

Hohmann | Setzer | Wehling

BAUPHYSIKALISCHE FORMELN UND TABELLEN

Wärmeschutz – Feuchteschutz – Schallschutz

4., neu bearbeitete Auflage 2004

Inhalt

1	Physikalische Größen, SI-Einheiten	1
1.1	Physikalische Größen, Formelzeichen, Einheiten	1
1.1.1	Physikalische Größen	1
1.1.2	Formelzeichen	1
1.1.3	Einheiten	1
1.1.4	Grundgrößen und Grundeinheiten	1
1.1.5	Vielfache und Teile der SI-Einheiten	2
1.1.6	Griechische Buchstaben	2
1.1.7	Abgeleitete Größen	2
2	Wärmeschutz	6
2.1	Wärmemenge	6
2.2	Wärmeleitung	6
2.3	Wärmedurchlasswiderstand	7
2.3.1	Wärmedurchgangswiderstand	7
2.3.2	Wärmeübergangswiderstände	7
2.4	Wärmestrom	8
2.5	Wärmestromdichte	8
2.6	Konvektion	9
2.7	Strahlung	9
2.7.1	Spektrum elektromagnetischer Strahlung	9
2.7.2	Strahlungsmenge, Strahlungsenergie	10
2.7.3	Strahlungsleistung	10
2.7.4	Spezifische Ausstrahlung	10
2.7.5	Spektrale spezifische Ausstrahlung	11
2.7.6	Strahlung des schwarzen Körpers	11
2.7.7	Emission eines beliebigen Körpers	13
2.7.8	Absorption, Reflexion, Transmission	14
2.7.8.1	Absorption und Emission	15
2.7.8.2	Strahlungsaustausch zwischen parallelen Flächen	15
2.8	Wärmedurchgangskoeffizient	18
2.8.1	Ein- und mehrschichtige Bauteile	18
2.8.2	Temperaturverlauf bei mehrschichtigen Bauteilen	18
2.8.3	Graphische Verfahren zur Temperaturermittlung	19
2.8.4	Wärmebilanz für eine Bauteilschicht	20
2.8.5	Bauteil mit inhomogenen Schichten (DIN EN ISO 6946)	21
2.8.5.1	Bauteil mit keilförmigen Schichten (DIN EN ISO 6946)	22
2.8.5.2	Berücksichtigung von nichtebenen Oberflächen	23
2.8.5.3	Wärmedurchgangskoeffizient von Fenstern	24
2.8.5.3.1	Wärmedurchgangskoeffizient von Isolierverglasungen	24
2.8.5.3.2	Wärmedurchgangskoeffizient von Fenstersystemen	25

2.8.6	Wärmedurchgang bei Rohren	28
2.8.7	Erdberührte Bauteile	29
2.8.7.1	Grundlegende Parameter	29
2.8.7.2	Berechnungsansätze für U-Werte von erdberührten Bauteilen	30
2.8.7.3	Bodenplatte auf Erdreich	31
2.8.7.4	Gebäude mit aufgeständerter Bodenplatte (Kriechkeller)	33
2.8.7.5	Gebäude mit beheiztem, teilweise beheiztem und unbeheiztem Keller	34
2.9	Wärmedurchlasswiderstand von Luftschichten	36
2.9.1	Ruhende Luftschichten nach DIN EN ISO 6946	36
2.9.2	Schwach belüftete Luftschichten nach DIN EN ISO 6946	37
2.9.3	Stark belüftete Luftschichten nach DIN EN ISO 6946	37
2.9.4	Unbelüftete Lufträume mit einer Länge und Breite von mehr als dem 10fachen der Dicke	38
2.9.5	Kleine oder unterteilte unbelüftete Lufträume	39
2.10	Korrekturen für U-Werte	39
2.10.1	Korrekturen für mechanische Befestigungsteile	39
2.10.2	Korrekturen für Luftspalte	40
2.10.3	Korrektur für Umkehrdächer	40
2.11	Wärmebilanz für einen Raum	42
2.12	Winterlicher und sommerlicher Wärmeschutz	43
2.12.1	Winterlicher Wärmeschutz – Nachweise und Anforderungen	43
2.12.2	Sommerlicher Wärmeschutz – Nachweise	44
2.12.2.1	Zulässige Fensterflächenanteile ohne genauen Nachweis	44
2.12.2.2	Genauer Nachweis nach DIN 4108-2	45
3	Energieeinsparverordnung (EnEV)	49
3.1	Zonen, Systemgrenzen, Umfassungsflächen und beheiztes Volumen	50
3.1.1	Zonensystem der DIN EN 832	50
3.1.2	Systemgrenze	50
3.1.3	Wärmeübertragende Umfassungsfläche	51
3.1.4	Beheiztes Gebäudevolumen	52
3.2	Anforderungen an zu errichtende Gebäude mit normalen Innentemperaturen	52
3.3	Jahresprimärenergiebedarf	54
3.4	Jahresheizwärmebedarf	54
3.4.1	Bilanzierungsverfahren der EnEV	54
3.4.2	Jahresheizwärmebedarf nach dem vereinfachten Verfahren	55
3.4.2.1	Berechnung der Transmissionswärmeverluste	56
3.4.2.2	Berechnung der Lüftungswärmeverluste	57
3.4.2.3	Berechnung der solaren Wärmegewinne	58
3.4.2.4	Berechnung der internen Gewinne	59
3.4.2.5	Bestimmung der energetischen Aufwandszahl	59
3.4.3	Jahresheizwärmebedarf nach dem Monatsbilanzverfahren	60
3.4.3.1	Monatliche Wärmeverluste	61
3.4.3.2	Berechnung der Transmissionswärmeverluste	61

