

HAWK - HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFT UND KUNST

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer

Baukonstruktion und Bauphysik in der Fakultät Bauwesen in Hildesheim

Übungsskripte der Studenten zur Bauphysik

Wärmeschutz
EnEV
Bauklimatik
Feuchteschutz
Schallschutz

Einleitung

Die Skripte für die Bauphysik entstanden unter Leitung von:

Prof. Dr.-Ing. Dipl. Arch. Hans Peter Leimer, HAWK Hildesheim/Holzminden/Göttingen

(Wärme-, Feuchte- und Schallschutz, Bauklimatik)

und Mitwirkung von:

Dipl.-Ing. Jens Bode, BBS INGENIEURBÜRO, Wolfenbüttel

(Wärmeschutz, Bauklimatik)

Dipl.-Ing. Helgo Heuer, BBS INGENIEURBÜRO, Wolfenbüttel

(Schallschutz, Raumakustik)

- © Alle Rechte der Veröffentlichung liegen bei den Verfassern.
Nur für Lehr- und Ausbildungszwecke.
Auszüge aus dem Skript sind mit Genehmigung zulässig.

Anschriften

Internet / e-mail

HAWK Hildesheim

Hohnsen 2

31134 Hildesheim

Telefon 05121-881-251

Telefax 05121-881-253

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer

Am Forst 27

38302 Wolfenbüttel

Telefon 05331-9717-30

Telefax 05331-9717-31

www.building-physics.net

HAWK@building-physics.net

© 2015 H.-P. Leimer Wolfenbüttel

Gebrauch nur für Lehrzwecke

Die Skripte der Bauphysik zeigen das Bestreben eine einheitliche Grundlage der Ausbildung der Studenten der Bauphysik an den Fachhochschulen der Bundesrepublik Deutschland der Ausbildungsbereiche Architektur, Bauingenieurwesen, Holzingenieurwesen zu erreichen.

Aus diesem Grund ist es ausdrücklicher Wunsch, die Skripte für die Vorlesungen im Fachgebiet Bauphysik zu verwenden. Ergänzende Beiträge und Anmerkungen sind erwünscht.

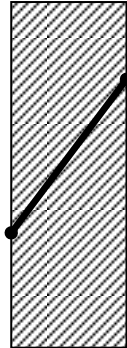
Einleitung	1
1 Wärmeschutz	4
1.1 Wärmetransport	4
Beispiel 1.1: Grundlagen Wärmeleitung.....	4
Beispiel 1.2: Freie Konvektion entlang einer senkrechten Wand.....	5
Beispiel 1.3: Strahlungswärmestrom eines HK an eine gegenüberliegende Wand	6
Beispiel 1.4: Strahlungswärmestrom eines HK an gegenüberliegenden Wänden und Decken	7
1.2 Wärmedurchgang	8
Beispiel 1.5: Berechnung des Wärmedurchgangs durch eine Außenwand	8
Beispiel 1.6: Wärmedurchgang durch eine Außenwand mit WDVS.....	9
Beispiel 1.7: Wärmedurchgang durch ein Dach mit inhomogenen Schichten.....	10
Beispiel 1.8: Wärmedurchgang durch ein geneigtes Dach mit inhomogenen Schichten und ruhender Luftschicht.....	11
Beispiel 1.9: Wärmedurchgang durch ein Zweischaliges Mauerwerk mit Luftschicht	12
Beispiel 1.10: Wärmedurchgang durch ein Bauteil mit inhomogenen Schichten und stark belüfteter Luftschicht	13
Beispiel 1.11: Wärmedurchgang durch ein Fenster mit Einfachrahmen und Dreifachverglasung	14
1.3 Wärmeübertragung	15
Beispiel 1.12: Wärmeübertragung über das Erdreich, Bodenplatte auf Erdreich	15
Beispiel 1.13: Wärmeübertragung über das Erdreich, beheizter Keller	15
Beispiel 1.14: Wärmeübertragung über das Erdreich, unbeheizter oder teilweise beheizter Keller.....	15
Beispiel 1.15: Wärmedurchgang durch nicht transparente Bauteile mit Sonnenstrahlung	16
Beispiel 1.16: Wärmeübertragung über ein Flachdach	17
Tauwasser	18
Beispiel 1.17: Berechnung von θ_{si} (Wärmebrücken).....	19
Beispiel 1.18: Berechnung der zulässigen rel. Luftfeuchte ϕ_{si}	20
1.4 Wärmebrücken.....	21
Massnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzen und Tauwasser auf der raumseitigen Bauteiloberfläche	21
Beispiel 1.19: Massnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung	21
Beispiel 1.20: Tauwasserfreiheit auf der raumseitigen Bauteiloberfläche.....	22
Beispiel 1.21: Beurteilungskriterien der Feuchte der raumseitigen Bauteiloberfläche	22
Beispiel 1.22 : Einbindung einer Stahlbetondecke in eine Außenwand	23
Beispiel 1.23 : Gebäudeaußenkante einer Mauerwerkswand.....	24
Beispiel 1.24 : Flachdachanschluss mit Attika	25
1.5 EDV Übungen	26
Computergestützte Berechnung von Wärmebrücken mit dem Programm HEAT	26
1.6 Sommerlicher Wärmeschutz	30
Beispiel 1.25 : Sommerlicher Wärmeschutz nach DIN 4108.....	30
2 Energieeinsparverordnung (ENEV)	31
2.1 Grundsätzliches	31
2.2 Die wichtigsten Neuerungen der ENEV 2014/2016 auf einen Blick:	31
2.3 Auswirkungen der EnEV auf die Planungs- und Beratungstätigkeit	32
Beispiel 2.1: Einfamilienhaus in Holztafelbauweise	33
Beispiel 2.2: Freizeitbad.....	33
2.4 Bereitstellung von Unterlagen und sonstigen Informationen für die Entwicklung eines EnEV-	

Nachweises.....	34
2.5 Vorgehensweise zum Erstellen eines EnEV-Nachweises	34
2.6 EnEV-EDV Übung.....	38
3 Bauklimatik	42
3.1 Beispiel 3.1: Mollier – Diagramm	42
Beispiel 3.2: Umrechnung von speziellem Volumen in Dichte	43
Beispiel 3.3: Raumklima	44
4 Feuchteschutz	45
4.1 Grundlagen des Feuchteschutzes	45
Beispiel 4.1: Feuchtetechnische Grundbegriffe (Materialfeuchte)	45
Beispiel 4.2: Wasserdampf-Diffusion	46
4.2 Wasserdampfdiffusion	47
Beispiel 4.3: Vergleich der Wasserdampfdurchlässigkeit verschiedener Baustoffe im Verhältnis zur Luft ..	47
Beispiel 4.5: Ermittlung des Dampfgehaltes w	48
Beispiel 4.6: Ermittlung des Wasserdampfteildruck p	48
Vorgehensweise zur Bestimmung des Tauwasserschutzes im Bauteilquerschnitt	49
Beispiel 4.7: Temperaturverlauf in einem zweischichtigen Bauteil.....	51
Beispiel 4.8: Verlauf des Dampfteildrucks p	52
Beispiel Sättigungsdampfdruck für das Bauteil Wärmedämmung innen.....	53
Beispiel 4.9: Anordnung der Dampfsperrschicht für $m_{w,T} = 0 \text{ kg/m}^2$	55
Beispiel 4.10: Anordnung der Dampfsperrschicht $m_{w,T} = 0.5 \text{ kg/m}^2$	55
Beispiel 4.11: Ermittlung der Verdunstungswasser aus dem Bauteilquerschnitt	56
Beispiel 4.12: Diffusions- und Kondensationsrechnung nach DIN 4108	57
4.3 EDV Übungen	60
Feuchteschutz.....	60
5 Schallschutz	61
5.1 Grundlagen	61
Beispiel 5.1: Wellenlänge.....	61
Beispiel 5.2: Addition mehrerer Schallpegel	61
Beispiel 5.3: Schalldämm-Maß R'	62
Beispiel 5.4: Schalldämm-Maß $R'_{w,res}$ bei Flächenanteilen mit unterschiedlicher Schalldämmung	63
Beispiel 5.5: Grenzfrequenz einschaliger Bauteile.....	64
Beispiel 5.6: Resonanzfrequenz zweischaliger Bauteile	65
Beispiel 5.7: Schallimmissionspegel bei freier Schallausbreitung	66
5.2 Nachweis Luftschalldämmung	70
Beispiel 5.8: Ermittlung von m'	70
Beispiel 5.9: Luftschalldämmung von Innenbauteilen in Massivbauart.....	71
Beispiel 5.10: zweischalige Gebäudetrennwand.....	73
Beispiel 5.11: Luftschalldämmung von Innenbauteilen in Holz- und Skelettbauart.....	74
5.3 Nachweis Trittschallschutz.....	76
Beispiel 5.12 : Trittschallschutz von Decken	76
5.4 Raumakustik	78
Beispiel 5.13 : Berechnung der Nachhallzeit nach Sabine	78
5.5 EDV-Übungen.....	80
Beispiel 5.14	80

1 Wärmeschutz

1.1 Wärmetransport

Beispiel 1.1: Grundlagen Wärmeleitung

**Gegeben:**

- 36,5 cm Ziegelmauerwerk $\lambda_{R} = 0,96 \text{ W/(mK)}$

$$\theta_{se} = -5^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{si} = +20^{\circ}\text{C}$$

Gesucht:

$$q \text{ in W/m}^2$$

Lösung:

Beispiel 1.2: Freie Konvektion entlang einer senkrechten Wand**Gegeben:**

- Lufttemperatur $\theta = +20^{\circ}\text{C}$
- Oberflächentemperatur $\theta_s = +15^{\circ}\text{C}$
- Wandhöhe $l = 2,50 \text{ m}$
- Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Gesucht:

- konvektiver Wärmeübergangskoeffizient h_{cv}

Lösung:

Beispiel 1.3: Strahlungswärmestrom eines HK an eine gegenüberliegende Wand**Gegeben:**

- Heizkörper: $A_1 = 0,60 \text{ m}^2$
 $\theta_1 = +50 \text{ °C}$, $\varepsilon_1 = 0,93$

- Wand: $\theta_2 = +20 \text{ °C}$
 $\varepsilon_2 = 0,89$ (Tapete)

Gesucht:

- Φ in Watt

Lösung:

Beispiel 1.4: Strahlungswärmestrom eines HK an gegenüberliegenden Wänden und Decken**Gegeben:**

Strahlungswärmestrom des gleichen Heizkörpers an die gesamte Raumschale $A_2 = 100\text{m}^2$

Gesucht:

- Φ in Watt

Lösung:

1.2 Wärmedurchgang

Beispiel 1.5: Berechnung des Wärmedurchgangs durch eine Außenwand

Gegeben:

Bauteilaufbau (von innen nach außen)

10mm Innenputz ($\lambda = 0,87 \text{ W/(mK)}$)365 mm Vollziegel ($\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,81 \text{ W/(mK)}$)10mm Außenputz ($\lambda = 0,87 \text{ W/(mK)}$)

$$\theta_i = +20^\circ\text{C} \quad R_{si}=0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\theta_e = - 5^\circ\text{C} \quad R_{se}=0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$$

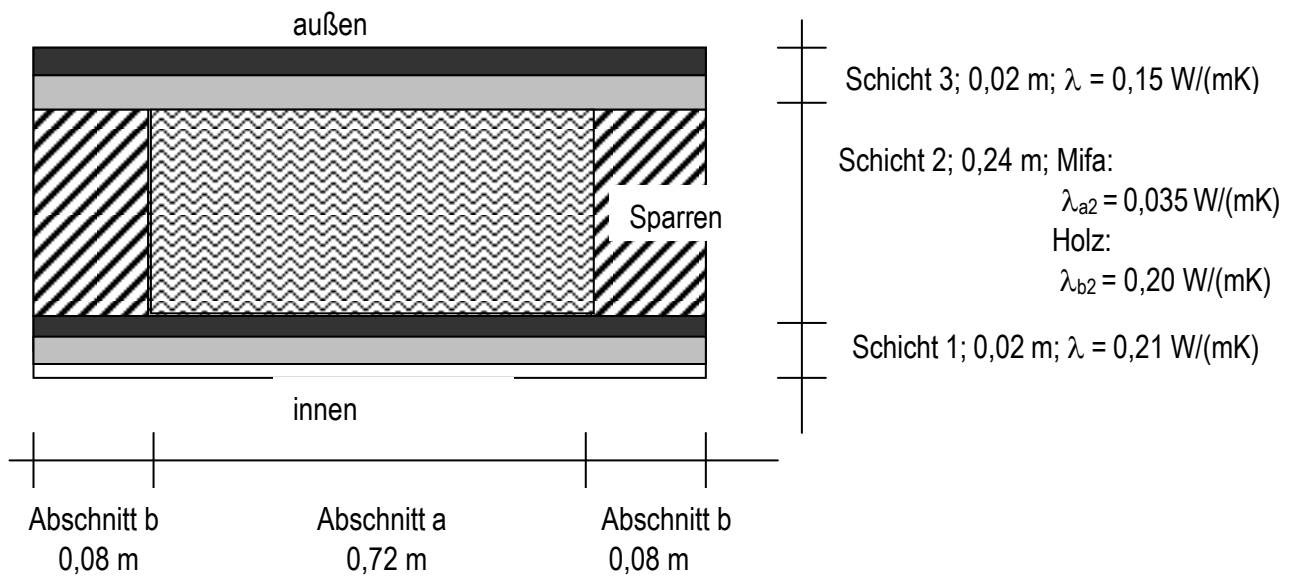
Gesucht: θ_{si} , U, q**Lösung:**

Beispiel 1.6: Wärmedurchgang durch eine Außenwand mit WDVS**Gegeben:**

Bauteilaufbau (von innen nach außen):

- 10 mm Innenputz ($\lambda = 0,87 \text{ W/(mK)}$)
- 365 mm Vollziegel ($\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,81 \text{ W/(mK)}$)
- 100 mm Wärmedämmung WLG 040
- 10 mm Außenputz ($\lambda = 0,87 \text{ W/(mK)}$)
- $\Theta_i = 20^\circ\text{C}$; $\Theta_e = -5^\circ\text{C}$

Gesucht: θ_{si} , U, q**Lösung:**

Beispiel 1.7: Wärmedurchgang durch ein Dach mit inhomogenen Schichten**Gegeben:**

Wärmestrom von innen nach außen (aufwärts)

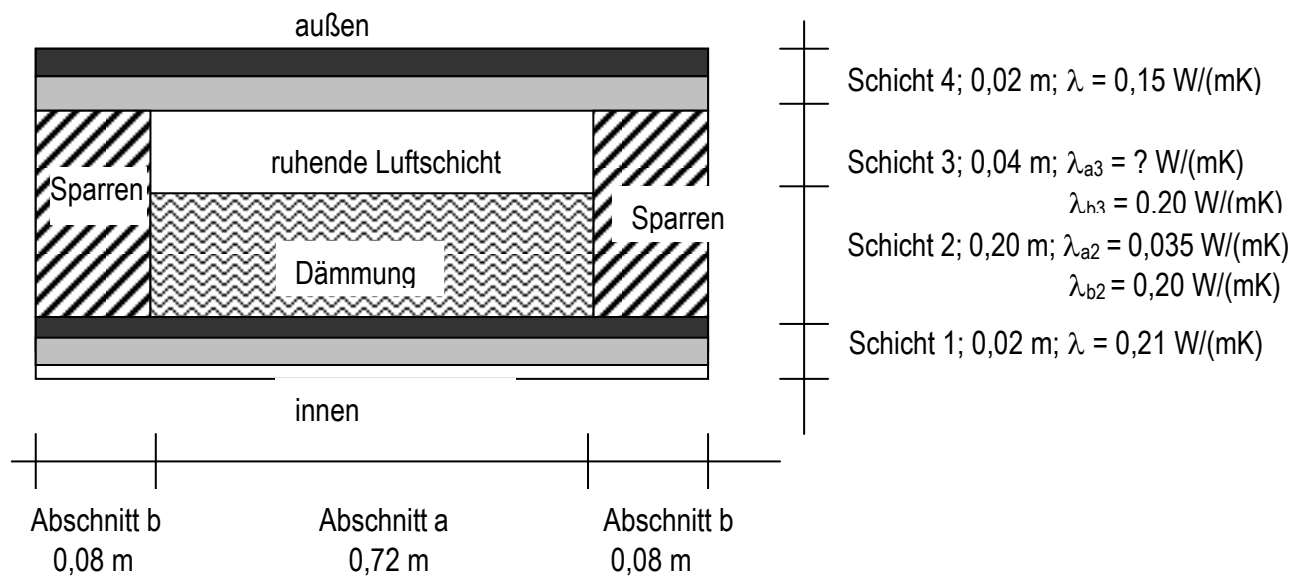
- Gesucht:**
- 1.) Wärmedurchlaßwiderstand an der ungünstigsten Stelle R_{\min}
 - 2.) mittlerer Wärmedurchgangswiderstand R_T
 - 3.) mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient U

Lösung:

Beispiel 1.8: Wärmedurchgang durch ein geneigtes Dach mit inhomogenen Schichten und ruhender Luftschicht

Gegeben:

Folgender Bauteilaufbau



Wärmestrom von innen nach außen (aufwärts)

Gesucht:

R_T und U

Lösung:

Beispiel 1.9: Wärmedurchgang durch ein Zweischaliges Mauerwerk mit Luftschicht

Gegeben ist folgende Außenwandkonstruktion (Aufbau von innen nach außen):

- 115 mm aus Klinker (Rohdichteklasse 1,8)
- 40 mm Luftschicht
- 100 mm Wärmedämmung aus Mineralfaser
- 240 mm Mauerwerk aus Kalksandstein (Rohdichteklasse 1,4)

Baustoff	Schichtdicke d [mm]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ_R [W/(mK)]	Emissionsgrad für Wärmestrahlung ε [-]
Verblendmauerwerk Mauerwerk aus Klinker	115	1800	0,63	0,93
Luft (-15...-10 °C)	40	-	$R_L = 0,09$	-
Mineralfaserdämmung	100	-	0,04	0,89
Mauerwerk aus Kalksand- stein	240	1400	0,70	-

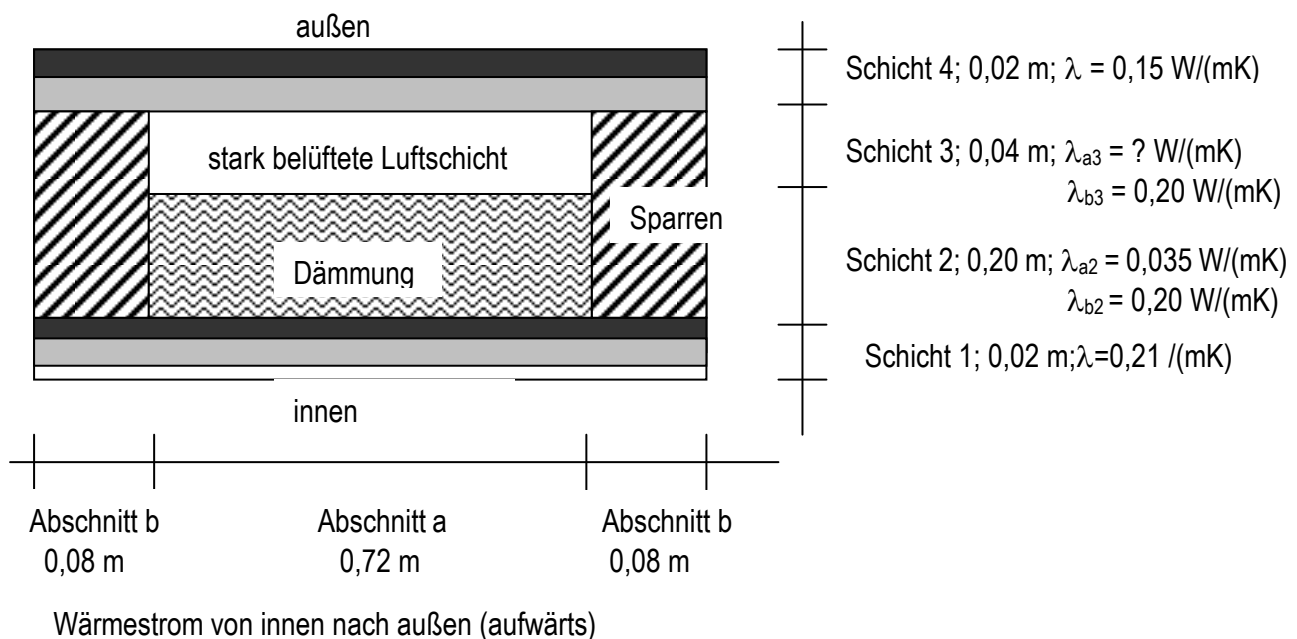
In der untersten und der obersten Lage des Verblendmauerwerkes ist jede zweite Stoßfuge offen ausgebildet. Dies entspricht einer Querschnittsfläche von jeweils 1 000 mm² / m Wandlänge.

