W, m · K/W, K/W
R	spezielle Gaskonstante / specific gas constant	J/(kg · K)
Re	Reynolds-Zahl / Reynolds number	–
s	Dämmschichtdicke / insulation layer thickness	m
t	Zeit / time	h oder s
T	absolute Temperatur / absolute temperature	K
U	Umfang / perimeter	m
W	Wärmepreis / heat price	€/GJ
w	Geschwindigkeit / velocity	m/s
x	Längenkoordinate / longitudinal co-ordinate	m
Z	Faktor / factor	–
z, z^*	Zuschlagswert / supplementary value	–
α	Wärmeübergangskoeffizient / heat transfer coefficient or surface coefficient of heat transfer	W/(m ² · K)
β	Jahresnutzungsdauer / operating time per year	h/a
δ	Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient / water vapour diffusion coefficient	kg/(m · s · Pa), s
δ	Drosselkoeffizient / throttle coefficient	K/Pa
$\bar{\kappa}$	Teilwärmedurchgangskoeffizient / partial thermal transmission coefficient	W/(m ² · K)
Λ	Wärmedurchlasskoeffizient / coefficient of thermal conductance	W/(m ² · K)
λ	Wärmeleitfähigkeit / thermal conductivity	W/(m · K)
ε	Emissionsgrad / emissivity	–
η	Wirkungsgrad / efficiency	–
η	dynamische Viskosität / dynamic viscosity	N · s/m ²
ϑ	Temperatur / temperature	°C
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl / water vapour diffusion	–
ν	kinematische Viskosität / kinematic viscosity	m ² /s
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante / Stefan-Boltzmann constant	W/(m ² · K ⁴)
ρ	Dichte, Rohdichte / density, apparent density	kg/m ³
φ	Einstrahlzahl / irradiation factor	–
φ	relative Luftfeuchte / relative humidity	–
Ξ	längenbezogener Strömungswiderstand / longitudinal flow resistance	Pa · s/m ²
Ψ	Feuchtegehalt / moisture content	m ³ /m ³

Indizes / Indices	Bedeutung / Meaning
0	Normzustand / standard condition
A	Austritt / outlet
a	außen / outer, exterior
B	Betrieb / operation, Bemessungswert / design value, Beton / concrete
D	Dampf / Steam
BD	Betondecke / concrete ceiling
E	Erdreich / soil, Eintritt / inlet
erz	erzwungen (Konvektion) / forced (convection)
F	Fuß / base
FG	Feststoffgerüst / solid structure
frei / free	freie (Konvektion) / free (convection)
G	Gas / gas
ges	Gesamt / total
GP	Gefrierpunkt / freezing point
i	innen / inner, internal
K	Kugel / sphere
K	Konvektion / convection
k	konvektiv / convective
L	Luft / air
Lab	Laborwert / laboratory value
l	längenbezogen / longitudinal
M	Medium / medium
m	Mittelwert / mean value
N	Nennwert / declared value
O	Oberfläche / surface
P	Platte / board, slab
R	Rohr, Raum / pipe, room
r	Strahlung / radiation
S	Stirnfläche / front surface
v	Verdampfung / evaporation
WB	Wärmebrücken / thermal bridges
WE	Wärmeeintrag / heat ingress
WV	Wärmeverlust / heat loss
Ψ	Struktur und Rohdichte / structure and apparent density

4 Grundlagen des Wärmeschutzes

4.1 Physikalische Gesetzmäßigkeiten

4.1.1 Wärmetransport

4.1.1.1 Transportvorgänge

Wärmetransport ist der Transport thermischer Energie aufgrund eines Temperaturgefälles. Wärme kann durch *Leitung*, *Konvektion* und *Strahlung* übertragen werden.

Die *Wärmeleitung* ist der von Molekül zu Molekül erfolgende Transport von Wärme. Die mittlere Lage der einzelnen Moleküle zueinander kann dabei unverändert bleiben, wie bei Festkörpern, oder veränderlich sein, wie bei Flüssigkeiten und Gasen.