3.4.3.2.1	Transmissionswärmeverluste mit Temperatur-Korrekturfaktoren	61
3.4.3.2.2	Transmissionswärmeverluste nach DIN EN 832	63
3.4.3.2.3	Spezifischer Wärmebrückenzuschlag	64
3.4.3.2.4	Ermittlung des Zuschlages bei der Verwendung von Flächenheizungen	65
3.4.3.3	Berechnung der Lüftungswärmeverluste	66
3.4.3.3.1	Bestimmung des beheizten Luftvolumens	66
3.4.3.3.2	Lüftungswärmeverluste bei natürlicher Lüftung	66
3.4.3.3.3	Anforderungen an die Dichtigkeit	67
3.4.3.3.4	Lüftungswärmeverluste bei mechanischer Lüftung	67
3.4.3.4	Wirksame Speicherfähigkeit	68
3.4.3.5	Berücksichtigung von Nachtabenkungen und Nachtabstaltungen	69
3.4.3.6	Berechnung des Wärmebedarfs für die Warmwassergewinnung	72
3.4.3.7	Berechnung der monatlichen Gewinne	72
3.4.3.8	Berechnung der monatlichen solaren Wärmegewinne	72
3.4.3.8.1	Berechnung der solaren Gewinne über transparente Bauteile	73
3.4.3.8.2	Berechnung der solaren Gewinne bei unbeheizten Glasvorbauten	73
3.4.3.8.3	Berechnung der solaren Gewinne von opaken Bauteilen	74
3.4.3.8.4	Berechnung der solaren Gewinne bei transluzenter Wärmedämmung	75
3.4.3.9	Berechnung der monatlichen internen Gewinne	75
3.4.3.10	Ausnutzung von Wärmegewinnen	76
3.4.4	Ermittlung der energetischen Aufwandszahl e_p	77
3.4.4.1	Definition der Aufwandszahl	77
3.4.4.2	Bestimmung der energetischen Aufwandszahl	77
3.5	Anforderungen an zu errichtende Gebäude mit niedrigen Innentemperaturen	79
3.6	Gebäude mit geringem Volumen	79
3.7	Anforderungen der EnEV an die bestehende Bebauung	80
3.8	Anforderungen zur Begrenzung der Wärmeabgabe von Wärme- verteilungs- und Warmwasserleitungen sowie Armaturen	81
3.9	Sommerlicher Wärmeschutz	82
4	Temperaturfelder	83
5	Wärmebrücken	85
5.1	Unterscheidung der verschiedenen Wärmebrücken	85
5.2	Konstruktive bzw. materialbedingte Wärmebrücken	86
5.2.1	Linienförmige Wärmebrücken	86
5.2.2	Punktförmige Wärmebrücken	87
6	Instationäres Verhalten von Bauteilen	88
6.1	Temperaturwellen in homogenen Materialien	88
6.2	Temperaturamplitudenverhältnis	89
6.2.1	Berechnung der Temperaturamplitudendämpfung	91
6.3	Numerische Lösung der Fourier-Differentialgleichung	94