Gesucht :

1. Berechnen Sie den Wärmedurchgangskoeffizienten nach DIN EN ISO 6946.
2. Berechnen Sie den flächenbezogenen Wärmestrom für dieses Bauteil für den stationären Fall bei folgenden Klimabedingungen: Außenlufttemperatur $\theta_e = -15^\circ\text{C}$
Innenlufttemperatur $\theta_i = +20^\circ\text{C}$
keine Sonnenstrahlung
3. Wie groß ist der Strahlungswärmeaustausch zwischen Wärmedämmung und Verblendmauerwerk ? Gehen Sie von der Annahme aus, dass sich Gesamtwärmestrom und Temperaturverlauf im Bauteil nach den Berechnungsvorschriften aus DIN EN ISO 6946 einstellen.

Lösung:

Beispiel 1.10: Wärmedurchgang durch ein Bauteil mit inhomogenen Schichten und stark belüfteter Luftschicht



Anmerkung: Stark belüftete Luftschichten werden **nicht wärmedämmend** betrachtet. Bauteilschichten werden nur bis Oberkante der Wärmedämmung im Gefach berücksichtigt. Der äußere Wärmeübergangswiderstand darf mit gleichem Wert wie der innere angesetzt werden, d.h. $R_{se} = R_{si}$, da durch die geringere Windgeschwindigkeit im Gefach gegenüber der Außenoberfläche ein höherer Wärmeübergangswiderstand vorhanden ist.

Gesucht:

R_T und U

Lösung:

Beispiel 1.11: Wärmedurchgang durch ein Fenster mit Einfachrahmen und Dreifachverglasung

Gegeben: Der Entwurf zum wärmetechnischen Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen enthält in seinem Teil 1 ein vereinfachtes Berechnungsverfahren zur Berechnung der U-Werte für unterschiedliche Fensterkonstruktionen und soll später DIN 4108 Teil 4 Tab. 3 ersetzen.

Neu in E DIN EN 10077 ist, dass der U_f -Wert von Profilen nach DIN EN 12412-2 gemessen oder nach DIN EN 10077-2 berechnet werden kann und der Übergang Glasrahmen bzw. die Wärmebrücke „Isolierglasrand“ durch einen wärmebezogenen Koeffizienten Ψ berücksichtigt wird.

Gesucht: Prüfen Sie anhand des einfachen Berechnungsnachweises, welchen U_f -Wert der Rahmen ($\Psi_1 = 0,04 \text{ W/(mK)}$) eines Einfachfensters aufweisen muss, damit mit einer Argongefüllten Dreifachverglasung mit $U_g = 0,7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und $\Psi_2 = 0,02 \text{ W/(mK)}$ der U_w -Wert des Fensters einen Wert von $U_w = 0,8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ erreicht. Der Rahmen des $4,2 \text{ m}^2$ Fläche umfassenden Fensters nimmt 30 % ein. Der Gesamtumfang der Verglasung beträgt $3,50 \text{ m}$.

Zusatzfrage: Wie kann dieser geringe U_w -Wert erreicht werden?

Lösung:

1.3 Wärmeübertragung

Beispiel 1.12: Wärmeübertragung über das Erdreich, Bodenplatte auf Erdreich

Beispiel 1.13: Wärmeübertragung über das Erdreich, beheizter Keller

Beispiel 1.14: Wärmeübertragung über das Erdreich, unbeheizter oder teilweise beheizter Keller

Beispiel 1.15: Wärmedurchgang durch nicht transparente Bauteile mit Sonnenstrahlung

Berechnet werden soll die Wärmestrombilanz und die sich im stationären Fall einstellenden Oberflächentemperaturen bei einem ungedämmten Steildach mit Eindeckung und Unterspannbahn.

Der Systemaufbau des zu berechnenden Bauteilquerschnittes ist wie folgt (Aufbau von außen nach innen):

- Dacheindeckung auf Dachlattung
- Luftschicht (schwach durchlüftet)
- Unterspannbahn

Der Berechnung werden sinnvolle Annahmen und Vereinfachungen zugrunde gelegt:

1. Zwischen Dacheindeckung und Unterspannbahn wird nur der Wärmeaustausch infolge Wärmestrahlung berücksichtigt. Konvektion und Wärmeleitung werden aufgrund ihrer geringeren Anteile vernachlässigt.
2. Der äußere Wärmeübergang an die Dacheindeckung und der innere Wärmeübergang von der Unterspannbahn an die Innenluft des Dachraumes werden als konstante Größen vorgegeben.
3. Da nur der Wärmedurchgang des Bauteiles und nicht die gesamte Klimabilanz des Dachraumes berechnet wird, muss die Innenlufttemperatur des Innenraumes vorgegeben werden. Damit erhält die Berechnung einen universellen Charakter.
4. Die Wärmeleitung in den Bauteilschichten Dacheindeckung und Unterspannbahn wird vernachlässigt, so dass die äußere Oberflächentemperatur gleich der inneren Oberflächentemperatur bzw. der mittleren Materialtemperatur der jeweiligen Schicht ist.

Gegeben:

- Außenlufttemperatur θ_e
- Innenlufttemperatur θ_i
- senkrecht einfallende Gesamtstrahlung auf die Dachfläche I ; mit zunehmender Dachneigung wird die Strahlungsintensität geringer.
- Absorptionskoeffizient für Sonnenstrahlung a
- Emissionsgrad für Dacheindeckung ε_D und Unterspannbahn ε_{USB}
- äußerer Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion und Strahlung h_e
- innerer Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion und Strahlung h_i

Gesucht:

- Temperatur der Dacheindeckung θ_D
- Temperatur der Unterspannbahn θ_{USB}

Lösung:

Beispiel 1.16: Wärmeübertragung über ein Flachdach

Gegeben ist folgende Flachdachkonstruktion (Aufbau von oben nach unten):

- bituminöse Dachabdichtung (schwarz)
- 180 mm Wärmedämmung aus Mineralfaser
- Dampfsperre
- 250 mm Stahlbetondecke

Baustoff	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ_R [W/(mK)]	Emissionsgrad für Wärmestrahlung ϵ	Absorptionskoeffizient für Sonnenstrahlung a [-]
Kiesschüttung	1800	0,70	0,93	0,40
Bitumendachbahn	-	-	0,93	0,95
Mineralfaserdämmung	-	0,04	0,89	-
Stahlbeton	2400	2,1	-	-
Luft (-15...-10 °C)	-	0,024	-	-

Ferner liegen folgende Bedingungen vor (Sommerfall):

Innenlufttemperatur: $\theta_i = + 24 \text{ °C}$

Außenlufttemperatur: $\theta_e = + 32 \text{ °C}$

Sonnenstrahlung (Gesamtstrahlung auf eine horizontale Fläche): $I = 800 \text{ W/m}^2$

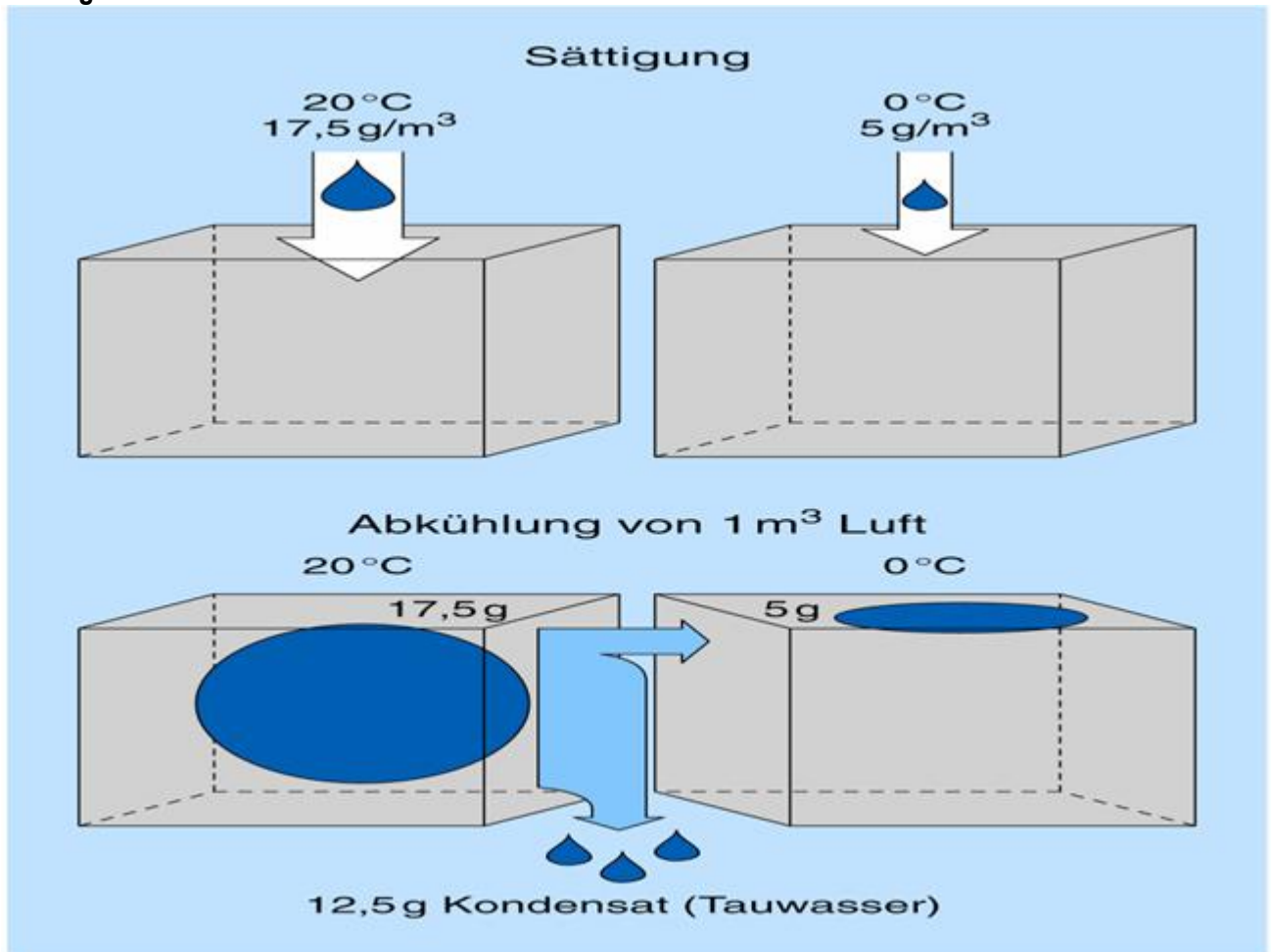
innerer Wärmeübergangskoeffizient: $h_i = 5,9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

äußerer Wärmeübergangskoeffizient: $h_e = 25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Gesucht:

1. Berechnen Sie die Oberflächentemperatur für den stationären Fall.
2. Berechnen sie den flächenbezogenen Wärmestrom für den stationären Fall.
3. Um die Wärmebelastung im Sommer zu reduzieren, erhält das Flachdach eine 50 mm hohe Kiesschüttung. Um wieviel Prozent kann der Wärmestrom dadurch verringert werden ?
4. Bewerten Sie die Berechnungsergebnisse unter Berücksichtigung des zugrunde gelegten stationären Sonderfalles. Wie werden sich die Verhältnisse tendenziell in Realität darstellen und zu welcher Tageszeit wird die vom Wärmedurchgang durch das Flachdach verursachte Wärmebelastung im darunter befindlichen Raum am höchsten sein ?

Lösung :

Tauwasser**Aufgabe:** Erläutern sie folgende Begriffe: Tauwasser, Taupunkttemperatur**Lösung:**

Beispiel 1.17: Berechnung von θ_{si} (Wärmebrücken)**Gegeben:**

- a: Bauteil 1 mit $R_1 = 0,55 \text{ m}^2\text{K/W}$, $\theta_i = 20^\circ\text{C}$; $\theta_e = -15^\circ\text{C}$ \Rightarrow alte DIN
b: Bauteil 2 mit $R_2 = 1,20 \text{ m}^2\text{K/W}$; $\theta_i = 20^\circ\text{C}$; $\theta_e = -15^\circ\text{C}$ \Rightarrow neue DIN
c: Bauteil 3 mit $R_{si} = 0,25$; $R_{se} = 0,04$; $\theta_i = 20^\circ\text{C}$; $\theta_e = -5^\circ\text{C}$ \Rightarrow neue DIN

Gesucht: θ_{si} **Lösung:**

Beispiel 1.18: Berechnung der zulässigen rel. Luftfeuchte ϕ_{si} **Gegeben:**

- a:** Bauteil 1 mit $R_1 = 0,55 \text{ m}^2\text{K/W}$, $\theta_i = 20^\circ\text{C}$; $\theta_e = -15^\circ\text{C}$ \Rightarrow alte DIN
b: Bauteil 2 mit $R_2 = 1,20 \text{ m}^2\text{K/W}$; $\theta_i = 20^\circ\text{C}$; $\theta_e = -15^\circ\text{C}$ \Rightarrow neue DIN
c: Bauteil 3 mit $R_{si} = 0,25$; $R_{se} = 0,04$; $\theta_i = 20^\circ\text{C}$; $\theta_e = -5^\circ\text{C}$ \Rightarrow neue DIN

Gesucht: zulässige relative Raumlufteuchte ϕ_i

Lösung:

1.4 Wärmebrücken

Massnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzen und Tauwasser auf der raumseitigen Bauteiloberfläche

Nachweis:

1. Ecken von Aussenwänden mit gleichartigen Aufbau benötigen keinen Nachweis (da $R_{\min} \geq 1,2 \text{ m}^2\text{K/W}$)
2. Nachweis: $f_{R_{si}} \geq 0,7$
3. Nachweis: $\phi_{si} \leq 80\%$

Beispiel 1.19: Massnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung

Gegeben: Aussenkante eines Bauteils, dessen Wärmedurchlasswiderstand im ungestörten Bereich nicht die Anforderungen nach DIN 4108-2; Tabelle 3 erfüllen.

$$\theta_i = 20^\circ\text{C}; \theta_e = -5^\circ\text{C}; \phi_i = 50\%$$

Gesucht: Wie groß muss θ_{si} sein, damit Schimmelpilzbildung bei diesem Bauteil vermieden werden kann?

Lösung:

Beispiel 1.20: Tauwasserfreiheit auf der raumseitigen Bauteiloberfläche

Frage: Bei welcher Innentemperatur wird Tauwasserfreiheit garantiert? Welchem f_{Rsi} entspricht dies?

Gegeben: $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

Lösung:

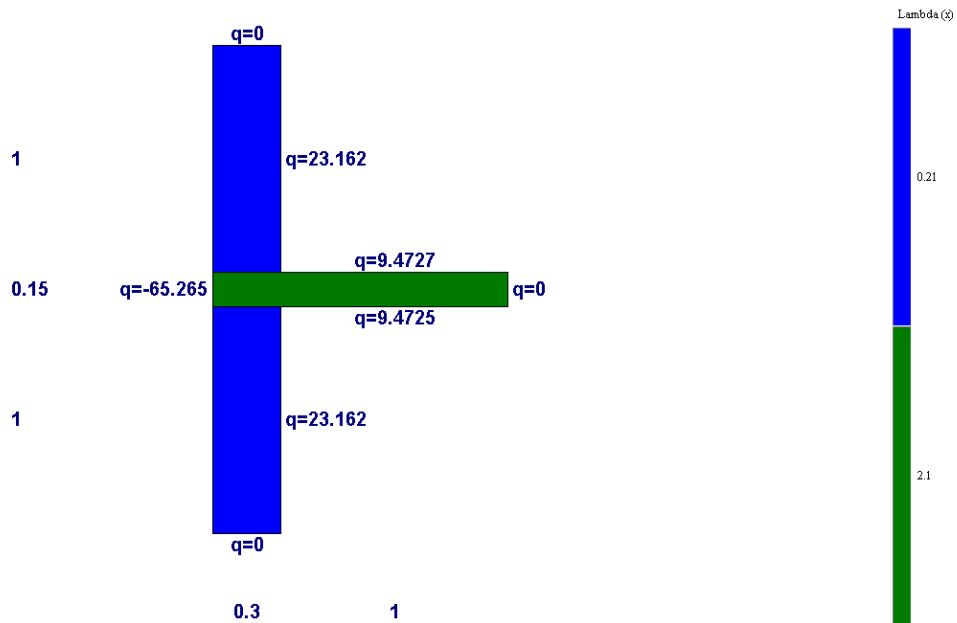
Beispiel 1.21: Beurteilungskriterien der Feuchte der raumseitigen Bauteiloberfläche

Frage: Welche Anforderungen müssen zum Schutz von Konstruktionen eingehalten werden?

Lösung:

Beispiel 1.22 : Einbindung einer Stahlbetondecke in eine Außenwand

Einbindung einer Stahlbetondecke in eine Außenwand aus hochporosierten Leichthochlochziegeln. Die Modellierung der zweidimensionalen Wärmebrücke erfolgt gemäß DIN EN ISO 10211-2.