Die *Konvektion* oder Wärmemitführung ist ein Transportmechanismus in Flüssigkeiten und Gasen, wobei durch Strömungsvorgänge Wärme in Form von innerer Energie der transportierten Materie von einem Ort zum anderen befördert wird. Man spricht von *freier Konvektion*, wenn die Bewegung aufgrund von Dichteunterschieden hervorgerufen wird und von *erzwungener Konvektion*, wenn die Strömung durch äußere Einwirkung (z.B. Gebläse, Wind) verursacht wird.

Die *Wärme-* oder *Temperaturstrahlung* beschreibt, dass Festkörper, Flüssigkeiten und Gase thermische Energie in Form elektromagnetischer Wellen, ähnlich der Lichtstrahlung aussenden oder durch Absorption aufnehmen können. Ist das Medium zwischen den im Strahlungsaustausch stehenden Körpern strahlungsdurchlässig, (z.B. Luft), so hat dessen Temperatur keinen Einfluss auf den vom wärmeren zum kälteren Körper als Wärme fließenden Energiestrom. Der Wellenlängenbereich für die Wärme- oder Temperaturstrahlung liegt im Infrarot-Bereich zwischen 0,8 µm und 800 µm.

Der Wärmetransport in festen Körpern erfolgt im Wesentlichen durch Leitung, teilweise aber auch durch Strahlung bei ausreichend durchlässigen Stoffen. In flüssigen, gasförmigen und porösen Stoffen können alle drei Übertragungsarten beteiligt sein. Sie unterliegen jedoch verschiedenen Gesetzmäßigkeiten (siehe Abschnitt 4.1.1.2 und Abschnitt 4.2.1.1).

Die Wärmeübertragung von einem flüssigen oder gasförmigen Medium auf einen festen Körper oder umgekehrt, z.B. von Luft auf eine Wand oder von einer Wand auf Luft, wird als *Wärmeübergang* bezeichnet.

Wird Wärme zwischen Fluiden (Gase oder Flüssigkeiten) durch einen Körper hindurch übertragen, z.B. durch eine Wand, spricht man von *Wärmedurchgang*. Der Wärmedurchgang setzt sich zusammen aus den Wärmeübergängen an den beiden Wandoberflächen und der Wärmeleitung in der Wand.

4 Principles of thermal insulation

4.1 Physical laws

4.1.1 Heat transfer

4.1.1.1 Transfer processes

Heat transfer is the transport of thermal energy caused by a temperature gradient. Heat can be transferred through *conduction*, *convection* and *radiation*.

Thermal conduction is the transport of heat from molecule to molecule. The average position of the individual molecules in relation to each other may remain unchanged as in the case of solids, or vary as with liquids and gases.

Convection is a transport mechanism in liquids and gases, whereby heat is transported as internal energy from one place to another by macroscopic flow processes. The term *free convection* is used if the movement is caused by differences in density, while *forced convection* is used if the flow is caused by an external influence (e.g. ventilators, wind).

The *heat* or *thermal radiation* describes the fact that solids, liquids and gases emit thermal energy in the form of electromagnetic waves similar to light radiation or take this energy up by absorption. If the medium between the bodies, which are exchanging radiation, is permeable to radiation, e.g. air, its temperature has no effect on the energy flow, which moves in the form of heat, from the warmer to the colder body. The wavelength range for thermal radiation lies in the infrared range between 0,8 µm and 800 µm.

Heat transfer in solid bodies principally occurs by means of conduction, but partly also through radiation in the case of materials which are sufficiently permeable. In liquid, gaseous and porous media, all three types of transfer can simultaneously be involved. However, they are subject to different laws (see Section 4.1.1.2 and Section 4.2.1.1).

Heat transfer from a liquid or gaseous medium to a solid body or vice versa, e.g. between air and the surface of a wall or from the wall surface to the air is designated as *surface heat transfer*.

If heat is transferred between fluids (gases or liquids) through a body, e.g. through a wall, this is termed *thermal transmittance*. The thermal transmittance comprises the surface heat transfer at the two wall surfaces and the heat conduction in the wall.

