

Peter Häupl

Bauphysik

Klima Wärme Feuchte Schall

Grundlagen, Anwendungen, Beispiele



Aktiv in Mathcad

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
KLIMA	3
1 Außen- und Raumklima	3
1.1 Außenklima	4
1.1.1 Außenlufttemperatur	5
1.1.1.1 Jahresgang der Außenlufttemperatur	5
1.1.1.2 Simulation des tatsächlichen Temperaturganges	7
1.1.1.3 Tagesgang der Außenlufttemperatur	11
1.1.1.4 Summenhäufigkeit der Außenlufttemperatur	12
1.1.2. Wärmestrahlungsbelastung	13
1.1.2.1 Kurzwellige Strahlungswärmestromdichte auf eine Horizontalfläche	14
1.1.2.2 Strahlungswärmestromdichte auf eine beliebig orientierte und geneigte Fläche	16
1.1.2.3 Langwellige Abstrahlung	27
1.1.3 Wasserdampfdruck und relative Luftfeuchtigkeit	28
1.1.3.1 Wasserdampf sättigungsdruck	28
1.1.3.2 Tatsächlicher Wasserdampfdruck	31
1.1.3.3 Relative Luftfeuchtigkeit	31
1.1.4 Niederschlag und Wind	33
1.1.4.1 Regenstromdichte	33
1.1.4.2 Windgeschwindigkeit und Windrichtung	34
1.1.4.3 Windniederschlagsgebiete	36
1.1.5 Schlagregenstromdichte auf eine vertikale Gebäudefläche	37
1.1.6 Testreferenzjahr	44
1.1.7 Lokalklimate	47
1.2 Raumklima	48
1.2.1 Raumtemperaturen	48
1.2.1.1 Energieumsatz des Menschen	48
1.2.1.2 Raumlufttemperatur, Umschließungsflächen- und Empfindungstemperatur	50
1.2.2 Raumluftfeuchte	51
1.2.2.1 Relative Luftfeuchtigkeit – Raumklimaklassen	51
1.2.2.2 Enthalpie und Wasserdampfgehalt (h-x-Diagramm)	57
1.2.2.3 Taupunkttemperatur	59
1.2.2.4 Einfluss der Luftfeuchte und Strömungsgeschwindigkeit auf die Behaglichkeit	60

WÄRME	63	
2 Grundlagen des Wärmetransportes		63
2.1 Wärmeleitung		63
2.1.1 Wärmeleitungsgleichung		63
2.1.2 Stationäre Lösung der Wärmeleitungsgleichung		70
2.2 Wärmekonvektion		74
2.2.1 Transportgleichungssystem für kombinierte Wärmeleitung und Wärmeströmung		74
2.2.2 Konvektiver Wärmeübergang an einer Bauteiloberfläche		76
2.2.3 Ähnlichkeit von Strömungs – und Temperaturfeldern		77
2.3 Wärmestrahlung		79
2.3.1 Strahlungsgesetze		79
2.3.2 Strahlungswärmeaustausch zwischen Bauteiloberflächen		83
2.3.2.1 Wärmestrahlung zwischen zwei planparallelen Flächen		83
2.3.2.2 Wärmestrahlung zwischen zwei beliebigen sich umschließenden Flächen		84
2.3.2.3 Einstrahlzahlen		85
2.4 Gesamtwärmeübergang an einer Bauteiloberfläche		89
3 Thermisches Verhalten von Bauwerksteilen		91
3.1 Stationärer Wärmedurchgang bei mehrschichtigen Bauwerksteilen		91
3.1.1 Ermittlung des vorhandenen Wärmewiderstands R, des Wärmedurchgangswertes U und des stationären Temperaturprofils im Winter		91
3.1.2 Mindestanforderungen an den R-Wert bzw. an den U-Wert		97
3.1.2.1 Kriterium 1 : Tauwasserfreiheit an der Bauteiloberfläche		98
3.1.2.2 Kriterium 2 : Vermeidung von Schimmel an Bauteiloberflächen		100
3.1.2.3 Kriterium 3 : Vermeidung einer Abkühlung der Bauteiloberfläche unter 17° C		103
3.1.3 Wärmedurchgang parallel liegender Bauteile		105
3.1.4 Wärmedurchgang bei Fenstern		106
3.1.5 Belüftete Umfassungskonstruktionen		111
3.1.5.1 Belüftete Außenwand		111
3.1.5.2 Belüftetes Steildach		121
3.1.5.3 Vergleich der Spalttemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit mit Messergebnissen		130
3.1.6 Wärmedurchgang beim Umkehrdach		132