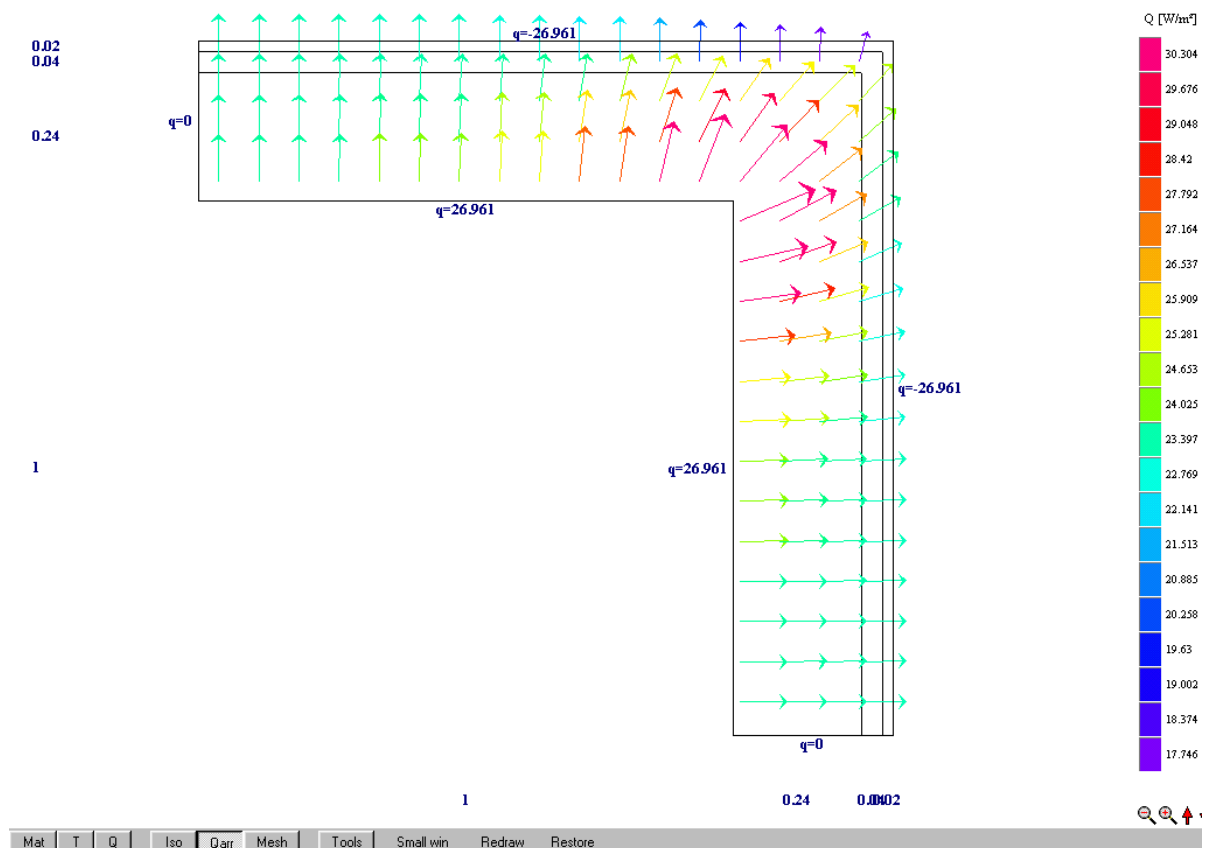


Die numerische Berechnung der Wärmestromverteilung im Bauteil liefert folgendes Ergebnis:

$q_l = 65,26 \text{ W/m}$

Beispiel 1.23 : Gebäudeaußenkante einer Mauerwerkswand

Gebäudeaußenkante aus einer Mauerwerkswand mit WDVS gem. Beispiel aus der EDV-Übung. Die Modellierung der zweidimensionalen Wärmebrücke erfolgt gemäß DIN EN ISO 10211-2.



Die numerische Berechnung der Wärmestromverteilung im Bauteil liefert folgendes Ergebnis:

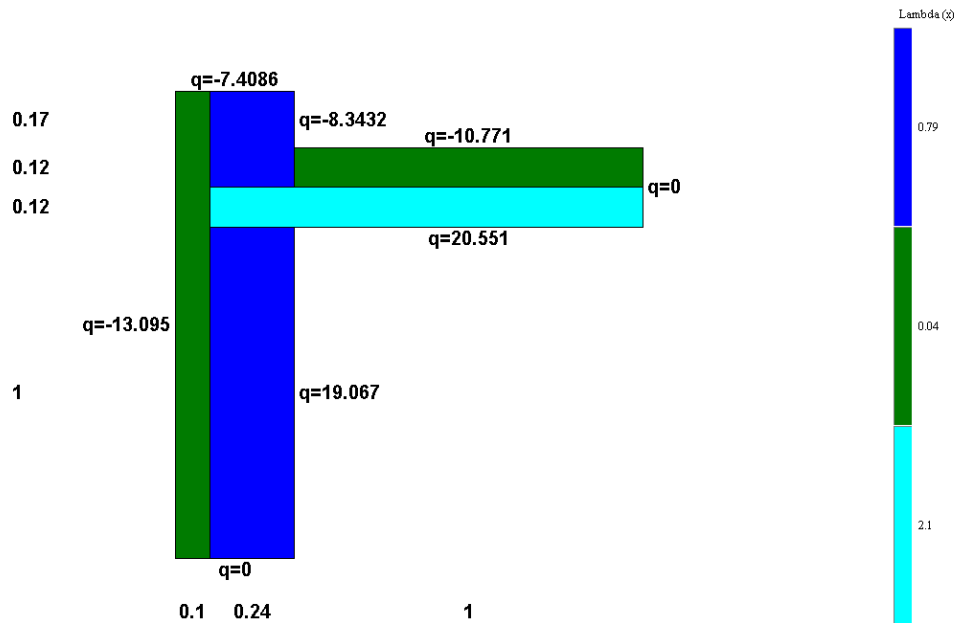
$$q_l = (26,961 + 26,961) = 53,922 \text{ W/m} \quad \text{nach EDV-WB}$$

Die numerische Berechnung der Wärmestromverteilung im Bauteil liefert folgendes Ergebnis:

$$q_l = (13,095 + 7,4086 + 8,3432 + 10,771) = 39,62 \text{ W/m}$$

Beispiel 1.24 : Flachdachanschluss mit Attika

Flachdachanschluss mit Attika. Die Modellierung der zweidimensionalen Wärmebrücke erfolgt gemäß DIN EN ISO 10211-2.



Die numerische Berechnung der Wärmestromverteilung im Bauteil liefert folgendes Ergebnis:

$$q_l = (13,095 + 7,4086 + 8,3432 + 10,771) = 39,62 \text{ W/m}$$

1.5 EDV Übungen

Computergestützte Berechnung von Wärmebrücken mit dem Programm HEAT

1.5.1.1 Vorgehensweise

Skizze der Wärmebrücke
 Eingabe der Geometrie und Bauteileigenschaften
 Berechnung der Wärmebrücke
 Auswertung der Ergebnisse

1.5.1.2 Skizze der Wärmebrücke (siehe Aufgabe 5.1)

Skizze groß und übersichtlich
 Einteilung in Zellen (Rechtecke) gleicher Wärmeleitfähigkeit
 Bemaßung
 Festlegen der Schnittebene (- in 1m Abstand vom zentralen Element, - siehe auch DIN EN ISO 10211-1 bzw. Tabelle I)

Angaben zu R_{si}

DIN 4108-2, Seite 12 \Rightarrow „Massnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung“

$$\Theta_i = 20^\circ\text{C}$$

$$R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W (beheizte Räume)}$$

$$= 0,17 \text{ m}^2\text{K/W (unbeheizte Räume)}$$

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

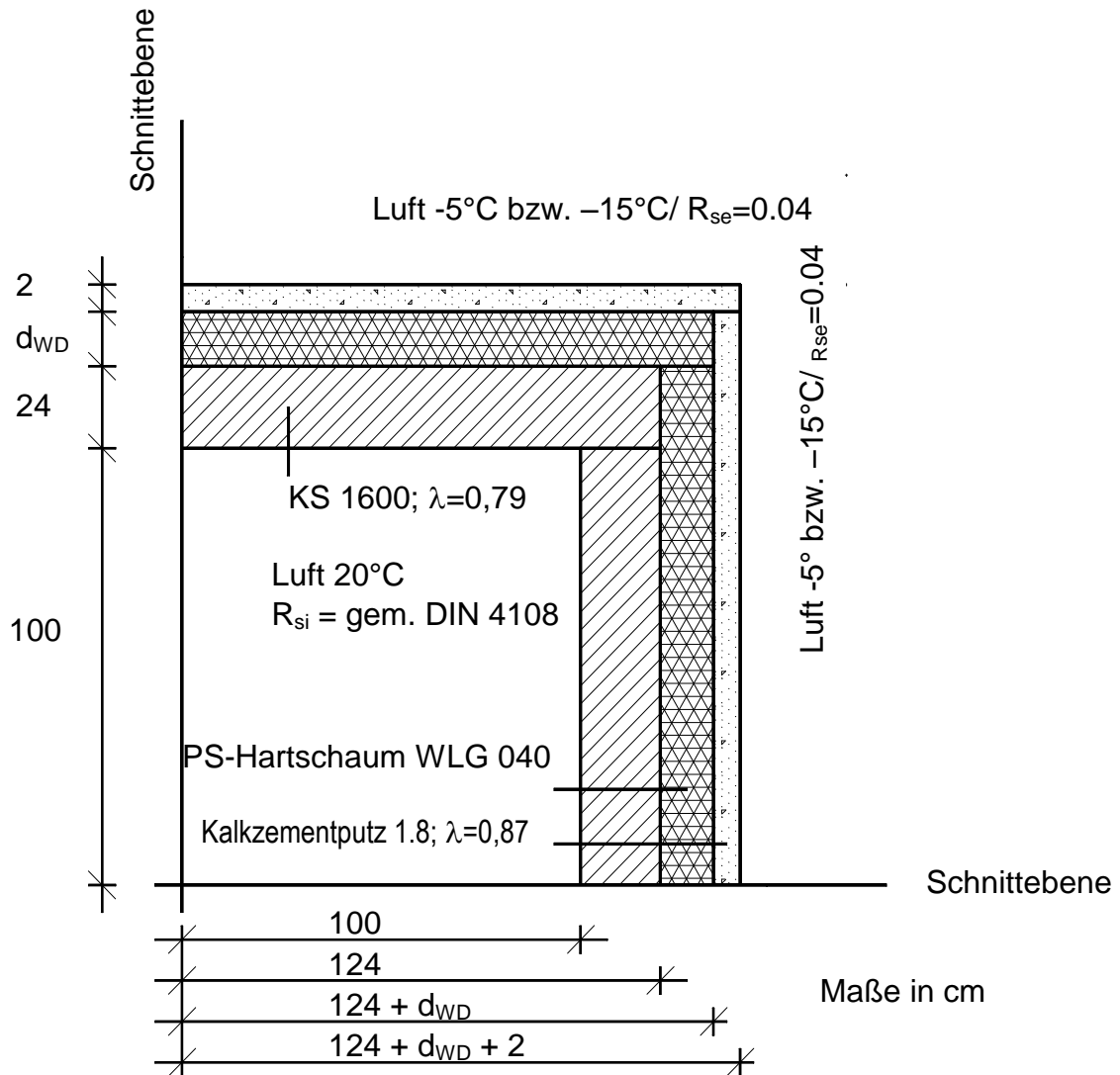
$$\Theta_e = -5^\circ\text{C}$$

DIN EN ISO 6946, Seite 4 Tabelle 1 \Rightarrow Vermeidung erhöhter Transmissionswärmeverluste

Richtung des Wärmestromes			
	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
R_{si}	0,10	0,13	0,17

Bei Wärmebrücken in Bauteilen, die an das Erdreich oder an unbeheizte Kellerräume und Pufferzonen grenzen, muss von den in der nachfolgenden Tabelle angegebenen Randbedingungen ausgegangen werden.

Gebäudeteil bzw. Umgebung	Temperatur, Θ [$^\circ\text{C}$]
Keller	10
Erdreich	10
Unbeheizte Pufferzone	10
Unbeheizter Dachraum	-5



Richtung	Berechnungszweck	
	Oberflächentemperaturen	Wärmestrom
Horizontaler Abstand im Gebäude	mindestens 1m	0.5b
Horizontaler Abstand außerhalb des Gebäudes	gleicher Abstand wie innerhalb des Gebäudes	2.5b
Vertikaler Abstand unter Fußbodenniveau	3m	2.5b
Vertikaler Abstand unter Fußbodenniveau (siehe Anmerkung)	1m	-
Dabei ist b die Breite (das kleiner Maß) der Fußbodenoberfläche, in m		
Anmerkung: Dieser Wert gilt nur dann, wenn das Niveau des betrachteten Fußbodens mehr als 2m unter dem Erdbodenniveau liegt.		

Tabelle I Schnittebenen im Untergrund (Gründungen, Fußböden über Erdreich, Keller) [DIN EN ISO 10211-1]

1.5.1.3 Eingabe der Geometrie und Bauteileigenschaften

Starten des Programms HEAT ⇒
Hauptfenster
Pre- Processor
Post- Processor
Material- Picklist

Projektbeschreibung

Hauptfenster

file ⇒ project- info ⇒ Projekt- Name, -Nr., Datum, etc.

Benennung Wärmebrücke

Hauptfenster

file ⇒ save Dat ⇒ Namen eingeben: *Aussenecke*

Eingabe von eigenen Baustoffen und Konstruktionen

Pre- Processor

- ggf. neue Materialliste laden: Material ⇒ Edit ⇒ Open Materialfile
- ggf. neues Material eingeben: Material ⇒ Edit ⇒ Edit ⇒ Insert new record

- Rechteck aufziehen, Material auswählen, Größe bestimmen
- Validate: Die gemachten Änderungen werden überprüft
- Update: Die Änderungen (Geometrie, Material, etc.) werden übernommen und tauchen im Post- Processor auf

Eingabe der Wärmeübergangsbedingungen, Randbedingungen

Hauptfenster

Input ⇒ Mesh in x- direction ⇒ Anzahl von Zellen (Cells) so eingeben, dass Anforderungen EN ISO 10211-2 erfüllt werden (für y- Richtung entsprechend verfahren)

Input ⇒ Boundary conditions ⇒ Temperatur für Innen und Außen und Wärmeübergangswiderstände bzw. adiabatisch ($Q = \text{const.}$) angeben

1.5.1.4 Berechnung der Wärmebrücke

Hauptfenster

Solve ⇒ start stady- state calculation

Post- Processor

Anzeigemöglichkeiten: Mat ⇒ Materialanzeige
T ⇒ Temperaturverlauf
Q ⇒ Wärmestromverlauf
Iso ⇒ Isothermen
Qarr ⇒ Wärmestromverlauf (mit Richtungspfeilen)
Mesh ⇒ Gitternetz

1.5.1.5 Auswertung der Ergebnisse

Gefordert: rel. Luftfeuchtigkeit an der Bauteiloberfläche $< 80\%$

übliches Raumklima: 20°C und 50% relative Luftfeuchte \Rightarrow Oberflächentemperatur $> 12,5^{\circ}\text{C}$ (+ Sicherheit 13°C) \Rightarrow diese sollte an jeder Stelle der raumseitigen Bauteiloberfläche erreicht werden

1.6 Sommerlicher Wärmeschutz

Beispiel 1.25 : Sommerlicher Wärmeschutz nach DIN 4108

2 Energieeinsparverordnung (ENEV)

2.1 Grundsätzliches

Die Energieeinsparverordnung ist eine öffentlich-rechtliche Vorschrift, deren Beachtung (anders als bei DIN) uneingeschränkte Verbindlichkeit besitzt.

Eine teilweise oder vollständige Befreiung von den Anforderungen der EnEV bei der Erneuerung bestehender Gebäude ist dann erforderlich, wenn bautechnische oder denkmalpflegerische Zwänge zu Maßnahmen führen würden, die entweder gegen die Regeln der Technik (z. B. baulicher Feuchteschutz bei Innendämmung) oder gegen das Wirtschaftlichkeitsgebot nach § 5, Abs. 1 des Energieeinsparungsgesetzes¹ verstoßen.

Die von der Bundesregierung im Oktober 2013 verabschiedete Novelle der Energieeinsparverordnung (EnEV) ist am 1. Mai in Kraft getreten. Die energetischen Standards für Neubauten werden ab Januar 2016 in einem Schritt um 25 Prozent steigen. Zudem wird der Endenergiebedarf von Gebäuden im Energieausweis künftig nicht mehr nur über den bereits bekannten Bandtacho angezeigt, sondern zusätzlich in Form von Energieeffizienzklassen dargestellt werden. Außerdem müssen alte Heizkessel auf Basis flüssiger oder gasförmiger Brennstoffe nach 30 Jahren Betriebszeit erneuert werden (nicht betroffen sind Niedertemperatur- und Brennwertkessel). Für Bestandsgebäude sind darüber hinaus keine wesentlichen Verschärfungen vorgesehen. Die Neufassung der EnEV setzt die Europäische Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden sowie verschiedene Beschlüsse der Bundesregierung zur Energiewende um.

2.2 Die wichtigsten Neuerungen der ENEV 2014/2016 auf einen Blick:

1. Verschärfung der primärenergetischen Anforderungen (Gesamtenergieeffizienz) an neu gebaute Wohn- und Nichtwohngebäude um 25 Prozent ab 1.1.2016. Die Wärmedämmung der Gebäudehülle muss zudem im Schnitt etwa 20 Prozent besser ausgeführt werden.
2. Heizkessel, die mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen betrieben werden und nach dem 1.1.1985 eingebaut wurden, müssen nach 30 Jahren außer Betrieb genommen werden. Wurden die entsprechenden Heizkessel vor 1985 eingebaut, dürfen diese schon ab 2015 nicht mehr betrieben werden. Ausnahmen gelten für Niedertemperatur- und Brennwertkessel sowie für bestimmte selbstnutzende Ein- und Zweifamilienhausbesitzer.
3. Oberste Geschossdecken in Bestandsgebäuden, die nicht den Mindestwärmeschutz erfüllen, müssen ab dem 1.1.2016 gedämmt sein (U-Wert kleiner/gleich $0,24 \text{ W/m}^2 \text{ K}$). Die Forderung gilt als erfüllt, wenn das darüber liegende Dach gedämmt ist oder den Mindestwärmeschutz erfüllt.
4. Für den Gebäudebestand sind darüber hinaus keine wesentlichen Verschärfungen vorgesehen.
5. Neuskalierung des Bandtachos im Energieausweis für Wohngebäude bis $250 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und Stärkung der Modernisierungsempfehlungen. Der Bandtacho wird zusätzlich durch Energieeffizienzklassen von A+ bis H ergänzt.
6. Verkäufer und Vermieter von Immobilien sind künftig verpflichtet, den Energieausweis an Käufer bzw. Mieter zu übergeben. Der Energieausweis muss bereits bei der Besichtigung vorgelegt werden.

¹...Die in den Rechtsverordnungen nach den §§ 1 bis 4 aufgestellten Anforderungen müssen nach dem Stand der Technik erfüllbar und für Gebäude gleicher Art und Nutzung wirtschaftlich vertretbar sein. Anforderungen gelten als wirtschaftlich vertretbar, wenn generell die erforderlichen Aufwendungen innerhalb der üblichen Nutzungsdauer durch die eintretenden Einsparungen erwirtschaftet werden können. Bei bestehenden Gebäuden ist die noch zu erwartende Nutzungsdauer zu berücksichtigen.

7. Energetische Kennwerte (Endenergie) müssen künftig im Falle des Verkaufs oder der Vermietung in Immobilienanzeigen angegeben werden. Liegt ein Energieausweis mit Energieeffizienzklasse vor, muss die entsprechende Einstufung auch veröffentlicht werden.
8. Erweiterung der Aushangpflicht für Energieausweise für öffentliche Gebäude mit starkem Publikumsverkehr ab 500 m² Nutzfläche (ab dem 8. Juli 2015 mehr als 250 m²) und entsprechende private Gebäude ab 500 m² Nutzfläche.
9. Senkung des Primärenergiefaktors von Strom auf 2,4 und ab 2016 auf 1,8.
10. Einführung von Stichprobenkontrollen für Energieausweise.
11. Einführung eines Kontrollsystems für Inspektionsberichte von Klimaanlage.