Beim Wärmetransport ist zwischen

- zeitlich unveränderlichen (stationären) und
- zeitlich veränderlichen (instationären)

Vorgängen zu unterscheiden. Im ersten Fall sind die Temperaturen und damit auch die Wärmeströme zeitlich konstant.

Zeitlich veränderliche Wärmetransportvorgänge sind erheblich komplexer als stationäre und ihre Berechnung erfordert einen größeren Aufwand. In dieser Richtlinie werden daher nur einige wenige Fälle behandelt (Abschnitt 5.2). In diesem Zusammenhang sei auch auf [26] verwiesen.

Dämmschichten verringern die Wärmeströme und verzögern bei zeitlich veränderlichen Vorgängen den Temperatúrausgleich. Die Unterbindung eines Wärmetransportes in einer Schicht ist nur durch Schutzheizungen oder -kühlungen möglich. Damit ist ein Energieaufwand verbunden.

4.1.1.2 Transportmechanismen in Dämmstoffschichten

In Dämmstoffen wird Wärme nicht nur durch Leitung über die festen Bestandteile und das in Hohlräumen eingeschlossene Gas transportiert, sondern auch durch Strahlung [2].

Der Wärmetransport durch Strahlung im Inneren des Dämmstoffes findet zwischen den Oberflächen der Partikel oder Hohlraumbegrenzungswände statt. Hierbei breitet sich Strahlung nicht nur gerichtet zwischen den direkt benachbarten Partikeln, Fasern oder gegenüberliegenden Wänden aus, sondern wird in verschiedene Richtungen gestreut.

Der gesamte Wärmetransport wird durch eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ beschrieben:

$$\lambda \approx \lambda_{FG} + \lambda_G + \lambda_r \quad \text{in} \quad \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad (1)$$

Dabei ist

- λ_{FG} Wärmeleitfähigkeit des Feststoffgerüsts
- λ_G Wärmeleitfähigkeit des Gases
- λ_r Strahlungsleitfähigkeit

Die gemessene äquivalente Wärmeleitfähigkeit ist eine von vielfältigen Bedingungen abhängige Größe, z. B. von der einfallenden und den Dämmstoff durchdringenden Strahlung. Damit ist sie bei geringen Dicken abhängig vom Emissionsgrad der Begrenzungsflächen.

Bei Dämmstoffen mit geringer Dicke und Rohdichte tritt ein Teil der einfallenden Strahlung durch den Dämmstoff. Dies führt dazu, dass die Wärmeleitfä-

In case of heat transfer processes, distinction is made between

- processes which do not vary over time (steady-state processes), and
- processes which vary over time (non-steady-state processes).

In the former case, the temperatures at all points, and hence the heat flow rates, remain constant.

Heat transmission processes which vary over time are much more complex than steady-state processes and their calculation requires a greater effort. In this guideline, therefore, only a few examples are being dealt with (Section 5.2). In this context reference is also being made to [26].

Insulation layers reduce heat flow rates and delay temperature equalisation in the case of processes which vary over time. The prevention of heat transfer in a layer is only possible by means of protective heating or cooling. This causes energy expenditure.

4.1.1.2 Transfer mechanisms in insulation layers

In insulation materials, heat is not only transferred through conduction over the solid particles and the gas enclosed in the cavities, but additionally through radiation [2].

The heat transfer through radiation within an insulation material occurs between the surfaces of particles or walls surrounding the cavities. In this process, radiation does not only occur directly between immediately neighbouring particles, fibres or opposite walls, but is scattered in different directions.

The total heat transfer is described through the equivalent thermal conductivity λ :

$$\lambda \approx \lambda_{FG} + \lambda_G + \lambda_r \quad \text{in} \quad \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad (1)$$

where

- λ_{FG} thermal conductivity of the solid structure
- λ_G thermal conductivity of the gas
- λ_r radiation conductivity

The measured equivalent thermal conductivity is a value dependent upon many factors, e. g. upon the incident radiation penetrating the insulation material. With this, at small thicknesses, it is dependent upon the emissivity of the outer surfaces.

With insulants of low thickness and apparent densities a part of the incident radiation penetrates the insulation material. This causes the thermal conductiv-