3.2	Wärmebrücken	134
3.2.1	Steg als einfache Wärmebrücke	134
3.2.2	Gebäudewinkel	140
3.3	Dämpfung einer Temperaturwelle im Bauteil	145
3.3.1	Berechnung des stationären Temperaturfeldes im Bauteil	145
3.3.2	Wärmespeicherung bei periodischer Belastung	151
3.3.2.1	Wärmestromdichte und gespeicherte Wärme	151
3.3.2.2	Wärmeabsorptionskoeffizient und speicherwirksame Masse	152
3.3.2.3	Vektorschreibweise von instationären Wärmewiderständen	156
3.3.3	Temperaturfeld bei anliegendem TRY-Klima	157
3.4	Wärmeableitung durch Fußböden	158
3.4.1	Instationäre Temperaturfelder bei sprunghörmiger Belastung	158
3.4.2	Wärmeentzug durch Leitung und Speicherung	159
3.4.2.1	Wärmeableitung am unbedeckten Fuß	159
3.4.2.2	Wärmeableitung am bedeckten Fuß	161
3.4.3	Anforderungen an den Fußbodenaufbau zur Begrenzung der Fußwärmeableitung	162
4	Thermisches Verhalten von Räumen und Gebäuden	167
4.1	Thermisches Verhalten von Gebäuden während der Heizperiode	167
4.1.1	Wärmestrombilanz während der Heizperiode – Heizwärmebedarf	169
4.1.1.1	Bilanz der Verlust- und Gewinnwärmeströme zur Berechnung des Heizwärmebedarfs	169
4.1.1.2	Transmissionswärmestrom und Transmissionswärmeverlust	172
4.1.1.3	Lüftungswärmestrom und Lüftungswärmeverlust	172
4.1.1.4	Strahlungswärmestrom und Wärmegewinn durch die verglasten Bauteile	176
4.1.1.5	Strahlungswärmestrom und Wärmegewinn durch die opaken Bauteile	177
4.1.1.6	Wärmestrom der internen Wärmequellen	179
4.1.2	Näherungsbeziehungen für den vorhandenen Heizwärmebedarf und den zulässigen Heizwärmeverbrauch	179
4.1.2.1	Näherungsbeziehungen für den vorhandenen spezifischen Heizwärmebedarf	179
4.1.2.2	Näherungsbeziehungen für den zulässigen spezifischen Heizwärmeverbrauch	181
4.1.2.3	Zulässiger Heizwärmeverbrauch lediglich in Abhängigkeit von der Nutzfläche A_N	183