2.3 Auswirkungen der EnEV auf die Planungs- und Beratungstätigkeit

- Erhöhter Aufwand, insbesondere auch bei der Flächenberechnung und Zonierung
- Grundlage bleibt die DIN 4108, etc.
- Wärmebrückenproblematik rückt auch aus energetischer Sicht mehr in den Vordergrund planerischer Überlegungen. Das Beiblatt 2 der DIN 4108 ist ein zentrales Planungsinstrument.
- Gebäudedichtigkeit wird verstärkt Planungsgegenstand.
- Die Anforderungen an den energiesparenden sommerlichen Wärmeschutz werden gegenüber den bisherigen Anforderungen aus der WSchV verschärft und denen der DIN 4108 angepasst.
- Die Fugendurchlässigkeit von außenliegenden Fenstern und Fenstertüren wird in Klassen der Fugendurchlässigkeit nach DIN EN 12 207 (so genannte Euro-Klassen) angegeben.
- Besondere Zusatzanforderungen an Wärmedämmung unterhalb von Fußbodenheizungen, Wärmedämmung von Rollladenkästen, Heizkörpernischen oder Heizkörpern vor Außenverglasungen entfallen. Hieraus resultierende ungünstige Einflüsse werden z. B. in Form des Wärmebrückennachweises oder detaillierter Wärmeübertragungsberechnungen erfasst, so dass keine Extraregelungen notwendig sind.
- Im Sinn der EnEV sind Vorhangfassaden Warmfassaden in Leichtbauweise, z. B. in einer Pfosten-Riegel-Konstruktion mit Ausfachungen aus Verglasung und / oder Wärmedämmpaneelen. Dies widerspricht dem bisherigen Begriffsverständnis einer Vorhangfassade. Nach DIN 18516 sind vorgehängte Fassaden gleichbedeutend mit Außenwandbekleidungen
- Die Anforderungen an die Rohrdämmung von Verteilungsleitungen beziehen sich nicht mehr wie bisher auf die Nennweite DN sondern auf den Innendurchmesser. Außerdem darf die Dämmwirkung der Rohrwand selbst mit angesetzt werden.
- Grundlage aller Nachweisverfahren sind nicht mehr die im Bundesanzeiger amtlich bekannt gegebenen Rechenwerte sondern Bemessungswerte nach DIN V 4108-4. Diese werden aus Nennwerten der europäisch harmonisierten Produktnormen ermittelt.
- Die Zuordnung zu den HOAI-Leistungsbildern Thermische Bauphysik und Technische Ausrüstung sowie die Honorierung sind noch ungeklärt.

Beispiel 2.1: Einfamilienhaus in Holztafelbauweise

Vollgeschoss 2, nicht unterkellert

Geometrie:

$A_N \approx 160 \text{ m}^2$, $V_e \approx 510 \text{ m}^3$,

geometrisches Verhältnis: $A/V_e = 0,73$

durchschnittlicher Fensterflächenanteil an Außenwänden: 36 %

erforderlicher Wärmeschutz für WSchV:

Fußboden: 60 mm WD
Außenwände: 140 mm im Gefach + 40 mm flächig
Holzsparrendach: 140 mm im Gefach
Fenster: $U_V = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach BAZ

erforderl. Zusatzdämmung für EnEV:

1. mit Luftdichtigkeitsprüfung:

Fußboden: + 20 mm WD
Außenwände: + 20 mm WD im Gefach
Holzsparrendach: + 20 mm WD im Gefach
Fenster: $U_V = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach BAZ

2. ohne Luftdichtigkeitsprüfung:

Fußboden: + 60 mm WD
Außenwände: + 60 mm WD im Gefach
Holzsparrendach: + 60 mm WD im Gefach
Fenster: $U_V = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach BAZ

Beispiel 2.2: Freizeitbad

Vollgeschoss, unterkellert

Geometrie: $A_G \approx 9\,000 \text{ m}^2$, $V_e \approx 110\,000 \text{ m}^3$

geometrisches Verhältnis: $A/V_e = 0,23$

durchschnittlicher Fensterflächenanteil an Außenwänden: 50 %

mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient (ohne Wärmebrückennachweis $\square U_{WB} = 0,10 \text{ W}/[\text{m}^2\text{K}]$):

$H_{T'} = 0,36 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

WSchV: Anforderung Jahresheizwärmebedarf um 33 % übererfüllt

EnEV: Anforderung Primärenergiebedarf um 7 % übererfüllt

ohne Wärmebrückennachweis, ohne Luftdichtigkeitsprüfung, Fernwärme aus Heizwerk, optimale Anlagentechnik mit Wärmebrückennachweis: 14 % Übererfüllung

2.4 Bereitstellung von Unterlagen und sonstigen Informationen für die Entwicklung eines EnEV-Nachweises

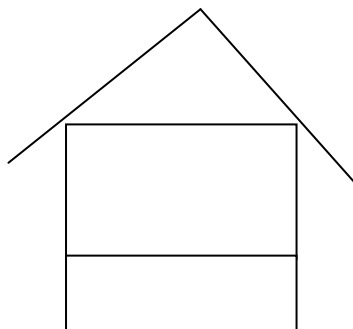
- ◆ Grundrisse, Schnitte und Ansichten; mind. M 1:100 mit Nordpfeil
- ◆ Evtl. Lageplan (Nachbarbebauung, Gebäudeausrichtung)
- ◆ Angaben über Gebäudenutzung (Wohnen, Büro, gemischte Nutzung usw.)
- ◆ Angaben über Temperaturniveau im Gebäude (z.B. Kirche, Turnhalle, Betriebsgebäude...)
 - Normale Innentemperatur $\theta_i \geq +19^\circ\text{C}$ > 4Monate/Jahr
 - Niedrige Innentemperatur $19^\circ\text{C} > \theta_i > 12^\circ\text{C}$ > 4Monate/Jahr
 - $\theta_i \leq 12^\circ\text{C} \Rightarrow$ kein Nachweis erforderlich
- ◆ Angaben über Bauteil- und Fensterkonstruktionen, insbesondere wärmeübertragende Bauteile (\Rightarrow Außenbauteile, Fenster)
 - Abstimmung mit dem Architekten \leftrightarrow Bauphysiker
 - Fenster: U_g nach DIN EN 673 (kein BAZ-Wert)
g-Wert
 - Rahmenmaterial der Fenster (Holz, Kunststoff, Metall)
- ◆ Nachtabsenkung
- ◆ Flächenheizungen (z.B. Fussbodenheizungen) in wärmeübertragenden Bauteilen
- ◆ Glasvorbauten (beheizt oder unbeheizt \Rightarrow Wintergarten)
- ◆ Art der Gebäudelüftung: natürlich, mechanisch
- ◆ Angaben über Sonnenschutzvorrichtungen
- ◆ Normen und Verordnungen (siehe Skript)

2.5 Vorgehensweise zum Erstellen eines EnEV-Nachweises

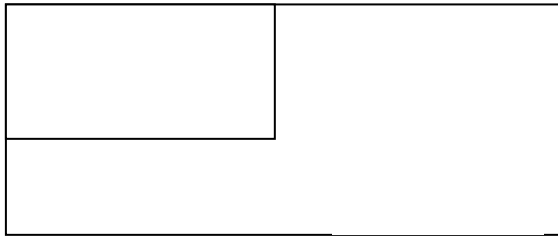
1. Aufteilung des Gebäudes in Temperaturzonen und beheiztes Gebäudevolumen festlegen
 - a) Normal beheizt $\geq 19^\circ\text{C}$
 - b) Niedrig beheizt $13^\circ\text{C} \dots 18^\circ\text{C}$
 - c) Unbeheizt $\leq 12^\circ\text{C}$
 - d) Aussenlufttemperatur ca. -10°C

Beispiele:

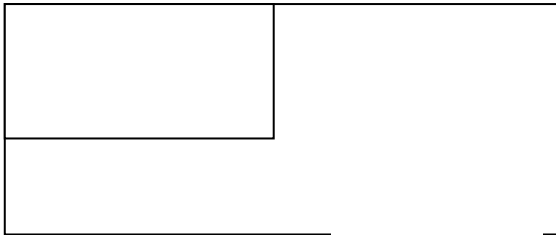
- I. Wohnhaus mit unbeheiztem Kellergeschoss



II. Wohnhaus mit teilweise beheizten Kellergeschoss (z.B. Hobbyraum)

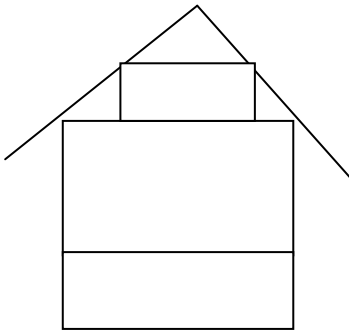


1.Variante: Kellergeschoss zum beheizten Gebäudevolumen hinzurechnen

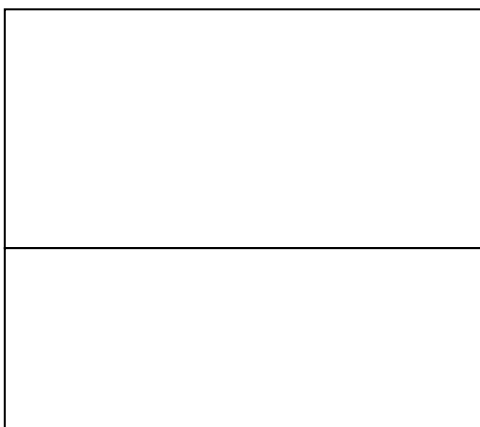


2.Variante: unbeheizten Bereich aus den beheizten Gebäudevolumen herausnehmen

III. Wohnhaus mit ausgebautem Dachgeschoss



IV. Büro- und Geschäftshaus mit Tiefgarage



V. Werkstatt mit Verwaltung

--	--

Variante 1: Verwaltung nach § 3 EnEV

Werkstatt nach § 4 EnEV

Variante 2: Verwaltung + Werkstatt nach § 3 EnEV

Achtung: Die Erhaltung des energieeinsparenden Wärmeschutzes befreit nicht vom Mindestwärmeschutz wärmeübertragender Bauteile (wie z.B. innenliegende Treppenhäuser, innenliegende Technikräume, Traforaum im UG usw)

2. Flächen und Volumenermittlung

- a) Wärmeübertragende Umfassungsfläche A
- b) Beheiztes Gebäudevolumen

Beachte: immer Außenabmaße abnehmen (Aussenkante der letzten dämmenden Schicht), **aber** bei Fenster- und Türöffnungen immer Rohbaumasse abnehmen!

- ◆ Bei der Flächenermittlung systematisch vorgehen:

Empfehlung: - Geschossweise ist günstiger als Fassadenweise
- unterschiedliche Bauteiltypen beachten

Aussenwände	AW1, AW2, AW3...
Fenster	W1, W2, W3...
Türen	T1, T2, T3...
Dächer	D1, D2, D3...
Abseitenwände	AbW1, AbW2...
Wände zu unbeheizten Räumen	AB1, AB2...
Bauteile gegen Erdreich und	G1, G2, G3

- ◆ Bei transparenten Flächen Himmelsorientierung und Verschattung beachten

3. Berechnung der Transmissionswärmeverluste

$$H_T = \sum (F_{xi} \cdot U_i \cdot A_i) + \Delta U_{WB} \cdot A \quad \text{mit } U_{WB} \text{ pauschal (0,05/0,10)}$$

4. Berechnung der Lüftungswärmeverluste

$$H_V = n \cdot V \cdot \varphi_L \cdot c_{PI} \quad n=f(\text{Lüftungsart, Luftdichtheit})$$

5. Berechnung der solaren Wärmegewinne

$$\phi_c = f(\text{Fensterfläche, Strahlungsintensität, Orientierung, Verglasung, Verschattung})$$

6. Berechnung der internen Wärmegewinne

$$\phi_i = f(A_N, \text{Gebäudenutzung})$$

7. Berechnung des Jahres-Heizwärmebedarfes

$Q_N = \text{Verluste} \Leftrightarrow \text{Gewinne}$

8. Nachweis der Transmissionswärmeverluste H_T'

9. Nachweis des Jahres-Primärenergiebedarfs

$$Q_p = (Q_N + Q_W) \cdot e_p \quad \text{mit} \quad e_p = \text{Zuarbeit TGA- Ingenieur}$$

$Q_W = \text{Warmwasserbereitung}$

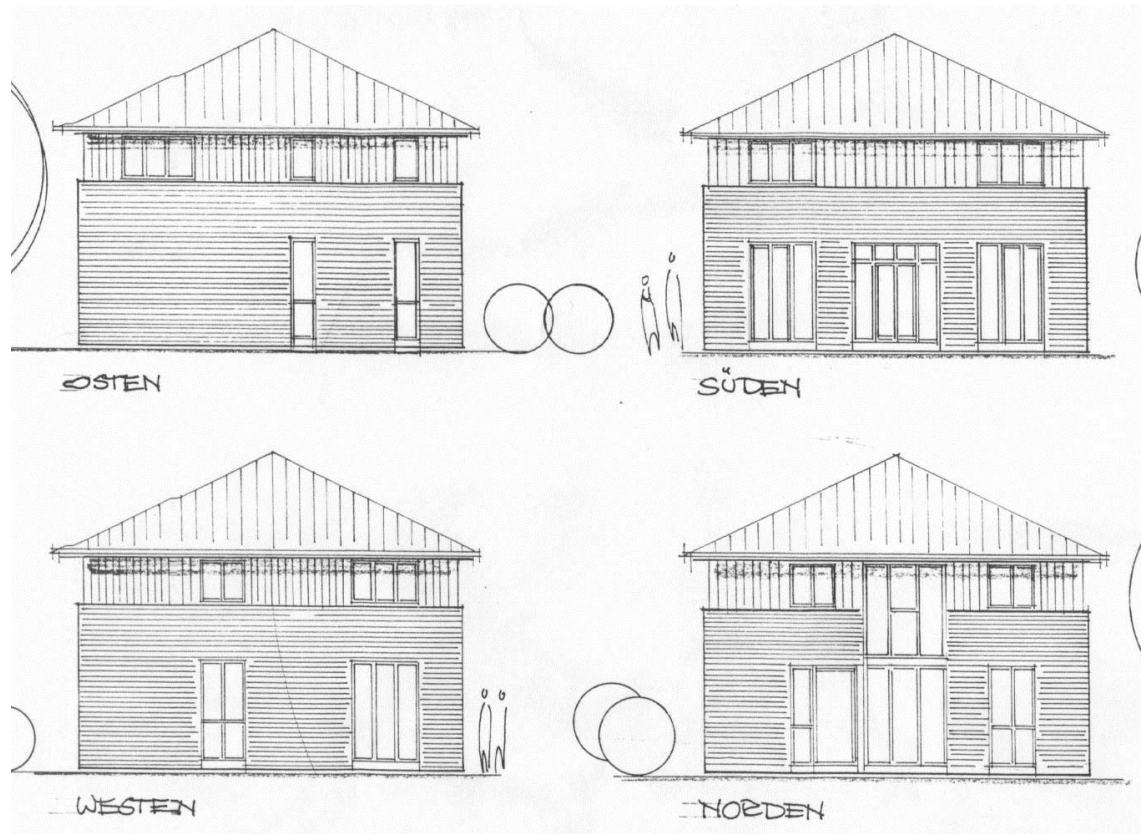
10. Nachweis des Sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2

11. Zusammenfassung und Gesamtbeurteilung

- Angabe von Auflagen: z.B.
- Luftdichtheitsmessung gemäß EnEV Anhang 4
 - Wärmebrückennachweis nach DIN 4108, Beiblatt 2
 - Anforderungen an Sonnenschutz

