

# Inhaltsverzeichnis

## I Wärmeschutz

<b>1 Baulicher Wärmeschutz</b> .....	3
1.1 Bedeutung des baulichen Wärmeschutzes für das energieeffiziente Bauen .....	4
1.2 Wärmeschutztechnische Maßnahmen im Gebäudebestand .....	5
1.3 Planungskriterien/Planungsansätze für die energetische Gestaltung der Gebäudehülle .....	6
<b>2 Wärmetransport</b> .....	7
2.1 Grundbegriffe .....	7
2.1.1 Temperatur .....	7
2.1.2 Wärme und spezifische Wärmekapazität .....	7
2.2 Mechanismen des Wärmetransports .....	8
2.2.1 Wärmeleitung .....	8
2.2.2 Konvektion .....	14
2.2.3 Strahlung .....	21
2.3 Wärmetechnische Kenngrößen für Bauteile .....	26
2.3.1 Wärmeübergangswiderstand .....	26
2.3.2 Wärmedurchlasswiderstand .....	27
2.3.3 Wärmedurchgangswiderstand .....	28
2.3.4 Wärmedurchgangskoeffizient .....	29
2.4 Stationärer Temperaturverlauf in einem mehrschichtigen Bauteil .....	31
2.4.1 Berechnung .....	31
2.4.2 Grafisches Verfahren .....	32
<b>3 Wärmebrücken</b> .....	34
3.1 Begriffsbestimmung .....	35
3.2 Raumseitige Oberflächentemperaturen .....	36
3.3 Wärmeeverluste .....	39
3.3.1 Negative $\psi$ -Werte .....	41
3.3.2 Bilanz der Transmissionswärmeverluste .....	42
3.4 Beispiele .....	43
3.4.1 Innenwandanschluss – geneigtes Dach .....	43
3.4.2 Dachanschluss – Ortsgang .....	44
3.4.3 Sockelanschluss .....	45
3.4.4 Balkonplatte .....	46
3.4.5 Fenster .....	47
3.4.6 Befestigungselemente .....	49
<b>4 Lüftung</b> .....	51
4.1 Infiltration .....	52
4.2 Fensterlüftung .....	54
4.2.1 Einseitige Fensterlüftung .....	55

4.2.2 Querlüftung .....	57
4.3 Mechanische Lüftung .....	58
4.3.1 Abluftanlagen .....	58
4.3.2 Zu-/Abluftanlagen .....	59
<b>5 Wärme- und Energiebilanzen .....</b>	<b>61</b>
5.1 Bauteilbilanzen .....	61
5.1.1 Strahlungsbilanz für Fensterglas .....	61
5.1.2 Strahlungsbilanz für opake Bauteile .....	63
5.1.3 Äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient .....	64
5.1.4 Wärmetransport in Hohlräumen .....	65
5.2 Raumbilanzen .....	69
5.3 Zonen-/Gebäudebilanzen .....	71
5.3.1 Endenergiebedarf .....	71
5.3.2 Primärenergiebedarf .....	72
5.3.3 Berechnung des Heizwärmebedarfs .....	73
5.3.4 Wärmespeicherfähigkeit .....	78
5.3.5 Anlagenaufwandszahl .....	79
5.3.6 Energetische Bewertung von Anlagensystemen gemäß DIN V 18599 .....	83
5.3.7 Einflussgrößen auf den Primärenergiebedarf von Wohngebäuden .....	84
5.4 Gebäudebilanzen für Nichtwohngebäude .....	86
5.4.1 Energiebedarf des Gebäudes .....	88
5.4.2 Nutzenergiebilanz einer Gebäudezone .....	89
5.4.3 Nutzenergiebilanz der Luftaufbereitung .....	89
5.4.4 Beleuchtung .....	90
5.4.5 Heizung und Warmwasserbereitung .....	92
5.4.6 Raumlufttechnik- und Klimakältesysteme .....	92
5.4.7 Nutzungsrandbedingungen .....	92
<b>6 Instationäres Wärmeverhalten von Bauteilen und Gebäuden .....</b>	<b>93</b>
6.1 Instationäres Wärmeverhalten von Bauteilen .....	93
6.1.1 Wärmespeicherung .....	93
6.2 Instationäres Heizen und Überheizungseffekte .....	102
6.3 Sommerliches Wärmeverhalten .....	106
6.3.1 Einschwingvorgang .....	106
6.3.2 Auswirkung von Einflussgrößen auf die Raumtemperatur im Sommer .....	109
<b>7 Bewertung von Maßnahmen zur Heizenergieeinsparung .....</b>	<b>117</b>
7.1 Bauliche Maßnahmen .....	117
7.2 Anlagentechnische Maßnahmen .....	118
7.3 Heizenergiebedarf und Heizenergieeinsparung .....	118
7.4 Brennstoffeinsparung $\Delta B$ .....	119
7.5 Energiekosteneinsparung $\Delta K$ .....	119
7.6 Wirtschaftlichkeit .....	120
7.7 Beispiele .....	121