7	Thermische Längenänderung	97
7.1	Längenänderung	97
7.2	Spannungen	97
8	Feuchtetechnische Grundbegriffe	99
8.1	Gasgesetze	99
8.2	Zustandsformen des Wassers	102
8.3	Wasserdampfsättigungskonzentration	103
8.4	Absolute Luftfeuchte	104
8.5	Wasserdampfsättigungsdruck	104
8.6	Wasserdampfpartialdruck	106
8.7	Relative Luftfeuchte	106
8.8	Taupunkttemperatur	107
9	Poreneinteilung und Feuchtegehalte von Baustoffen	109
9.1	Poreneinteilung	109
9.2	Massebezogener Feuchtegehalt	110
9.3	Volumenbezogener Feuchtegehalt	110
9.4	Sorptionsisothermen	111
9.4.1	Praktischer Feuchtegehalt	114
9.4.2	Kritischer Feuchtegehalt	115
10	Wasserdampfdiffusion	116
10.1	Wasserdampf-Diffusionsstromdichte	119
10.2	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl	120
10.3	Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke	120
10.4	Wasserdampf-Diffusionswiderstand	121
10.5	Wasserdampfpartialdruck an der Bauteiloberfläche	122
10.6	Gegenüberstellung der wärme- und diffusionstechnischen Größen	122
11	Tauwasserfreiheit auf der Oberfläche	124
11.1	Maßnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung (nach DIN 4108-2)	124
11.2	Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte nach DIN EN ISO 13788	126
11.3	Mindestwärmeschutz	129
11.4	Mindestwärmedurchlasswiderstand	129
11.5	Mindestwärmedurchgangswiderstand	129
11.6	Maximal zulässiger Wärmedurchgangskoeffizient	130
12	Feuchteschutz nach DIN 4108 „Wärmeschutz im Hochbau“	131
12.1	Tauwasser im Bauteilquerschnitt	131
12.1.1	Berechnung der Tauwassermenge und Verdunstungsmenge	131
12.1.1.1	Tauperiode	131
12.1.1.2	Verdunstungsperiode	133

12.1.2	Zusammenstellung der verschiedenen Fälle für das Glaser-Verfahren	135
12.1.2.1	Kein Tauwasser im Bauteil	135
12.1.2.2	Tauwasser im Bauteil (eine Tauwasserebene)	136
12.1.2.3	Tauwasser im Bauteil (zwei Tauwasserebenen)	137
12.1.2.4	Tauwasser im Bauteil (Tauwasserbereich)	138
12.1.2.5	Verdunstungsperiode bei einer Dachkonstruktion mit einem Temperaturgefälle von der Dachoberfläche zur Innenoberfläche	138
12.2	Normbedingungen zur Berechnung der Tauwassermenge und der Verdunstungsmenge nach DIN 4108	139
12.3	Anforderung an den Feuchteschutz nach DIN 4108	139
12.4	Bauteile für die kein rechnerischer Tauwassernachweis erforderlich ist	140
13	Bemessung einer Dampfbremse	143
14	Maximal zulässige Raumlufftfeuchte	146
15	Feuchtebilanz für einen Raum	147
16	Kapillarität und kapillares Saugen	150
16.1	Oberflächenspannung	150
16.2	Randwinkel	151
16.3	Maximale kapillare Steighöhe	153
16.4	Kapillares Saugen	154
16.5	Wasseraufnahmekoeffizient	158
16.6	Schlagregenschutz	160
17	Schalltechnische Grundlagen	164
17.1	Schwingungen	164
17.2	Frequenz und Frequenzanalyse	165
17.3	Schallwellen	166
17.3.1	Wellenlänge	167
17.3.2	Wellenzahl	168
17.4	Schalldruck	168
17.5	Schallschnelle	170
17.6	Schallwellenwiderstand	170
17.7	Schallgeschwindigkeit	171
17.7.1	Schallgeschwindigkeit in Festkörpern	171
17.7.2	Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten	172
17.7.3	Schallgeschwindigkeit in Gasen	172
17.7.4	Schallgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien	173
17.8	Schallintensität	173
17.9	Schalleistung	174
17.10	Schallenergiedichte	174
17.11	Grundlagen der technischen Akustik	176
17.11.1	Schallspektren	176