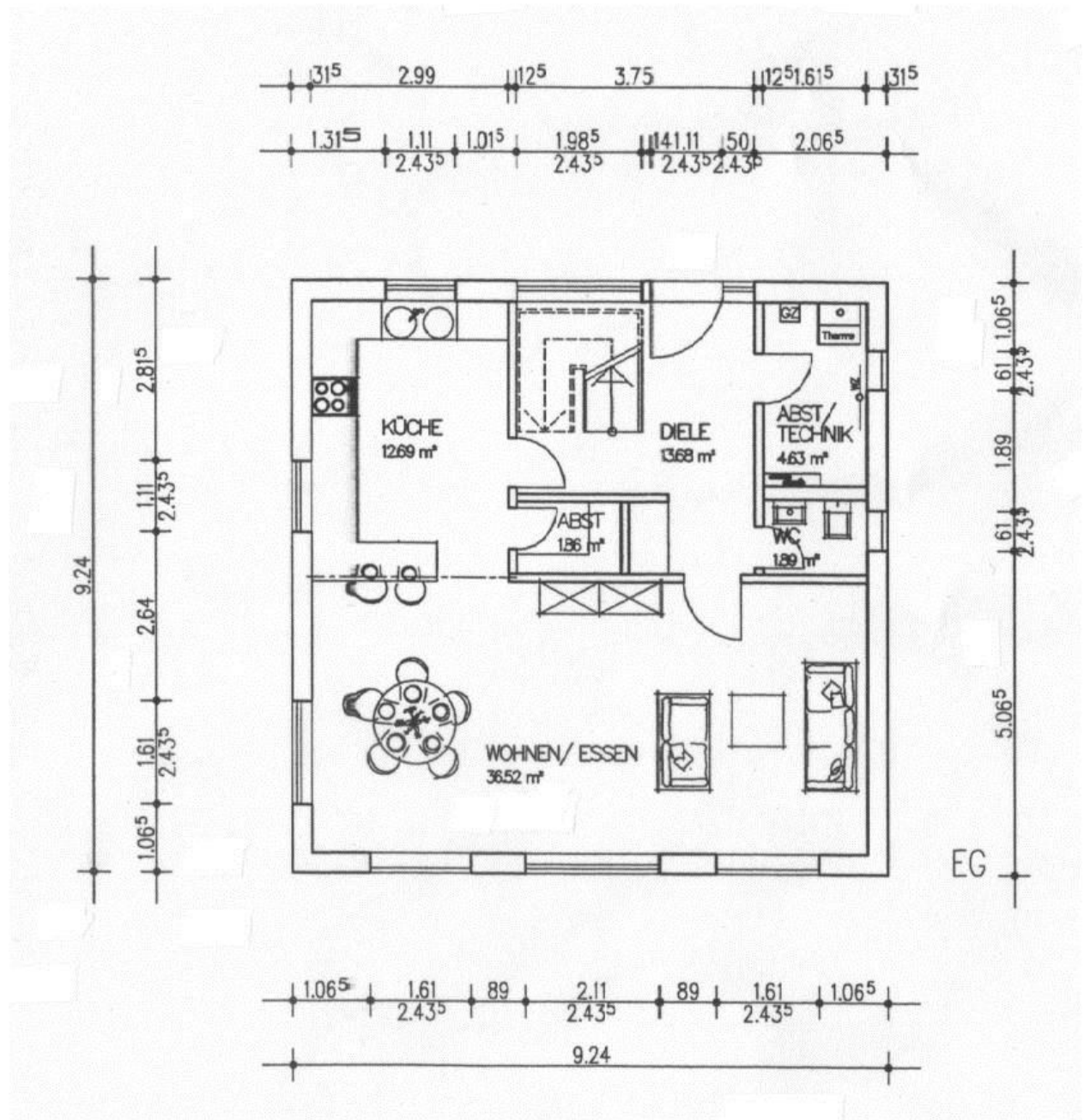
2.6 EnEV-EDV Übung

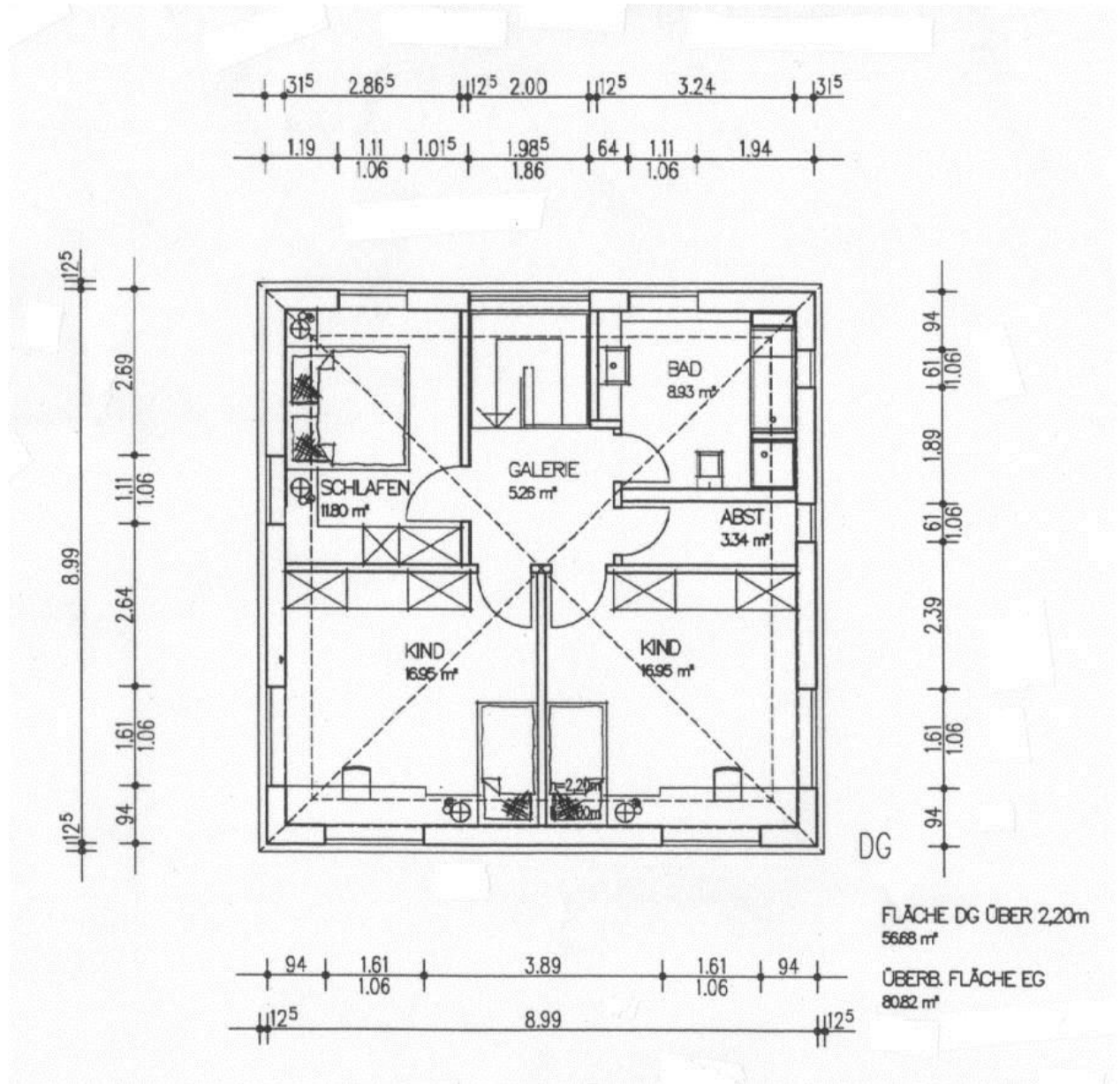
Beispiel eines Nachweises es Energieeinsparenden Wärmeschutzes eines Einfamilienhauses.

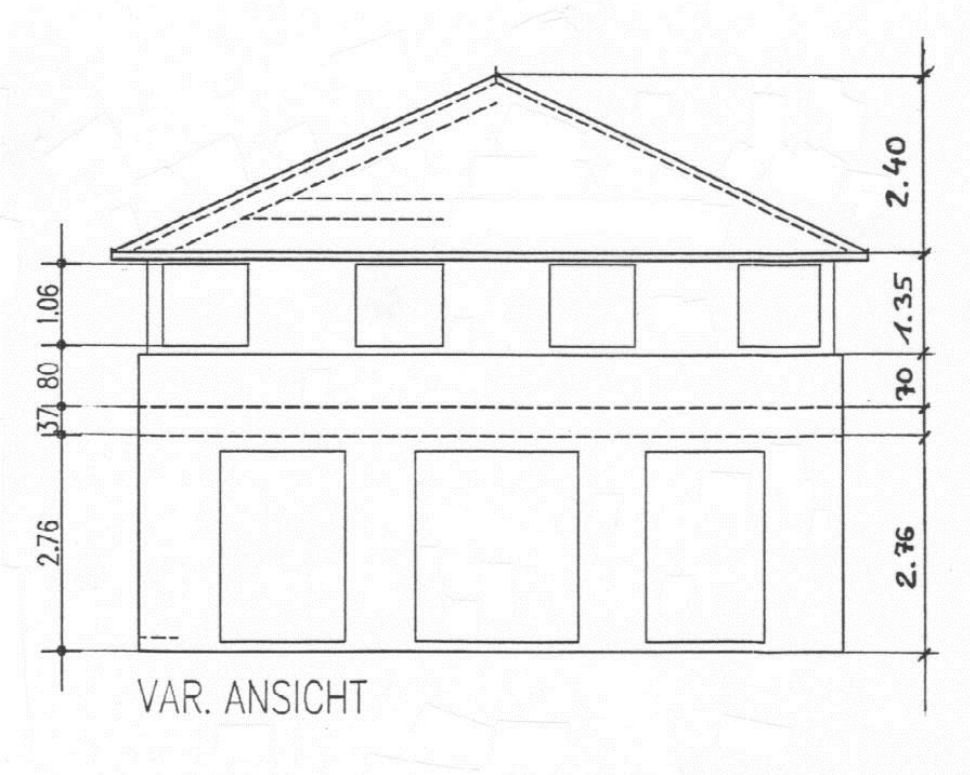


Flächenberechnungen:

8 Außenwände					
AW1:		N	O	W	S
	EG	13.7	22.5	18.9	12.5
	OG	8.5	9.9	9.9	9.9
		22.2	32.4	28.8	22.4
AW2:		N	O	W	S
	OG	7.9	9.5	9.6	9.1
W1:		N	O	W	S
	EG	11.8	3	6.6	13.0
	OG	1.4	-	-	-
	OG	4.6	6	9.5	16.4
G1:	G1		9.24	9.24	85.4
D1:	D1	1/2	4* 9.24	5.2	96.1

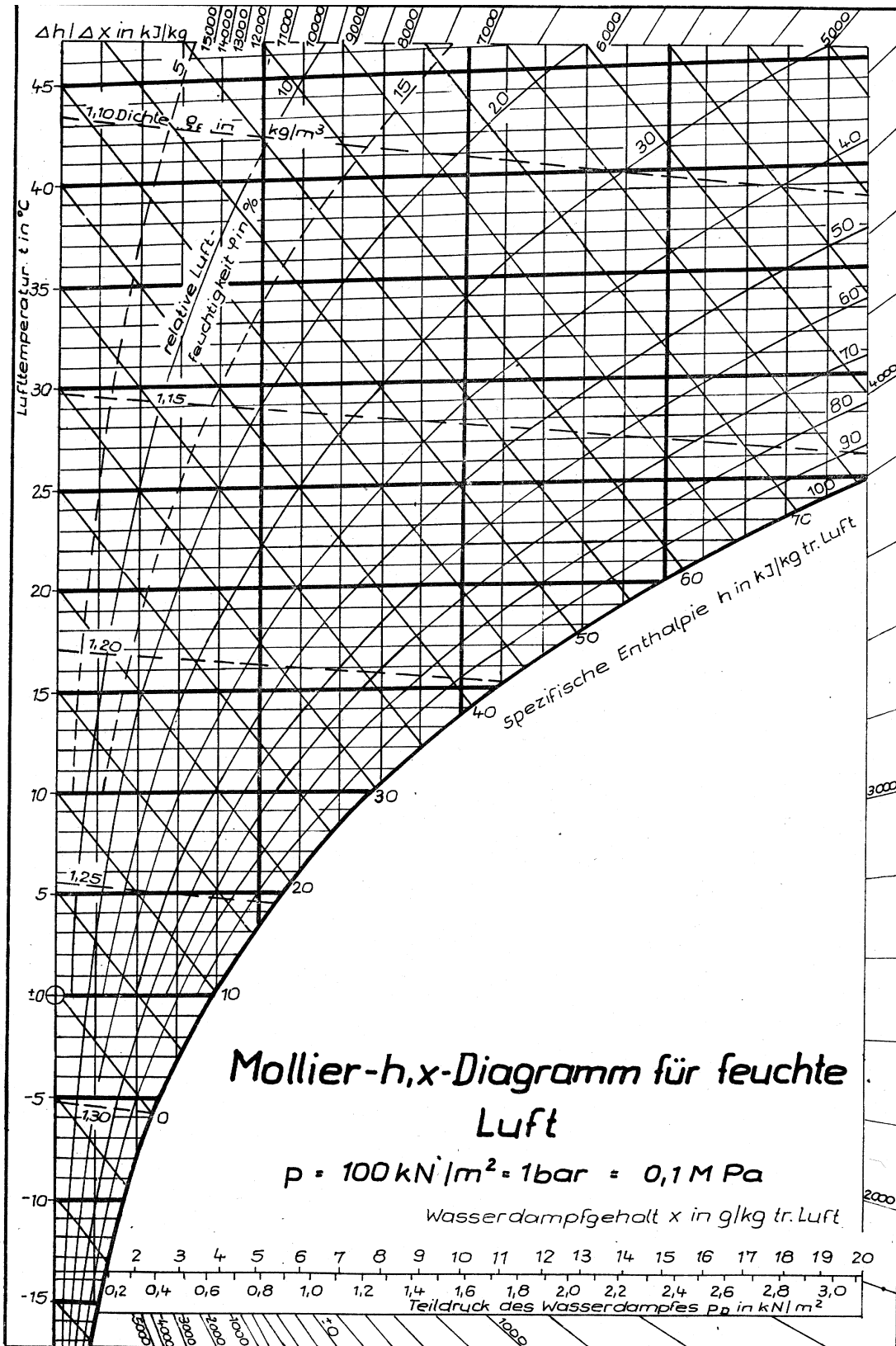






3 Bauklimatik

3.1 Beispiel 3.1: Mollier – Diagramm



Beispiel 3.2: Umrechnung von speziellem Volumen in Dichte**Generelles Vorgehen:**

$$\begin{aligned} v &= V / m_L & \Rightarrow & V = v * m_L \\ \rho &= (m_L + m_W) / V & \Rightarrow & V = (m_L + m_W) / \rho \end{aligned}$$

Gleichsetzen:

$$\begin{aligned} v * m_L &= (m_L + m_W) / \rho & \Rightarrow & v = (m_L + m_W) / (m_L * \rho) \quad \text{es gilt: } x = m_W/m_L \\ & & \Rightarrow & \mathbf{v = (1 + x) / \rho} \end{aligned}$$

Gegeben: $x = 7,4 \text{ g/kg tr.L.}$ [x=absolute Feuchte]
 $\theta_L = 20^\circ\text{C}$

Gesucht: Feuchtegehalt w in g/m^3

Lösung:

Beispiel 3.3: Raumklima

Gegeben

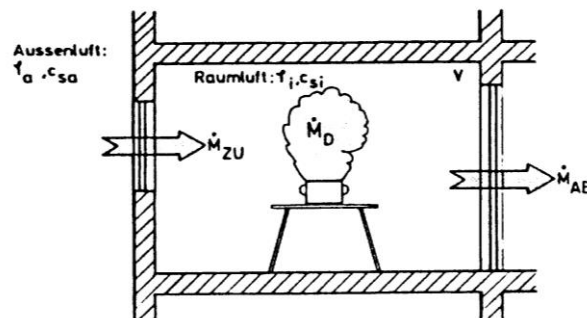
ist ein Einzelbüro mit einem Arbeitsplatz. Zur Gewährleistung der hygienischen Behaglichkeit ist eine Lüftungsanlage installiert, die während der Raumnutzung einen Außenluftvolumenstrom von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ fördert.

Gesucht:

Welche relative Raumlufffeuchte stellt sich im Büro während der Raumnutzung ein, wenn die Raumlufftemperatur über Thermostatregelventile auf $\theta_i = + 20 \text{ }^\circ\text{C} = \text{const.}$ gehalten wird, die Feuchteabgabe der Person $\dot{m}_{w,zu} = 40 \text{ g/h}$ beträgt, alle Türen und Fenster ideal dicht und keine weiteren Feuchtequellen und Feuchtesenken im Raum vorhanden sind und die Wasserdampfdiffusion durch die Umfassungsbauteile vernachlässigt wird. Die Berechnung ist für zwei Außenluftzustände durchzuführen.

$\theta_e = + 10 \text{ }^\circ\text{C} / \phi_e = 80 \text{ } \%$; $\theta_e = - 5 \text{ }^\circ\text{C} / \phi_e = 80 \text{ } \%$

1. Ermitteln Sie für die beiden Außenluftzustände die Parameter absolute Feuchte und spezifisches Volumen aus dem Mollierdiagramm oder aus dem Tafelwerk.
2. Berechnen Sie den Außenluftmassenstrom der Lüftungsanlage in kgtr.L./h für beide Außenluftzustände.
3. Stellen Sie die Feuchtebilanz für den Raum auf und stellen Sie nach der gesuchten Größe um.
4. Ermitteln Sie die relative Raumlufffeuchte aus dem Mollier-Diagramm oder aus dem Tafelwerk für beide Außenluftzustände.
5. Bewerten Sie die Ergebnisse dahingehend, ob eine Be- oder Entfeuchtung erforderlich ist.
6. Berechnen Sie die zur Deckung der Lüftungswärmeverluste erforderliche Heizleistung mit Hilfe der aus dem Mollier-Diagramm abgelesenen spezifischen Enthalpie.
7. Ermitteln Sie die erforderliche Befeuchtungsleistung in kg/h , wenn bei $\theta_e = - 5 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $\theta_i = 40 \text{ } \%$ befeuchtet werden soll.



Lösung:

4 Feuchteschutz

4.1 Grundlagen des Feuchteschutzes

Beispiel 4.1: Feuchtetechnische Grundbegriffe (Materialfeuchte)

Gesucht: In welcher bauphysikalischen Größen wird die Feuchte der Baustoffe berücksichtigt?

Lösung:

Beispiel 4.2: Wasserdampf-Diffusion**Gesucht:** Ordnen Sie die nachfolgenden Baustoffe hinsichtlich der Wasserdampfdurchlässigkeit:**Gegeben:**

1. Hartschaum PS 15
2. Stahlbeton B25
3. Gipskartonplatten
4. Leichthochlochziegel LHz 0,6

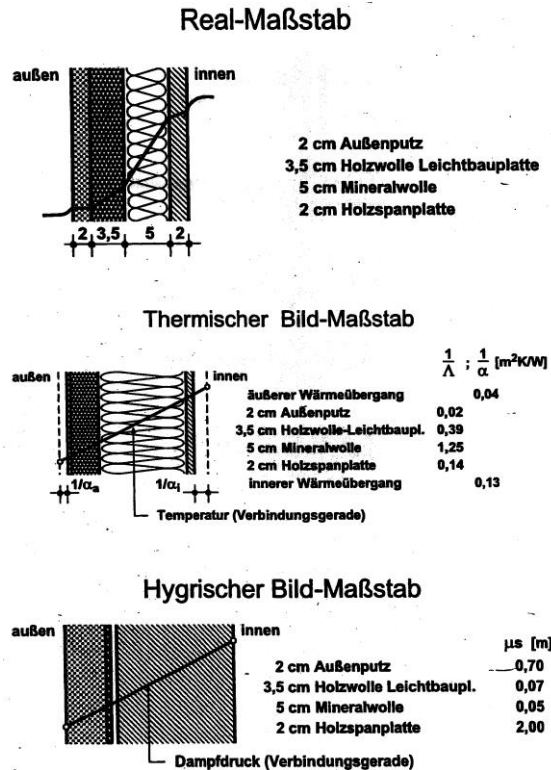
Lösung:

Stoff	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]
Kalk- Zement- Mörtel	35
Kalk- Gips- Mörtel	10
Leichtmörtel	15/35
Ortbeton (Kiesbeton)	50
Beton- Fertigteile	100
Bimsbeton	10
Hohlblöcke aus Leichtbeton	5/10
Poren- und Schaumbeton	5
Vollziegel, Hochlochziegel	5/10
Gipsplatten	8
Asbest- Zementplatten	50
Holzwoolleichtbauplatten Dicke 15 mm	5
Dicke > 15 mm	2
Korkplatten	10
Holz (Eiche, Buche, Fichte, Kiefer, Tanne)	50
Sperrholz nach DIN 68 705	50/ 400
Poröse Holzfasерplatten	5
harte Holzfasерplatten	70
Holzspanplatten V 20	50
V 100	100
Mineralische und pflanzliche Faserdämmstoffe	1
Schaumkunststoffe:	
Polystyrol - Partikelschaum, je nach Rohdichte	25 bis 70
Polystyrol, extrudiert, je nach Rohdichte	100 bis 300
Polyurethan, je nach Rohdichte	50 bis 100
Bitumenpappe, nackt, nach DIN 52129	2000/20000
Glasvlies-Bitumendachbahn, nach DIN 52143	20000/60000
Dachpappe nach DIN 52 128	10000/80000
Polyvinylchlorid-Folie (PVC)	20000/50000
Polyethylen-Folie	100000
Aluminiumfolie mit einem Flächengewicht $\geq 125 \text{ g/m}^2$	∞
Schaumglas mit Dicke 4 cm	∞

4.2 Wasserdampfdiffusion

Beispiel 4.3: Vergleich der Wasserdampfdurchlässigkeit verschiedener Baustoffe im Verhältnis zur Luft

Exkurs: Überblick der verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten der Bildmaßstäbe von Bauteilen



Der s_d -Wert wird zur graphischen Darstellung herangezogen (siehe oben):

Real-Maßstab: vorhandene Baustoffdicke in wirklichen Abmessungen

thermischer Bildmaßstab: Wandaufbau in Abhängigkeit der Wärmedurchlasswiderstände ($1/\Lambda$ als Maßstab)

hygrischer Bildmaßstab: Wandaufbau mit dem Wasserdampfdiffusionsdurchlasswiderstand $1/\Delta$ als Maßstab

Anmerkungen:

die Wasserdampfmengen, die per Diffusion durch Bauteile hindurchwandern, sind sehr gering; durch Lüftung werden deutlich größere Wasserdampfmengen befördert

kommt der diffundierende Wasserdampf in kalte Wandschichten, so kann dort Kondensation und Ansammlung von Tauwasser auftreten; daher werden auf der Raumseite Dampfsperren angebracht und es sollen die Diffusionswiderstände in einem Bauteil nach außen hin abnehmen (gilt für europäisches Klima)

wenn bei einer Wanddurchfeuchtung die Baustoffporen zumindest teilweise mit Wasser gefüllt und damit verstopft sind, findet kapillarer Wassertransport statt

Beispiel 4.5: Ermittlung des Dampfgehaltes w **Gegeben:**

$$\theta_i = 20^\circ\text{C}$$

$$\phi = 50\%$$

Gesucht:Dampfgehalt w **Lösung:****Beispiel 4.6: Ermittlung des Wasserdampfdruck p** **Gegeben:**

$$\theta_L = 20^\circ\text{C}$$

$$\phi = 50\%$$

Gesucht:Wasserdampfdruck p **Lösung:**

Vorgehensweise zur Bestimmung des Tauwasserschutzes im Bauteilquerschnitt

Durchführungsschema für Glaserberechnung

1. Skizzenhafte Darstellung des zu untersuchenden Bauteils mit Angabe der Materialdaten λ und μ sowie der Schichtdicken.
2. Aufstellung der klimatischen Randbedingungen nach DIN 4108 Teil 3.
Danach gilt für nicht klimatisierte Wohn- und Bürogebäude:

Klima	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Wasserdampf- teildruck	Dauer		
	θ	ϕ	p	t		
	°C	%	Pa	d	h	s
Tauperiode von Dezember bis Februar						
Innenklima	20	50	1 168	90	2 160	$7\,776 \cdot 10^3$
Außenklima	-5	80	321			
Verdunstungsperiode von Juni bis August^a						
Wasserdampfdruck Innenklima			1 200	90	2 160	$7\,776 \cdot 10^3$
Wasserdampfdruck Außenklima			1 200			
Sättigungsdampfdruck im Tauwasserbereich: — Wände, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen; Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen			1 700			
— Dächer, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen			2 000			
^a In der Verdunstungsperiode werden im Rahmen des Perioden-Bilanzverfahrens nicht die Temperaturen und Luftfeuchten, sondern nur die gerundeten Wasserdampfdrücke als Klima-Randbedingung vorgegeben.						