4.1.3	Periodische Gebäudebelastung – Länge der Heizperiode und Höhe der Heizgrenztemperaturen	184
4.1.3.1	Länge der Heizperiode und Höhe der Heizgrenztemperaturen ohne und mit Berücksichtigung der Bauwerksmasse	184
4.1.3.2	Begrenzung der Länge der Heizperiode durch eine Mindestraumlufttemperatur bei freier Klimatisierung	189
4.1.4	Primärenergie Q_p und Anlagenaufwandszahl e_p	193
4.1.5	Zulässiger spezifischer Primärenergieverbrauch Q_p^*	195
4.1.5.1	Zulässiger spezifischer Primärenergieverbrauch Q_p^* in Abhängigkeit von A_v/V	195
4.1.5.2	Zulässiger Primärenergieverbrauch lediglich in Abhängigkeit von der Gebäudenutzfläche A_N	197
4.1.6	Vergleich des vorhandenen Primärenergiebedarf mit dem zulässigen Primärenergieverbrauch bei Einsatz eines Brennwertkessels	199
4.1.7	Beispiel: Wärmeenergiebilanz eines Plattenbaus während der Heizperiode – vor und nach der energetischen Sanierung	201
4.2	Thermisches Verhalten von Gebäuden bei freier Klimatisierung außerhalb der Heizperiode Sommerlicher Wärmeschutz	218
4.2.1	Wärmestrombilanz während einer sommerlichen Schönwetterperiode	219
4.2.2	Erwärmung der Raumluft in Abhängigkeit der gebäuderelevanten und nutzungsbedingten Parameter	223
4.2.2.1	Diskussion des Aufheizvorganges	
4.2.2.2	Diskussion der Raumlufttemperatur nach einer fünftägigen Hitzeperiode im Sommer	229
4.2.3	Bewertungskriterien für den sommerlichen Wärmeschutz	235
4.2.3.1	Begrenzung der mittleren Raumlufttemperatur	235
4.2.3.2	Begrenzung der zulässigen sommerlichen Strahlungsbelastung	235
4.2.3.3	Nachweis des erforderlichen Verschattungsgrades	241
4.2.4	Beispiel: Berechnung der Raumlufttemperatur für den thermisch kritischen Raum der abgebildeten Wohnung	250
4.2.5	Tagesgang der Temperatur der Raumumschließungsfläche, der Raumlufttemperatur und der Empfindungstemperatur bei freier Klimatisierung	265
4.2.5.1	Modellierung des Tagesganges der Wärmeströme	265
4.2.5.2	Tagesgang der Empfindungstemperatur für ausgewählte Testräume	270
4.2.5.3	Beispiel: Berechnung des Zeitverlaufes der Empfindungstemperatur für den thermisch kritischen Raum der abgebildeten Wohnung	284
4.3	Allgemeiner Tages- und Jahresgang der Raumtemperaturen	305
4.3.1	Oberflächen-, Raumluft- und Empfindungstemperatur bei allgemeinen Belastungen	305
4.3.2	Sommerkondensation an inneren Bauteiloberflächen sehr schwerer ungeheizter Gebäude	314

FEUCHTE	319
5 Hygrisches Verhalten von Bauteilen und Räumen	319
5.1 Grundlagen der Feuchtespeicherung und des Feuchttransportes	320
5.1.1 Einführung	320
5.1.2 Oberflächenspannung und Kapillarität	320
5.1.3 Feuchtespeicherung	323
5.1.3.1 Häufigkeit der Porenradienverteilung	323
5.1.3.2 Feuchteretentionsfunktion und Sorptionsisotherme	325
5.1.4 Kapillarwassertransport	329
5.1.4.1 Kapillarwasserleitfähigkeit oder Konduktivität	329
5.1.4.2 Feuchtegehaltsleitfähigkeit oder Diffusivität	334
5.1.4.3 Isotherme Feuchteleitungsgleichung und kapillare Wasseraufnahme	338
5.1.5 Wasserdampfspeicherung und Wasserdampftransport	343
5.1.6 Verfeinerung des Feuchttransportmodells durch parallel und seriell liegende Porencluster	346
5.2 Kondensatbildung im Inneren von Bauteilen	348
5.2.1 Tauwasserbildung im Inneren von Bauteilen nach GLASER	348
5.2.1.1 Stationärer Wasserdampfdurchgang	348
5.2.1.2 Berechnung der Tauwassermenge	350
5.2.1.3 Sommerlicher Trocknungsvorgang	353
5.2.1.4 Klimatische Randbedingungen und Nachweiskriterien für den Feuchteschutz	356
5.2.1.5 Diffusionsschema und Beispiele zur Dampfdiffusion mit innerer Tauwasserbildung	358
5.2.2 Einfluss des Kapillarwassertransportes auf die innere Tauwasserbildung	368
5.2.2.1 Gekoppelter Wasserdampf-Kapillarwassertransport in einer mehrschichtigen Umfassungskonstruktion	368
5.2.2.2 Berechnung der Feuchtestromdichten und des Feuchtegleichgewichts	369
5.2.2.3 Berechnung der überhygroskopischen Feuchtwerte, der Breiten der Kondensationszonen und der Tauwassermengen im stationären Zustand	373
5.2.2.4 Einstellvorgang beim Anlegen eines winterlichen Sprungklimas	374
5.2.2.5 Trocknungsvorgang im Sommer	376
5.2.2.6 Beispiel: Sechsschichtige Außenwandkonstruktion	378
5.2.2.7 Programm COND 2002	386
5.3 Gekoppelter Wärme- und Feuchttransport in Baustoffen und Bauteilen	392
5.3.1 Bilanzgleichungen	392
5.3.1.1 Energiebilanzgleichung	392
5.3.1.2 Feuchtebilanzgleichung	394
5.3.2 Konstruktionsbeispiele	395
5.3.2.1 Thermische Sanierung eines Gründerzeithauses in Dresden mit einer kapillaraktiven Innendämmung	395
5.3.2.2 Thermische Sanierung eines Umgebendehauses in Ostsachsen	402
5.3.2.3 Begrünte Holzflachdachkonstruktionen	409