17.11.2	Lineare und logarithmische Einteilung	177
17.11.3	Terz und Oktavbänder	178
17.11.4	Filter	179
17.11.5	Frequenzbereiche	180
17.11.6	Schallpegel und dB-Skala	180
17.11.7	Schallintensitätspegel	181
17.11.8	Schalldruckpegel	181
17.11.9	Schallschnellepegel	183
17.11.10	Schalleistungspegel	183
17.12	Rechnen mit Schallpegeln	184
17.12.1	Schallpegeladdition	184
17.12.2	Schallpegelsubtraktion	186
17.12.3	Addition von Schallpegeln gleicher Intensität	187
17.12.4	Addition zweier Schallpegel	188
17.12.5	Mittelungspegel	189
17.12.5.1	Energieäquivalenter Dauerschallpegel	189
17.12.5.2	Taktmaximalpegel	192
17.12.5.3	Schallereignispegel	192
17.13	Menschliches Hörempfinden	193
17.14	Lautstärke	194
17.15	Bewertung von Schallpegeln	195
17.15.1	Frequenzbewertung	195
17.15.2	Zeitbewertung	197
17.15.3	Beurteilungspegel	198
18	Schallausbreitung im Freien	200
18.1	Geometrische Ausbreitungsdämpfung	202
18.1.1	Punktschallquelle	202
18.1.2	Linien-schallquelle	203
18.2	Beurteilungspegel nach DIN 18005	205
18.3	Beurteilungspegel nach DIN ISO 9613-2	208
18.4	Dämpfungsterme bei der Schallausbreitung	211
18.4.1	Geometrische Ausbreitung	212
18.4.2	Pegelminderung durch Luftabsorption	212
18.4.3	Einfluss von Bodenabsorption	213
18.5	Pegelminderung durch Abschirmung	215
18.5.1	Pegelminderung durch Bewuchs	218
18.5.2	Pegelminderung durch meteorologische Einflüsse (Temperatur, Wind)	219
18.5.2.1	Einfluss der Temperatur	219
18.5.2.2	Einfluss der Windrichtung und -geschwindigkeit	220
18.5.3	Pegelminderung durch Bebauung	220
18.5.3.1	Pegelminderung während der Schallausbreitung durch Installationen in Industrieanlagen	220
18.5.3.2	Pegelminderung durch Bebauung	221
18.5.3.3	Einfluss der Gebäudeorientierung auf die Schallausbreitung	222

18.5.4	Pegelerhöhung durch Reflexionen	222
19	Bauteil im Schallfeld	225
19.1	Reflexion, Transmission, Absorption	225
19.2	Beugung	226
20	Raumakustik	228
20.1	Schallabsorptionsgrad	228
20.2	Äquivalente Schallabsorptionsfläche	228
20.3	Schallausbreitung in Räumen	232
20.3.1	Schallpegel im Raum	232
20.3.2	Hallradius	235
20.4	Nachhallzeit	239
20.5	Optimale Nachhallzeiten	241
20.6	Schallpegelminderung durch Schallschluckung	246
20.7	Absorber und Resonatoren	247
20.7.1	Poröser Absorber	247
20.7.2	Resonatoren	249
20.7.2.1	Plattenresonator	249
20.7.2.2	Lochplattenschwinger	250
20.7.2.3	Helmholtzresonator	252
20.7.3	Bewerteter Schallabsorptionsgrad nach DIN EN ISO 11654	254
20.7.3.1	Praktischer Schallabsorptionsgrad	255
20.7.3.2	Bewerteter Schallabsorptionsgrad	255
20.7.3.3	Klassifizierung des Schallabsorbers	256
20.7.3.4	Formindikatoren	256
20.8	Anordnung von Absorbern und Reflektoren	257
20.9	Raumresonanzen	259
21	Bauakustik	261
21.1	Schalltransmissionsgrad	261
21.2	Schalldämm-Maß	261
21.3	Schallabstrahlung aus einem diffusen Schallfeld über ein Bauteil	263
21.4	Schallabstrahlung in ein Diffusfeld	264
21.5	Schallabstrahlung ins Freifeld	266
22	Schalldämmung von Bauteilen	267
22.1	Schalldämmung einschaliger Bauteile	267
22.1.1	Prinzipieller Verlauf des Schalldämm-Maßes	267
22.1.2	Bergersches Massengesetz	267
22.1.3	Koinzidenzgrenzfrequenz	268
22.2	Schalldämmung zweischaliger Bauteile	273
22.2.1	Prinzipieller Verlauf des Schalldämm-Maßes	273
22.2.2	Resonanzfrequenz des Systems	275