Wärmeübergangswiderstände: $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$

$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ (immer; auch bei starkbelüfteten Schichten (s. Skript Wärmeschutz))

s_d -Werte von Bauteilschichten:

Luftschichten; s_d -Wert = 0,01 m (immer, unabhängig von der Neigung und Dicke)

Bauteilschichten außen auf Wärmedämmungen; s_d -Wert < 0,01 m -> s_d -Wert = 0,01 m

Bauteilschichten im Inneren; s_d -Wert < 0,01 m -> s_d -Wert = 0 bzw. 0,01 m (der ungünstigste Wert ist anzusetzen).

Bei schärferen klimatischen Randbedingungen, wie sie zum Beispiel in Schwimmbädern oder klimatisierten Räumen auftreten, dürfen die Vereinfachungen nach DIN 4108 nicht vorgenommen werden. Das Berechnungsverfahren muss dann unter der Berücksichtigung der tatsächlichen innenklimatischen Verhältnisse und am Standort des Gebäudes vorherrschenden Außenklimas angewendet werden.

3. Ermittlung des Wärmedurchlasswiderstandes R nach Gleichung (2-7) und des Wasserdampfdurchlasswiderstandes $1/\Delta$ nach Gleichung (3-17).
4. Berechnung des Temperaturverlaufs für die Winterperiode (Tauperiode).
5. Ermittlung des Sättigungsdampfdruckes in Abhängigkeit von der vorhandenen Temperatur nach Gleichung (3-6) oder mit Hilfe der Tabellen A_3 und A_4 .
6. Aufzeichnen des berechneten Temperaturverlaufs und des Sättigungsdampfdruckes in Abhängigkeit von der äquivalenten Luftschichtdicke μ_s gemäß Bild 3-11 links für die Tauperiode und Bild 3-11 rechts für die Verdunstungsperiode.
7. Ermittlung des Dampfdruckverlaufs nach der Methode des gespannten Seils.
8. Überprüfung der Tauwasserbildung:
 - a) Falls keine Berührung zwischen p_D - und p_S -Kurve: keine Tauwasserbildung; die Konstruktion ist zulässig und das Nachweisverfahren abgeschlossen.
 - b) Falls Berührung zwischen p_D - und p_S -Kurve: Tauwasserbildung im Querschnitt (punktuell oder Bereich); In diesem Fall ist die anfallende und die verdunstende Tauwassermenge nach den Gleichungen (3-31) und (3-32) zu berechnen.
9. Nach DIN 4108 ist keine Tauwasserbildung in Bauteilen unschädlich, wenn durch Erhöhung des Feuchtegehaltes der Bau- und Dämmstoff der Wärmeschutz und die Standsicherheit der Bauteile nicht gefährdet werden. Diese Voraussetzungen sind gewährleistet, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:
 - a) Das während der Tauperiode durch Tauwasserbildung im Inneren des Bauteils anfallende Wasser muss während der Verdunstungsperiode wieder an die Umgebung abgeführt werden ($m_T - m_V$).
 - b) Die Baustoffe, die mit dem ausfallenden Tauwasser in Berührung kommen, dürfen dadurch nicht geschädigt werden (z. B. durch Korrosion, Pilzbefall).
 - c) An Grenzflächen zwischen einer nicht wasseraufnahmefähigen Schicht und einer Luftschicht oder einer wasserdurchlässigen Schicht darf die flächenbezogene Wassermenge $0,5 \text{ kg/m}^2$, in allen anderen Fällen $1,0 \text{ kg/m}^2$ nicht überschreiten.
 - d) Bei Holz und Holzwerkstoffen ist eine Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes durch das ausfallende Wasser um mehr als 5 % (Holz) bzw. um mehr als 3 % (Holzwerkstoffe) unzulässig (Holzwolle-Leichtbauplatten nach DIN 1101 und Mehrschicht-leichtbauplatten aus Schaumkunststoffen und Holzwolle nach DIN 1104, Teil 1, sind hiervon ausgenommen).

Beispiel 4.7: Temperaturverlauf in einem zweischichtigen Bauteil

Gegeben: Zweischichtiges Bauteil
Bauteil A: Wärmedämmung außen
Bauteil B: Wärmedämmung innen

Zweischichtige Außenwände aus gleichen Schichten; der besseren Anschaulichkeit wegen ist die in der Praxis notwendige Bekleidung der Dämmschicht nicht berücksichtigt.

Beton: $\lambda_R = 2,1 \text{ W/(mK)}$,
MIFA: $\lambda_R = 0,04 \text{ W/(mK)}$

Gesucht: Temperaturverlauf über den Bauteilquerschnitt

Lösung:

Beispiel 4.8: Verlauf des Dampfteildrucks p**4.2.1.1 Sättigungsdampfdruck für das Bauteil Wärmedämmung außen**

Gegeben: $\mu_{\text{Beton}} = 70/150$; $\mu_{\text{Mifa}} = 1$

Gesucht: Verlauf von p und p_s Bauteil A

Lösung:

Beispiel Sättigungsdampfdruck für das Bauteil Wärmedämmung innen

Gegeben: $\mu_{\text{Beton}} = 70/150$; $\mu_{\text{Mifa}} = 1$

Gesucht: Verlauf von p und p_s Bauteil B:

Lösung:

4.2.1.2 Bestimmung der Tauwassermassen im Bauteilquerschnitt

Gegeben: Verlauf von p und p_s Bauteil A und B

Gesucht: Tauwassermassen infolge Diffusion

Lösung:

Beispiel 4.9: Anordnung der Dampfsperrschicht für $m_{w,T} = 0 \text{ kg/m}^2$

Gegeben: Bauteil B: $m_{w,T} = \text{_____ kg/m}^2$

Gesucht: Maßnahmen, damit kein Tauwasser im Bauteilquerschnitt ausfällt!

Lösung:

Beispiel 4.10: Anordnung der Dampfsperrschicht $m_{w,T} = 0.5 \text{ kg/m}^2$

Gegeben: Bauteil B: $m_{w,T} = \text{_____ kg/m}^2$; zul $m_{w,T} = 0,5 \text{ kg/m}^2$

Gesucht: Maßnahmen, damit das vorhandene Bauteil der DIN 4108 gerecht wird!

Lösung:

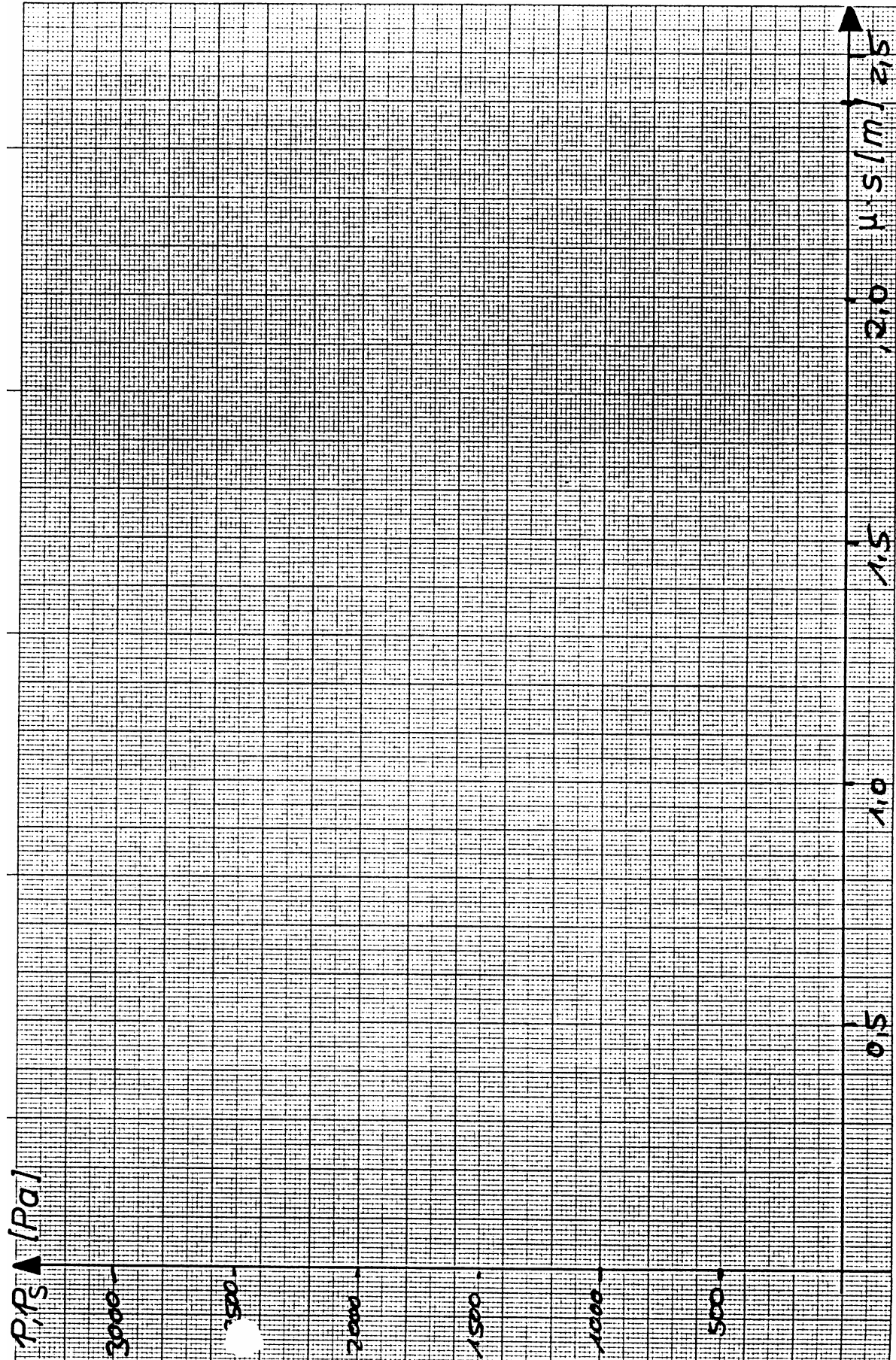
Verlauf Dampfdruck-Diagramm für Bauteil B mit raumseitig vor der Wärmedämmschicht (DÄ) zusätzlich angebrachter Dampfsperre (DS) mit zus $s_d = \text{_____ m}$

Beispiel 4.11: Ermittlung der Verdunstungswasser aus dem Bauteilquerschnitt

Gegeben: Bauteil B: mit $s_d(DS) = \text{---} \text{ m}$

Gesucht: Verdunstungswassermasse im Sommer

Lösung:



Beispiel 4.13: Feuchtebilanzierung eines Raumes

Ein Hörsaal mit einem Luftvolumen von 1000 m^3 und den Klimakonditionen $\theta_i = +20 \text{ °C}$ und $\phi_i = 50 \%$ im eingeschwungenen Zustand wird zu Beginn einer Vorlesung von insgesamt 40 Personen betreten.

Wie hoch ist der erforderliche zusätzliche Außenluftwechsel, um die o. g. Klimabedingungen ($\theta_i = 20 \text{ °C}$, $\phi_i = 50 \%$) während der Vorlesung zu halten, wenn die Außenklimabedingungen zum Zeitpunkt der Vorlesung wie folgt sind: $\theta_e = 0 \text{ °C}$, $\phi_e = 80 \%$?

Die Radiatoren des Raumes besitzen Thermostatregelventile, die auf einen Sollwert $\theta_i = +20 \text{ °C}$ eingestellt sind.

Gegeben.:

$$V_L = 1000 \text{ m}^3$$

$$\theta_i = +20 \text{ °C} \quad \theta_e = 0 \text{ °C}$$

$$\phi_i = 50 \%; \quad \phi_e = 80 \%$$

innere Lasten:

$$= 40 \text{ g}/(\text{h} \cdot \text{Person})$$

$$\Phi_{\text{zu}} = 100 \text{ W} / \text{Person}$$

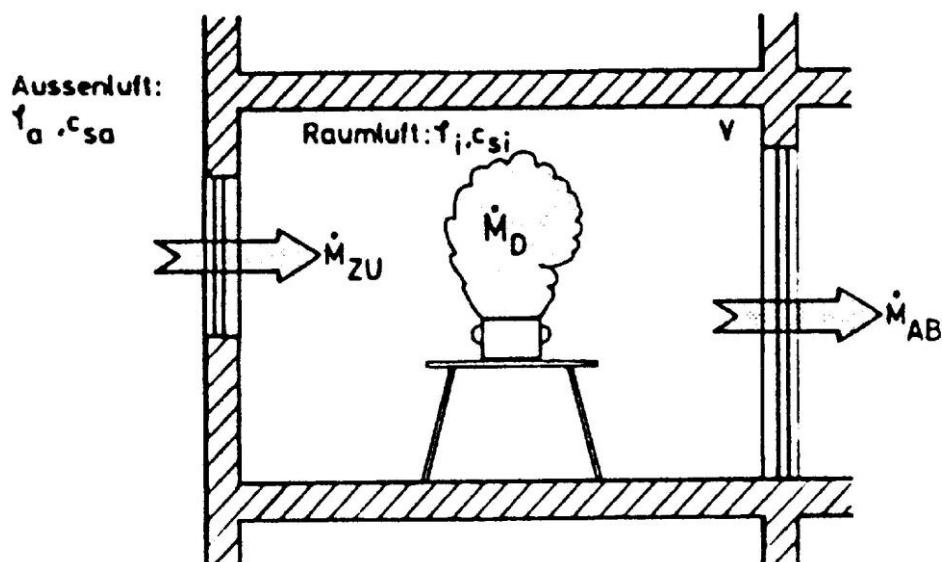
Die Raumtemperatur wird über die Heizkörper gehalten.

Gesucht:

Wie hoch ist der entstehende Lüftungswärmeverlust, wenn der Außenluftwechsel gerade den Wert zur Aufrechterhaltung der Raumluftfeuchte aufweist und kann dieser Verlust durch die interne Wärmelast gedeckt werden?

Gesucht werden die Parameter n [1/h] und $\Phi_{\text{Lüftung}}$ [W] !

Lösung:



4.3 EDV Übungen

Feuchteschutz

Eingesetztes Programm:

Wärme und Dampf www.rowa.de
WUFI www.wufi.de

Anleitung zu WUFI:

Im Gegensatz zur rein stationären, diffusionstechnischen Berechnung eines Bauteils nach DIN 4108 können mit dem thermischen und hygrischen Simulationsprogramm WUFI der Fraunhofer Gesellschaft -Institut für Bauphysik- auch instationäre, sorptive und kapillar- leitende Prozesse berücksichtigt werden.

Hierdurch ist es möglich, das Bauteil in bauphysikalischer Sicht genauer zu erfassen und Feuchteprozesse auch visuell durch eine Filmdarstellung nachzuvollziehen.

Hierbei werden als Randbedingungen der Berechnung die meteorologischen Daten wie Temperatur, Strahlung, Regen/Schlagregen, relative Luftfeuchte nach eigenen Angaben oder nach Testreferenzjahren auf das Bauteil bezogen.

Die Raumklimadaten, Temperatur und relative Feuchte, werden auf das Bauteil aufgebracht und die Feuchteentwicklung im Bauteil während einer oder mehrerer Jahresperioden dargestellt.

Bei der Berechnung des Wärmetransports berücksichtigt WUFI folgende Transportmechanismen:

- Wärmeleitung,
- Enthalpieströme durch Dampfdiffusion mit Phasenwechsel,
- kurzwellige Sonnenstrahlung,
- langwellige nächtliche Abstrahlung (nur bei TRY-Klimadaten).

Konvektiver Wärmetransport durch Luftströmungen werden nicht mit aufgenommen, da er meist schwer zu erfassen und selten eindimensional ist.

Bei der Berechnung des Dampftransports berücksichtigt WUFI folgende Transportmechanismen:

- Dampfdiffusion,
- Lösungsdiffusion.

Bei der Berechnung des Flüssigtransports berücksichtigt WUFI folgende Transportmechanismen:

- Kapillarleitung,
- Oberflächendiffusion.

Die durch Schwerkraft bedingten Sickerströmungen, hydraulische Strömungen aufgrund von Gesamtdruckunterschieden, elektrokinetische und osmotische Effekte sowie die durch Luftströmung verursachten konvektiven Dampftransporte werden nicht erfasst.

5 Schallschutz

5.1 Grundlagen

Beispiel 5.1: Wellenlänge

Grundgleichung

$$\lambda = c / f$$

mit

λ Wellenlänge [m]

c Schallgeschwindigkeit [m/s]

f Frequenz [1/s]

Gesucht:

Wie groß ist die Wellenlänge einer Schallwelle bei 125 Hz und 2000 Hz im Medium Gummi, Luft und Stahl?