5.4	Raumluftfeuchteschwankung bei instationärer Feuchtelast unter Berücksichtigung der Feuchteabsorption der Raumumschließungsfläche	414
5.4.1	Modellierung der Feuchteströme im Raum bei periodischer Belastung unter Berücksichtigung der Speicherfähigkeit der Raumumschließungsfläche	414
5.4.2	Zeitlicher Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit im Raum bei periodischer Belastung	418
5.4.2.1	Jahresgang der Raumluftfeuchte	418
5.4.2.2	Tagesgang der Raumluftfeuchte	423
5.4.3	Beurteilungskriterien für die Feuchteabsorption der Raumumschließungsflächen	429
5.4.4	Allgemeiner Tages- und Jahresgang der Raumluftfeuchte	435
 SCHALL		 441
6	Raum- und bauakustische Grundlagen	441
6.1	Schallausbreitung im freien Raum	442
6.1.1	Eindimensionale Schallwellengleichung	442
6.1.2	Größen des Schallfeldes	446
6.1.2.1	Frequenzen, Oktav- und Terzbänder	446
6.1.2.2	Schallschnelle oder Schwingeschwindigkeit der Teilchen	447
6.1.2.3	Schalldruck	448
6.1.2.4	Schallenergie, Energiedichte, Schallleistung und Schallstärke	449
6.1.2.5	Schallpegel	450
6.1.3.	Schallpegel im Außenraum	454
6.1.3.1	Charakterisierung von Schallquellen	454
6.1.3.2	Punktschallquellen	455
6.1.3.3	Linien-schallquellen	458
6.1.3.4	Flächenquelle	460
6.1.3.5	Pegelminderungen durch Schallschutzwände	462
6.1.3.6	Verkehrslärmpegel	466

6.2	Schallausbreitung im Innenraum – Raumakustik	468
6.2.1	Diffuses und direktes Schallfeld	468
6.2.1.1	Diffuse Schallstärke und äquivalente Schallabsorptionsfläche	468
6.2.1.2	Gesamtschallstärke und Gesamtschallpegel im Innenraum	470
6.2.2	Schallabsorption	473
6.2.2.1	Poröse Absorber	473
6.2.2.2	Plattenschwinger	479
6.2.2.3	Helmholtz-Resonator	486
6.2.3	Hörsamkeit von Räumen	491
6.2.3.1	Nachhall	491
6.2.3.2	Anordnung von Absorbern und Reflektoren	494
6.3	Bauakustik	497
6.3.1	Luftschalldämmung von Bauteilen	497
6.3.1.1	Luftschalldämmung einschaliger Bauteile - Bergersches Gesetz	497
6.3.1.2	Reduktion des Schalldämmmaßes durch Biegeschwingungen des Bauteiles	499
6.3.1.3	Luftschalldämmung zweischaliger Bauteile	505
6.3.1.4	Schalldämmung Zusammengesetzter Bauteile mit unterschiedlicher Teildämmung	514
6.3.1.5	Flankenübertragung und Bauschalldämmmaß einschaliger Wände	515
6.3.1.6	Flankenübertragung und Bauschalldämmmaß zweischaliger Wände	521
6.3.1.7	Bewertetes Bauschalldämmmaß	525
6.3.1.8	Schallpegeldifferenz, Schallpegel im Empfängerraum	528
6.3.1.9	Nachweisbedingungen für den Luftschallschutz	530
6.3.2	Trittschalldämmung von Decken	531
6.3.2.1	Trittschallpegel einschaliger Decken	532
6.3.2.2	Trittschallpegel zweischalige Decken	532
6.3.2.3	Normtrittschallpegel und bewerteter Normtrittschallpegel	537
	Formelzeichen, Einheiten und Indizes	541
	Literatur zur Bauphysik	549
	CD Bauphysik Aktiv in Mathcad	