22.2.3	Koinzidenzgrenzfrequenz der einzelnen Schalen	276
22.2.4	Stehende Welle	276
23	Luftschallschutz	278
23.1	Luftschallschutztechnische Kenngrößen	278
23.1.1	Schallpegeldifferenz	278
23.1.2	Schalldämm-Maß	279
23.1.3	Bewertetes Schalldämm-Maß/bewertetes Bauschalldämm-Maß	279
23.1.4	Normschallpegeldifferenz	283
23.1.5	Bewertete Normschallpegeldifferenz	284
23.1.6	Schalldämmung von Schächten und Kanälen	284
23.2	Schalldämmung zusammengesetzter Flächen	284
24	Schallschutz nach DIN 4109	287
24.1	Schutz gegen Außenlärm	287
24.2	Luftschallschutz im Gebäudeinneren	289
24.2.1	Schallübertragungswege	289
24.2.2	Nachweisverfahren	290
24.2.2.1	Massivbauten mit biegesteifer Anbindung der flankierenden Bauteile	290
24.2.2.2	Holz- und Skelettbauten mit biegeweicher Anbindung der flankierenden Bauteile	292
24.2.2.3	Nachweis mit bauakustischen Messungen (Eignungsprüfungen)	293
24.2.3	Zweischalige Haustrennwände aus zwei schweren biegesteifen Schalen mit durchgehender Trennfuge	294
24.2.4	Wasserinstallationen – Anforderungen und Anordnung	294
24.3	Nachweisverfahren nach DIN EN 12354	296
24.3.1	Allgemeine Grundlagen	296
24.3.2	Vereinfachtes Modell	299
25	Trittschallschutz	305
25.1	Trittschalltechnische Kenngrößen	305
25.1.1	Trittschallpegel	306
25.1.2	Norm-Trittschallpegel	306
25.1.3	Bewerteter Norm-Trittschallpegel	306
25.1.4	Äquivalenter bewerteter Norm-Trittschallpegel	308
25.1.5	Trittschallminderung	308
25.1.6	Trittschallverbesserungsmaß einer Deckenauflage	309
25.2	Nachweisverfahren zum Trittschallschutz	309
25.2.1	Nachweis nach DIN 4109	309
25.2.2	Vereinfachter Nachweis nach DIN EN 12354-2	309
26	Ermittlung der Einzahlangaben für die Trittschalldämmung	312
26.1	Bewertungsverfahren	312
26.2	Ermittlung des äquivalenten bewerteten Norm-Trittschallpegels	314
26.3	Ermittlung des Trittschallverbesserungsmaßes von Deckenauflagen	315

26.4	Berechnung des Spektrum-Anpassungswertes	316
27	Maschinengeräusche	318
27.1	Körperschall	322
27.2	Schwingungen	324
28	Tabellen zum Wärme-, Feuchte- und Schallschutz	326
28.1	Tabellenüberblick	326
28.1.1	Tabellen zum Wärme- und Feuchteschutz	326
28.1.2	Tabellen zum Schallschutz und zur Raumakustik	328
28.2	Tabellen zum Wärme- und Feuchteschutz	330
28.2.1	Anforderungen zum Wärmeschutz	330
28.2.2	Kennwerte zum Wärme- und Feuchteschutz	333
28.3	Tabellen zum Schallschutz und zur Raumakustik	397
28.3.1	Anforderungen und Empfehlungen zum Schallschutz	397
28.3.2	Schallschutztechnische und akustische Kennwerte	414
29	Anschriften	459
30	Literatur	463
30.1	Bücher	463
30.2	DIN-Normen	465
30.3	VDI-Richtlinien	468
30.4	Verordnungen	468
30.5	Richtlinien	468
	Stichwortverzeichnis	469