Lösung

Beispiel 5.2: Addition mehrerer Schallpegel

Grundgleichung

Mehrere Schallquellen mit verschiedenen Pegeln

$$L_{\text{ges}} = 10 \lg \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_j}{10}} \text{ dB}$$

Mehrere Schallquellen mit gleichen Schallpegeln

$$L_{\text{ges}} = L_i + 10 \lg n \text{ dB}$$

Gesucht:

Man bestimme Gesamtpegel der folgenden Schallereignisse.

a) $L_1 = 70 \text{ dB}$, $L_2 = 60 \text{ dB}$, $L_3 = 55 \text{ dB}$

b) $L_1 = L_2 = L_3 = 60 \text{ dB}$

Lösung:

Beispiel 5.3: Schalldämm-Maß R'

Grundgleichung

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \lg(S/A) \text{ dB}$$

mit

L₁ Schalldruckpegel im Senderraum [dB]

L₂ Schalldruckpegel im Empfangsraum [dB]

R' Schalldämm-Maß des trennenden Bauteils [dB], unter Berücksichtigung der flankierenden Bauteile

S Fläche der Trennwand [m²]

A Äquivalente Schallabsorptionsfläche des Empfangsraumes [m²];

$$A = + A_L$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i + A_L$$

Schallabsorptionsgrad der Oberfläche, Verhältnis der absorbierten, d.h. nicht reflektierten, zur auftreffenden Energie. Bei vollständiger Reflexion ist $\alpha = 0$, bei vollständiger Absorption ist $\alpha = 1$.

S_i gesamte Oberflächen des Empfangsraumes einschl. Personen und Gegenständen [m²]

A_L äquivalente Schallabsorptionsfläche der Luft [m²]

$$A = 0,163 \cdot V/T \text{ (m}^2\text{)}$$

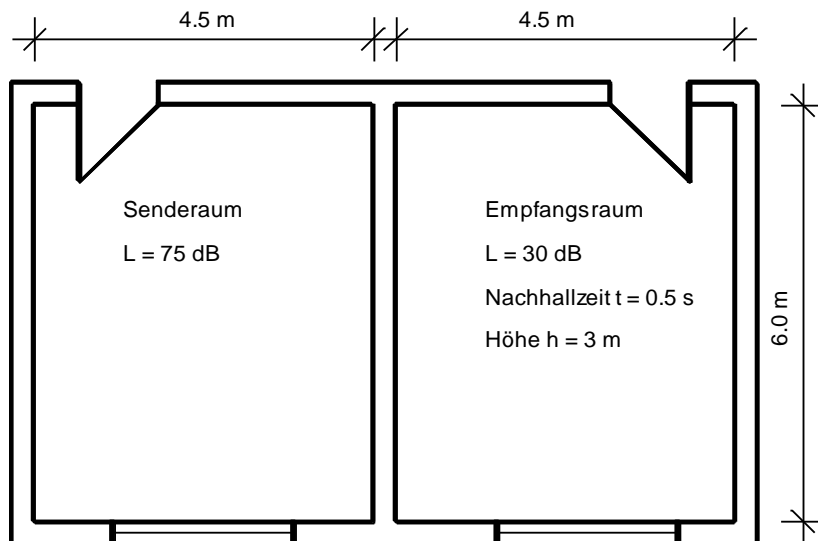
mit

V Volumen des Empfangsraumes (m³)

T Nachhallzeit (s)

Gesucht:

Welches Schalldämm-Maß besitzt die Trennwand zwischen den unten skizzierten Räumen?



Lösung:

Beispiel 5.4: Schalldämm-Maß $R'_{w,res}$ bei Flächenanteilen mit unterschiedlicher Schalldämmung

Grundgleichung:

$$R'_{w,res} = -10 * \lg \left(\frac{1}{A_{ges}} \left(A_1 * 10^{-\frac{R'_{w1}}{10}} + A_2 * 10^{-\frac{R'_{w2}}{10}} + \dots + A_n * 10^{-\frac{R'_{wn}}{10}} \right) \right) \text{ [dB]}$$

A_1 bis A_n Flächen der einzelnen Elemente des Bauteils

$A_{ges} = \sum_1^n A_n$ Summe der Einzelflächen

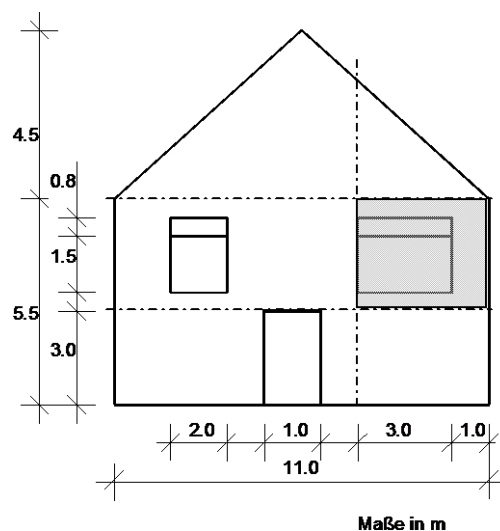
A_1 bis A_n Flächen der einzelnen Elemente des Bauteils

Summe der Einzelflächen

R'_{w1} bis R'_{wn} bewertete Schalldämm-Maße (R'_w bzw. R_w) der einzelnen Elemente des Bauteils

Gesucht:

Wie groß ist das resultierende Schalldämm-Maß der Außenwand des rechten Raumes im 1.OG auf untenstehender Skizze, wenn die Fenster (und Türen) ein bewertetes Schalldämm-Maß von $R'_w = 29$ dB, die Rollladenkästen $R'_w = 25$ dB und die massive Außenwand ein $R'_w = 45$ dB haben?

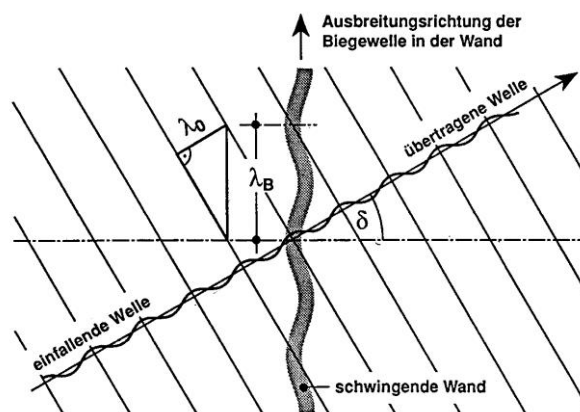


Lösung:

Beispiel 5.5: Grenzfrequenz einschaliger Bauteile

Grundlagen:

Luftschallwellen, die schräg auf ein Bauteil auftreffen, rufen im Bauteil BiegeWellen hervor. Gleichzeitig breitet sich die Luftschallwelle entlang des Bauteils aus. Stimmt nun die - bauteilabhängige- BiegeWelle in Ausbreitungsgeschwindigkeit und Länge mit der Luftschallwelle überein, kommt es zu einer Überlagerung beider Wellenbewegungen, der sogenannten Koinzidenz oder Spuranpassung. Diese führt zu einer erhöhten Schallübertragung der Schallwelle durch das Bauteil. Die zu dieser Wellenlänge gehörende Frequenz wird Koinzidenz- (Grenz-) frequenz f_g genannt. Die niedrigste Frequenz, bei der Koinzidenz auftreten kann, ist bei streifenförmigem Schalleinfall ($\sin \delta = 1$ bzw. $\delta = 90^\circ$).



Grundgleichung:

$$f_g \approx 60/d * \sqrt{\rho/E} \quad \text{Hz}$$

mit

- d Dicke des Bauteils [m]
- ρ Rohdichte des Baustoffs [kg/m^3]
- E Elastizitätsmodul des Baustoffs [MN/m^2]

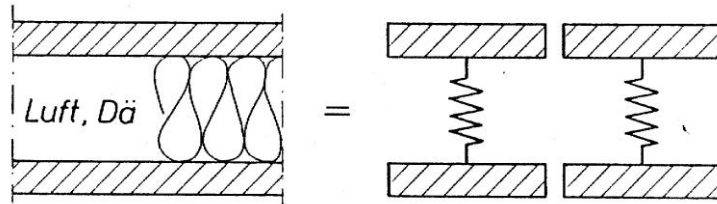
Gesucht:

Wie groß ist die Grenzfrequenz a) einer 24 cm starken Wand ($\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$, $E = 9 \cdot 10^3 \text{ MN/m}^2$) und b) einer 0.4 cm starken Glasplatte ($\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$, $E = 5.6 \cdot 10^3 \text{ MN/m}^2$) ?

Lösung:

Beispiel 5.6: Resonanzfrequenz zweischaliger Bauteile

Ein Zweischaliges Bauteil entspricht im Modell einem Masse-Feder-Masse System, das durch seine Resonanz- oder Eigenfrequenz gekennzeichnet ist.

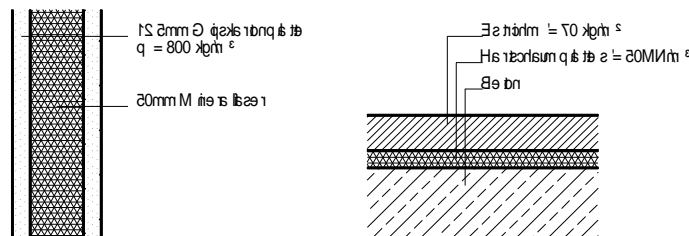


Grundgleichung:

Aufbau	$f_0 =$	Bauteile (Beispiele)
	$\frac{85}{\sqrt{m' \cdot a}}$	Wand aus 2 biegeweichen Schalen
	$\frac{60}{\sqrt{m' \cdot a}}$	Biegesteife Wand mit Vorsatzschale
	$160 \cdot \sqrt{\frac{s'}{m'}}$	Wand mit Vorsatzschale, beide mit DÄ vollflächig starr verbunden. Massivdecke mit schwimmendem Estrich

Gesucht:

Bestimmen Sie die Resonanzfrequenz der folgenden zweischaligen Systeme.



Lösung:

Beispiel 5.7: Schallimmissionspegel bei freier Schallausbreitung

Grundlagen:

Übliche Geräusche sind häufig zeitlich schwankend: Daher ist bei ihrer Bewertung den dynamischen Eigenschaften des Gehörs und den Eigenheiten der Langzeitmittelung Rechnung zu tragen.

Begriffe:

Impuls

Zeitkonstante für Schallpegelmessung zur gehörrichtigen Wiedergabe von Impulsen (Schallereignissen mit einer Dauer von ca. 10ms); beträgt 35ms (entspricht der Dauer des Einschwingvorganges des Gehörs); L_{AI} ; dB (AI)

Fast

Zeitkonstante von 125ms; wird fast immer angewendet; fehlt ein Hinweis auf die verwendete Zeitbewertung dann ist vereinbarungsgemäß „fast“ gemeint; L_{AF} ; L_A ; dB (AF); dB (A)

Slow

Zeitkonstante von 1s; bietet wie „fast“ meßtechnische Vorteile (geringere Datenmengen); beide führen aber zu gleich guten Ergebnissen; L_{AS} ; dB (AS)

Äquivalenter Dauerschallpegel

Schalldruckpegel eines Dauergeräusches dessen Wirkung der des schwankenden Geräusches (Zugvorbeifahrten, Überflüge) hinsichtlich der Einwirkung auf den Menschen entspricht („äquivalent ist“). Wird auch als Mittelungspegel L_m bezeichnet.

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L_p(t)}{10}} dt \quad \text{dB}$$

Beurteilungspegel

Durch Koeffizienten K_j zur Erfassung weiterer Einflußgrößen auf die Störwirkung erweiterte Dauerschallpegel

$$L_{Ard} = L_{Aeq} + \sum K_j$$

Straßenverkehr:

RLS-90; DIN 18005-1 (Beurteilungspegel); DIN 41 642 (Messungen)

Berechnung als Linienschallquelle in 0,5m Höhe über Fahrstreifenmitte

Schienenverkehr:

DIN 18005-1 (Beurteilungspegel); DIN 41 642 (Messungen); Amtsblätter der Deutschen Bundesbahn („Schall 03“ Schall 04“)

Berechnung als Linienschallquelle auf der Gleisachse auf Höhe der Schienenoberkante

Fluglärm:

„Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm“; DIN 41 643 (Messungen)

Industrie/ Gewerbe/ Handwerk:

TALärm

Gegeben:

Im folgenden Beispiel ist der Schalldruckpegel am Immissionsort (I- Ort) für den Normalfall der „Mitwetterlage“ (Radius $R = 5 \text{ km}$) zu ermitteln. Die Reflexion des Schalls wird berücksichtigt.

Schallquellen: Auf dem Dach von Gebäude A befindet sich eine Schallquelle (1) mit einem Schalleistungspegel von 110 dB(A) . Eine weitere Schallquelle (2) mit einem Schalleistungspegel von 118 dB(A) befindet sich vor dem Gebäude C.

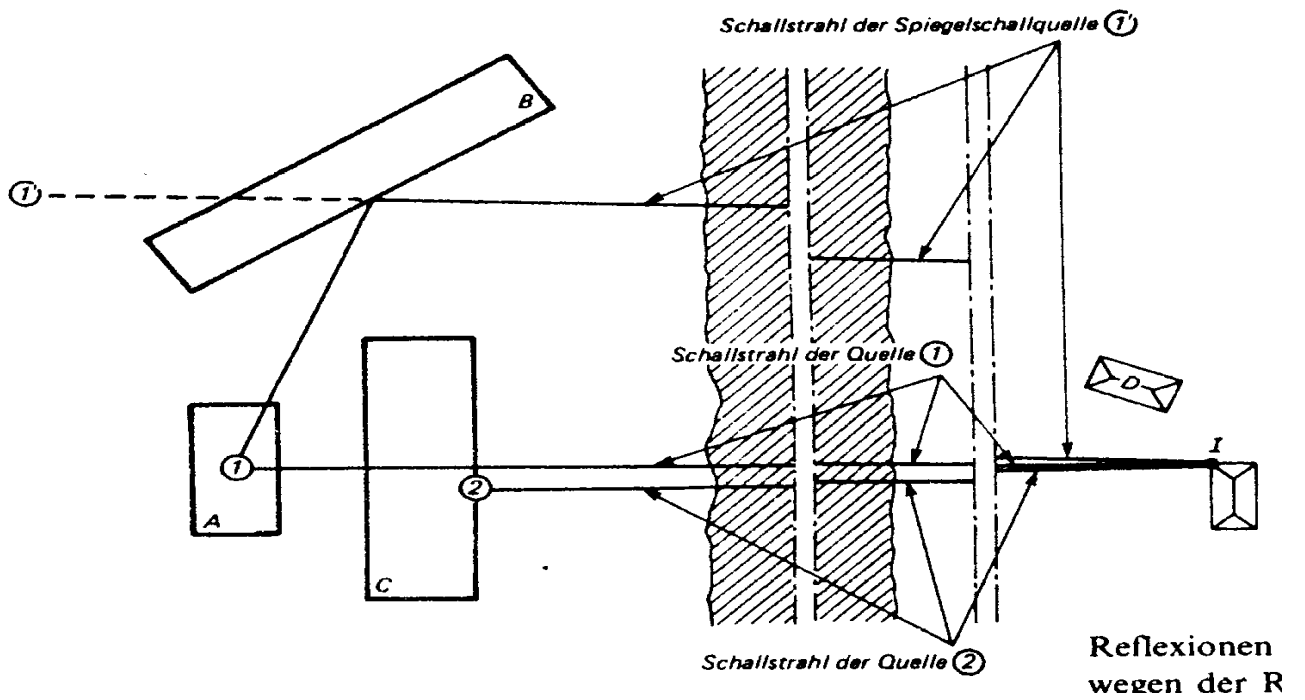
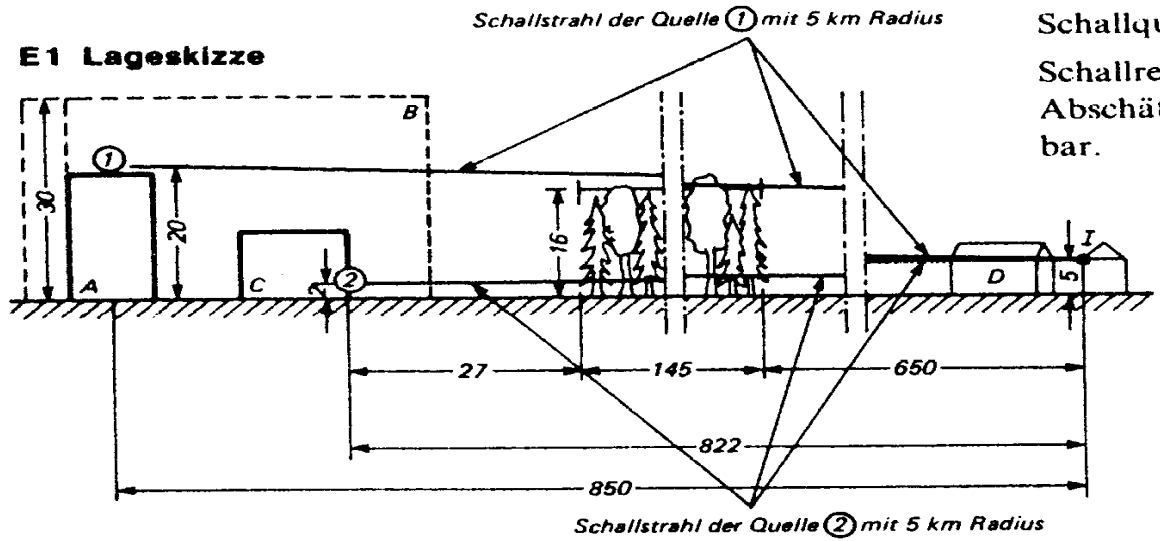
Reflexionen der Schallquelle (1) am Dach werden mit einem Raumwinkelmaß $K_0 = 3 \text{ dB}$ berücksichtigt (Abstrahlung in den Halbraum). Außerdem ist eine Reflexion am Gebäude B durch eine Spiegelschallquelle (1') zu erfassen oder ersatzweise wegen der im Vergleich zum Abstand s_m geringen Nachbarschaft von Schallquelle und Spiegelschallquelle durch ein Raumwinkelmaß von $K_0 = 6 \text{ dB}$ statt 3 dB für die Einzelschallquelle zu berücksichtigen. Reflexionen am Boden sind für die Schallquelle (1) wegen der Richtwirkung der Schallabstrahlung von einer Dachfläche auszuschließen. Die Richtwirkung selbst wird mit einem Richtwirkungsmaß von $DI = -5 \text{ dB}$ angenommen.

Reflexionen am Gebäude C bewirken für Schallquelle (2) ein Raumwinkelmaß $K_0 = 3 \text{ dB}$. Reflexionen am Boden erhöhen das Raumwinkelmaß auf $K_0 = 6 \text{ dB}$ (Abstrahlung in den Viertelraum).

Im Ausbreitungsweg von Schallquelle (1) sind weder Bewuchs noch Bebauung als Zusatzdämpfung wirksam. Für Schallquelle (2) ist der Weg durch den Bewuchs in voller Länge (weil $\leq 200 \text{ m}$) zu berücksichtigen.

Gesucht: Schallpegel am Immissionsort

E1 Lageskizze



Lösung

Zeile	Rechengröße	Zeichen	Einheit	Schallquellen bzw. zu berechnende Schallwege			
				Quelle 1	Quelle 2		
1	Schalleistungspegel	L_w	dB(A)				
2	Schallquellenhöhe	h_0	m				
3	Aufpunkt	h_A	m				
4	mittlere Höhe über Grund	h_m	m				
5	Abstand	s_m	m				
6	Schallweg durch Bewuchs (≤ 200 m)	s_D	m				
7	Schallweg durch Bebauung	s_G	m				
8	Richtwirkmaß	DI	dB				
9	Raumwinkelmaß	K_0	dB				
10	Abstandsmaß	D_s	dB				
11	Absorptionskoeffizient der Luft	α_L	dB / m				
12	Luftabsorptionsmaß	D_L	dB				
13	Boden- und Meteorologiedämpfungsmaß (≥ 0 dB)	D_{BM}	dB				
14	Einfügungsdämpfungsmaß	D_e	dB				
15	Bewuchsdämpfungskoeffizient	α_D	dB / m				
16	Bewuchsdämpfungsmaß	D_D	dB				
17	Bebauungsdämpfungsmaß	D_G	dB				
18	Summe $D_D + D_G$ (≤ 15 dB)	$D_D + D_G$	dB				
19	Schalldruckpegel am Aufpunkt	$L_{s,i}$	dB				
20	Gesamtschalldruckpegel am I- Ort	L_s	dB				

5.2 Nachweis Luftschalldämmung

Beispiel 5.8: Ermittlung von m'

Grundgleichung:

$$m' = \rho_w \cdot d$$

mit $\rho_w = \rho_N - ((\rho_N - K)/10)$

ρ_w Wandrohdichte [kg/m^3]

ρ_N Nennrohdichte der Steine oder Platten [kg/m^3]

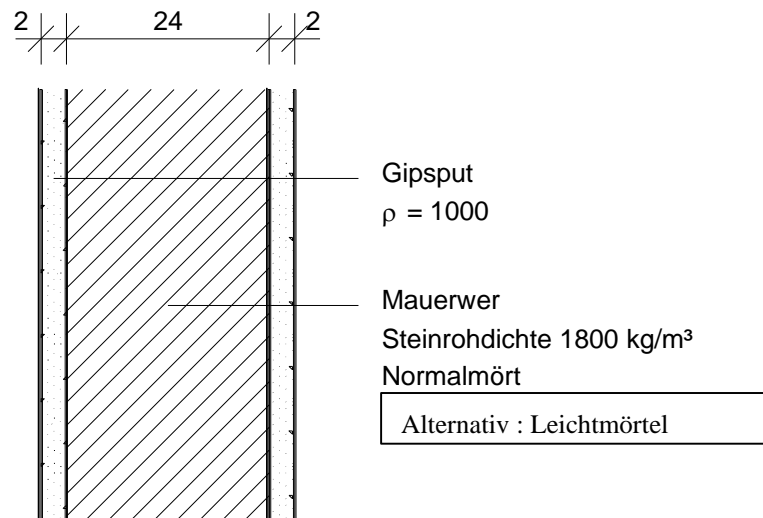
K Konstante mit

K = 1000 für Normalmörtel und Steinrohdichte $400 \leq \rho_N \leq 2200 \text{ kg}/\text{m}^3$

K = 500 für Leichtmörtel und Steinrohdichte $400 \leq \rho_N \leq 2200 \text{ kg}/\text{m}^3$

Gesucht:

Bestimmen Sie die flächenbezogene Masse der Wand.



Lösung :

Beispiel 5.9: Luftschalldämmung von Innenbauteilen in Massivbauart

Grundlagen:

$$R'_{w,R} = R'_{w,R}(300) + K_{L1} + (K_{L2}) \geq \text{erf } R'_w$$

mit

- $R'_{w,R}$ Rechenwert des bewerteten Schalldämm-Maßes
- $R'_{w,R}(300)$ Rechenwert des bewerteten Schalldämm-Maßes für das trennende Bauteil bei einer mittleren flächenbezogenen Masse der flankierenden Bauteile $m'_{Lm} \approx 300 \text{ kg/m}^2$ (Tab. 8.1, Tab 8.3)
- K_{L1} Korrekturwert für $m'_{Lm} \neq 300 \text{ kg/m}^2$ (Tab8.4)
- K_{L2} Korrekturwert für flankierende Bauteile mit Vorsatzschale oder aus biegeweichen Schalen (gilt nur für 2schalige trennende Bauteile) (Tabelle 8.5).

m'_R	Rohdecke allein	$R'_{wR}(300)$ in dB mit schwimmender Deckenauflage ¹⁾ oder und biegeweicher Unterdecke	
150	41	49	52
200	44	51	54
250	47	53	56
300	49	55	58
350	51	56	59
400	53	57	60
450	54	58	61
500	55	59	62

¹⁾ Geeignete Ausführungen in DIN 4109 Beiblatt 1 enthalten

Tab. 8-3 $R'_{wR}(300)$ von Massivdecken in Abhängigkeit von m'_R der Rohdecke für flankierende Bauteile mit $m'_{Lm} \approx 300 \text{ kg/m}^2$

Korrekturwert K_{L1}

Trennende Bauteile	K_{L1} in dB für m'_{Lm}						
	400	350	300	250	200	150	100
Einschalige biegesteife Wände und Decken	0			- 1			
Einschalige biegesteife Wände mit biegeweicher Vorsatzschale, Massivdecke mit schwimmendem Estrich bzw. Holzfußboden oder/und Unterdecke	+ 2	+ 1	0	- 1	- 2	- 3	- 4

Tab. 8-4 K_{L1} in dB für einschalige biegesteife Wände und Massivdecken als trennende Bauteile in Abhängigkeit von der mittleren flächenbezogenen Masse m'_{Lm} der flankierenden Bauteile

Gesucht:

Bestimmen Sie das bewertete Schalldämm-Maß einer Geschoßdecke. Die flankierenden Bauteile oberhalb und unterhalb laufen jeweils in einer Ebene. Die Bauteile haben den folgenden Aufbau

Geschoßdecke: 18 cm Stahlbeton mit schwimmendem Zementestrich

Flankierende Wände: einschalige Mauerwerkswände ohne Vorsatzschale mit den flächenbezogenen Massen $m'_{L1} = 195 \text{ kg/m}^2$, $m'_{L2} = 298 \text{ kg/m}^2$, $m'_{L3} = 90 \text{ kg/m}^2$, $m'_{L4} = 215 \text{ kg/m}^2$

Lösung:

Beispiel 5.10: zweischalige Gebäudetrennwand

Grundlagen:

$$R'_{w,R} = R'_{w,R}(m') + 12 \text{ dB}$$

mit

$R'_{w,R}(m')$ Summe der beiden Massen m'_1 der Einzelschalen nach Tab. 8-1.

Folgende Voraussetzungen sind dabei zur Gewährleistung einer möglichst tiefen Resonanzfrequenz f_0 einzuhalten:

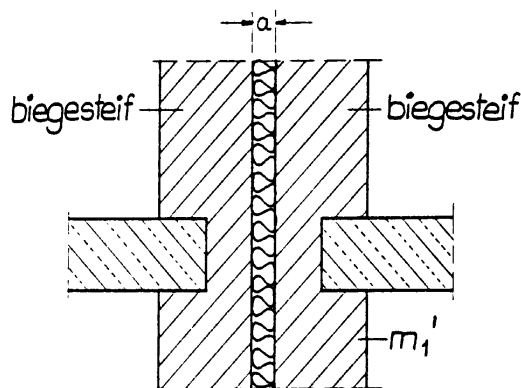
- $m'_1 \geq 100 \text{ kg/m}^2$ für $a \geq 50 \text{ mm}$
- $m'_1 \geq 150 \text{ kg/m}^2$ für $a \geq 30 \text{ mm}$ Ausfüllen des Hohlraumes mit mineralischen Faserdämmplatten, Typ T, ausgenommen für $m'_1 \geq 200 \text{ kg/m}^2$ und $a \geq 30 \text{ mm}$.

m' (kg/m²)	85	95	115	135	160	190	230	270	320	380	450	530
R'_{wR} (dB)	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56

Tab. 8-1 Rechenwerte $R'_{w,R}(300)$ des bewerteten Schalldämm-Maßes einschaliger biegesteifer Bauteile in Abhängigkeit von ihrer flächenbezogenen Masse m' für flankierende Bauteile mit $m'_{Lm} \approx 300 \text{ kg/m}^2$ (Auszug aus DIN 4109 Beiblatt 1)

Gesucht:

Bestimmen Sie das bewertete Schalldämm-Maß der skizzierten zweischaligen massiven Wandkonstruktion.



Die eine Schale besteht aus Mauerwerk $d = 11.5 \text{ cm}$ Steinrohddichte 1400 kg/m^3 und die andere aus $d = 17.5 \text{ cm}$ Steinrohddichte 1600 kg/m^3 . Beide Schalen sind mit Normalmörtel gemörtelt und mit einem 1 cm dicken Kalkputz ($\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$) verputzt. Die Dicke der Trennfuge beträgt 3 cm .

Lösung:

Beispiel 5.11: Luftschalldämmung von Innenbauteilen in Holz- und Skelettbauart**Grundlagen:**

a) Nachweis analog Massivbau

$$R'_{w,R} = R'_{w,R}(300) + K_{L1} + (K_{L2}) \geq \text{erf } R'_w$$

Die mittlere Masse der flankierenden Bauteile berechnet sich nach $m'_{Lm} = \left(\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n m'^{-2.5}_{Li} \right)^{-0.4}$

b) genauer Nachweis

$$R'_{w,R} = -10 \lg \left(10^{-R_{w,R}/10} + \sum_{i=1}^n 10^{-R'_{L,w,R,i}/10} \right)$$

$R'_{w,R}$ Rechenwert des resultierenden Schalldämm-Maßes

$R_{w,R}$ Rechenwert des bewerteten Schalldämm-Maßes des trennenden Bauteils ohne Längsleitung über flankierende Bauteile in dB

$R'_{L,w,R,i}$ Rechenwert des bewerteten Schalldämm-Maßes des i-ten flankierenden Bauteils am Bau in dB

c) vereinfachter Nachweis

$$R_{w,R} \geq \text{erf } R'_w + 5 \text{ dB}$$

$$R'_{w,L,R,i} \geq \text{erf } R'_w + 5 \text{ dB}$$

Gesucht:

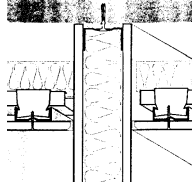
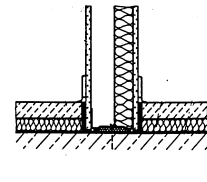
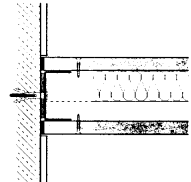
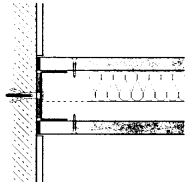
In einem Verwaltungsgebäude wird eine Montagewand ($d = 10 \text{ cm}$, zweilagig beplankt $m' \sim 46.5 \text{ kg/m}^2$, 40 mm Mineralwolle, $R_{w,R} = 50 \text{ dB}$ bzw. $R'_{w,r,(300)} = 49$) als Trennwand zwischen zwei Büroräumen aufgestellt. Sie wird im Bereich der massiven Außen- und Innenwand vollflächig angeschlossen. Die Trennwand wird auf die Rohdecke gestellt und am Kopfpunkt an der Massivdecke angeschlossen. Die Decke erhält einen schwimmenden Estrich. Die flankierenden Bauteile haben die folgenden flächenbezogenen Massen $m'_{\text{Decke}} = 300 \text{ kg/m}^2$, $m'_{\text{Flurtrennwand}} = 200 \text{ kg/m}^2$, $m'_{\text{Aussenwand}} = 250 \text{ kg/m}^2$.

Hält die Wand das erforderliche bewertete Schalldämm-Maß von $R'_{w,R} = 47 \text{ dB}$ ein? Führen sie die folgenden Nachweise:

- Nachweis analog der Massivbauart
- genauer Nachweis
- vereinfachter Nachweis

Lösung:

für den genauen Nachweis (b):

TRENNENDES BAUTEIL $R_{w,R}$ [dB]				
Trennwand	Montagewand d = 10 cm $R_{w,R} = 50$ dB			
FLANKIERENDE BAUTEILE $R_{L,w,R}$ [dB]				
Anschluß	oberer Anschluß	unterer Anschluß	seitlicher Anschluß	seitlicher Anschluß (innen)
Bauteil	Decke massiv $m' = 300$ kg/m ² 	schw. Estrich durch Trennwand konstruktiv getrennt 	Flurtrennwand massiv $m' = 200$ kg/m ² 	Außenwand massiv $m' = 250$ kg/m ² 
$R_{L,w,R}$	DIN 4109 Tab. 25 56 dB	DIN 4109 Tab. 29 70 dB	DIN 4109 Tab. 25 53 dB	DIN 4109 Tab. 25 55 dB
BEWERTETES SCHALLDÄMM- MASS MIT FLANKENÜBERTRAGUNG $R'_{w,R}$ [dB]				
$R'_{w,R} = -10 \lg (10^{-R_{w,R}/10} + \sum 10^{-R_{L,w,Ri}/10})$				
$R'_{w,R} = 46 \leq \text{erf. } R'_w = 47$ dB				
DIE KONSTRUKTION ERFÜLLT NICHT DIE ANFORDERUNG				

B

5.3 Nachweis Trittschallschutz

Beispiel 5.12 : Trittschallschutz von Decken

Grundlagen:

$$L'_{n,w,R} = L_{n,w,eq,R} - \Delta L_{w,R} - K_T \leq \text{zul. } L'_{n,w} - 2 \text{ dB}$$

mit

$L_{n,w,eq,R}$ Rechenwert der Rohdecke

$\Delta L_{w,R}$ Rechenwert für Deckenauflage/Bodenbelag

K_T ggfs. Korrekturwert zur Berücksichtigung der räumlichen Zuordnung zwischen "lautem" und "leisem" Raum (sofern nicht unmittelbar übereinander liegend) (s. Bild 8-19)

Flächenbezogene Masse der Massivdecke ohne Auflage kg/m ²	L _{n,w,eq,R} in dB	
	ohne	mit
	biegeweiche(r) Unterdecke	
135	86	75
160	85	74
190	84	74
225	82	73
270	79	73
320	77	72
380	74	71
450	71	69
530	69	67

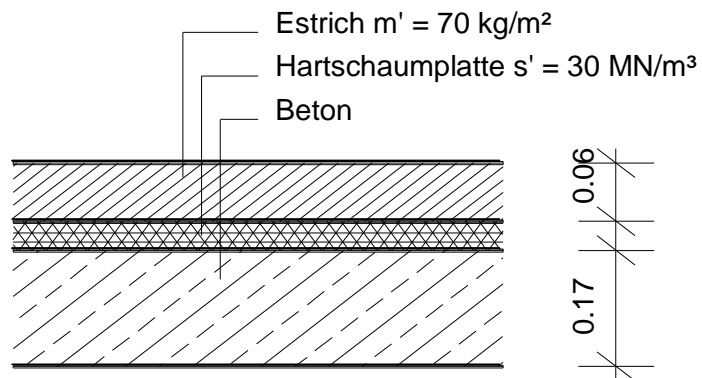
Tab. 8-8 Rechenwerte L_{n,w,eq,R} von Massivdecken in Abhängigkeit von m'_R der Rohdecke

Estriche nach DIN 18560 T2 mit einer flächenbezogenen Masse m' ≥ 70 kg/m ² auf Dämmschicht mit einer dynamischen Steifigkeit von höchstens s' (MN/m ³)	ΔL _{w,R} (dB)
50	22 (23)
40	24 (25)
30	26 (27)
20	28 (30)
15	29 (33)
10	30 (34)

Tab. 8-9 Rechenwerte ΔL_{w,R} von schwimmenden Estrichen auf Dämmschichten in Abhängigkeit von der dynamischen Steifigkeit s' der Dämmschicht; Werte in () mit weichfederndem Gehbelag mit ΔL_{w,R} ≥ 20 dB

Gesucht:

- Hält die folgende Deckenkonstruktion den zulässigen Normtrittschallpegel von $L'_{n,w} = 53$ dB ein?
- Welche Dämmschicht muß ausgewählt werden um einen Normtrittschallpegel von $L'_{n,w} = 46$ dB zu erreichen?

**Lösung:**

5.4 Raumakustik

Um die Sprachverständlichkeit innerhalb von Räumen, insbesondere in Versammlungs-, Unterrichts- oder Büroräumen zu verbessern, bzw. den Lärmpegel in lärmintensiven Bereichen zu reduzieren werden die raumakustischen Parameter dieser Räume untersucht.

5.4.1.1 Raumakustische Anforderung

Die Halligkeit eines Raumes wird physikalisch durch seine Nachhallzeit T gekennzeichnet. Die Nachhallzeit ist die Zeitspanne, in welcher der Schallpegel in einem Raum, nach Abstellen der Schallquelle um 60 dB absinkt.

Die Nachhallzeit berechnet sich wie folgt (nach Sabine):

$$T = 0.163 V/A$$

mit

T Nachhallzeit [s]

V Raumvolumen [m^3]

A äquivalente Schallabsorptionsfläche einschl. Luftabsorption

$$A = \sum \alpha_j \cdot S_j + 4 \cdot m_{\text{Luft}} \cdot V$$

In Anlehnung an DIN 18041 ergibt sich die zulässige Nachhallzeit für Sprache in Abhängigkeit vom Raumvolumen. Sie darf um $\pm 20\%$ vom Sollwert abweichen und zu hohen Frequenzen abfallen. Sie kann den Diagrammen im Anhang entnommen werden.

Beispiel 5.13 : Berechnung der Nachhallzeit nach Sabine

Betrachtet wird ein Versammlung- bzw. Schulungsraum in einem Bürogebäude. Das Gebäude wird in Stahlbeton- Skelettbauweise errichtet. Alle Innenwände sind in Trockenbauweise errichtet. Die Wand zum Innenhof ist komplett verglast.

Die Maße sind den im Anhang beigefügten Zeichnungen zu entnehmen.

Weitere Angaben zu den Raumbegrenzungsflächen:

Nr.	Bauteil	Material/ Art
1	Fußboden	Teppich, $d = 4 \text{ mm}$
		Personen (15)
2	Wände	Verglasung
		Gipskarton, tapeziert
		Türen
3	Decke	Gipskarton, glatt
		<i>optional</i> absorbierende Decke

Arbeitsschritte:

- Ermittlung der zulässigen Nachhallzeiten
- Flächenermittlung
- Bestimmung der Nachhallzeit im Bestand
- Wahl geeigneter Verbesserungsmaßnahmen
- Überprüfung der Nachhallzeit

5.5 EDV-Übungen

5.5.1.1 Verwendetes Programm: BASTIAN o.ä.

Beispiel 5.14

Für den im Übungsbeispiel 5.11 behandelten Raum sollen die bauakustischen Nachweise geführt werden. Im einzelnen sind folgende Nachweise zu führen:

- Decke: Trittschall, vertikal
Trittschall, horizontal
Luftschall, vertikal
- Flurtrennwand: Luftschall, horizontal (Tür beachten)
- Trennwände zu angrenzenden Räumen: Luftschall, horizontal
- „Außenwand“ zum Innenhof: Luftschall, horizontal

Anforderungen:

(vergl. Skript S. 23/ 24 bzw. Bbl. 2 zur DIN 4109)

Decken:	$L'_{n,w} \leq$ _____ dB
	$R'_w \geq$ _____ dB
Flurtrennwand:	$R'_w \geq$ _____ dB
Türen:	$R_w \geq$ _____ dB
Trennwände:	$R'_w \geq$ _____ dB

Sonstiges:

- Decken Stahlbeton, Rohdichte 2300 kg/m³
- Wände: Montagewände: d = 12,5 cm, doppelte Beplankung mit je d = 12,5 mm Gipsfaserplatten m' = 15/kg/m², 50 mm Mineralfaserdämmstoff ($R_{w,R} = 57$ dB, $R_{L,w,R} = 53$ dB)
- Anschluß an Fassade: Trennwandschwert ($R_{w,R} = 48$ dB, $R_{L,w,R} = 50$ dB)