## Inhaltsverzeichnis

<b>8 Wärmeschutztechnische Anforderungen</b> .....	123
<b>8.1 Wärmeschutztechnische Vorschriften – DIN 4108</b> .....	123
<b>8.1.1 Wärmedurchlasswiderstand nichttransparenter und transparenter Bauteile</b> .....	123
<b>8.1.2 Maßnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung</b> .....	125
<b>8.2 Mindestanforderung an den sommerlichen Wärmeschutz</b> .....	126
<b>8.2.1 Allgemeines</b> .....	126
<b>8.2.2 Nachweisführung</b> .....	126
<b>8.2.3 Verfahren Sonneneintragskennwerte</b> .....	129
<b>8.3 Energieeinsparverordnung 2009 und Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz</b> .....	136
<b>8.3.1 Einführung</b> .....	136
<b>8.3.2 Das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz</b> .....	137
<b>8.3.3 Wohngebäude – Neubau</b> .....	138
<b>8.3.4 Anforderungen im Gebäudebestand</b> .....	142
<b>8.3.5 Heizungstechnische Anlagen, Warmwasseranlagen und Wärmeverteilung, Anrechnung von Strom aus erneuerbaren Energien</b> .....	148
<b>8.3.6 Energieausweise</b> .....	148
<b>8.3.7 Nichtwohngebäude – Neubau</b> .....	150
<b>8.3.8 Gebäudestandards</b> .....	153

## II Feuchteschutz

<b>1 Ziele und Strategien des Feuchteschutzes</b> .....	157
<b>1.1 Ziele</b> .....	157
<b>1.2 Strategien</b> .....	158
<b>2 Feuchtespeicherung</b> .....	161
<b>2.1 Feuchtespeicherung in Luft</b> .....	161
<b>2.1.1 Wasserdampfgehalt der Luft</b> .....	161
<b>2.1.2 Abkühlung und Erwärmung feuchter Luft</b> .....	166
<b>2.1.3 Die Raumluftfeuchte als Gleichgewichtszustand</b> .....	168
<b>2.2 Feuchtespeicherung in Baustoffen</b> .....	172
<b>2.2.1 Charakteristische Werte der Baustoff-Feuchte</b> .....	172
<b>2.2.2 Hygroskopische Wassergehalte</b> .....	177
<b>2.2.3 Überhygroskopische Wassergehalte</b> .....	182
<b>2.2.4 Feuchtetechnische Eigenschaften einiger Baustoffklassen</b> .....	185
<b>2.2.5 Mögliche Folgen hoher Wassergehalte in Baustoffen</b> .....	189
<b>2.3 Tauwasser- und Schimmelpilzbildung an Bauteiloberflächen</b> .....	190
<b>2.3.1 Die raumseitige Oberflächentemperatur <math>\theta_{si}</math> und der Temperaturfaktor <math>f_{Rs_i}</math></b> .....	190
<b>2.3.2 Tauwasserschutz für Bauteiloberflächen</b> .....	193
<b>3 Feuchtetransport</b> .....	196
<b>3.1 Diffusion der Wassermoleküle</b> .....	196
<b>3.1.1 Varianten der Diffusion</b> .....	196
<b>3.1.2 Transportgesetz der Wasserdampfdiffusion</b> .....	198
<b>3.1.3 Diffusionswiderstandszahl <math>\mu</math> und wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftsichtdicke <math>s_d</math></b> .....	200

3.2	Wassertransport in ungesättigten Poren .....	204
3.2.1	Grenzflächenspannung $\sigma$ , Randwinkel $\theta$ und Kapillardruck $P_K$ .....	204
3.2.2	Der Flüssigkeitsleitkoeffizient $\kappa$ .....	208
3.2.3	Der Wasseraufnahmekoeffizient $W_w$ .....	211
3.3	Feuchtetransport durch strömende Luft .....	215
3.3.1	Schlagregenbelastung von Fassaden .....	215
3.3.2	Maßnahmen gegen Schlagregen .....	219
3.3.3	Luftströmungen in Kanälen und Luftschichten .....	223
3.3.4	Tauwasserschutz für Luftschichten und Luftkanäle .....	227
3.3.5	Fugenspaltströmungen und Raumdurchlüftung .....	228
3.4	Strömung von Wasser in gesättigten Poren und in Rissen .....	230
3.5	Elektrokinese .....	234
3.6	Abführen der Baufeuchte .....	236
4	<b>Feuchteübergang</b> .....	240
4.1	Stoffübergangskoeffizienten $\beta_p$ und $\beta_v$ .....	240
4.2	Stoffübergang im konkreten Fall .....	241
4.3	Schätzung der Wasserverdunstung von Wasseroberflächen .....	245
5	<b>Stationärer Feuchtetransport in Bauteilen</b> .....	246
5.1	Formeln für $s_d$ -Werte zusammengesetzter Schichten .....	246
5.2	Das Glaser-Verfahren .....	249
5.2.1	Beschreibung des Verfahrens .....	249
5.2.2	Wahl der Randbedingungen .....	254
5.2.3	Beispiele typischer Glaserdiagramme .....	256
5.2.4	Unbedenkliche Bauteile .....	258
5.2.5	Berechnungsbeispiele zum Nachweis der Tauwasserbildung im Bauteilinneren .....	260
5.3	Maßnahmen gegen Tauwasserausfall im Bauteilinneren .....	266
5.4	Feuchtetransport bei einseitiger Wasserbelastung .....	268
5.4.1	Der zugehörige Flüssigwassertransport .....	268
5.4.2	Flüssigwassertransport und Diffusion in Serienschaltung .....	270
6	<b>Instationärer Feuchtetransport in Bauteilen</b> .....	273
6.1	Instationäre Feuchtebewegungen .....	273
6.2	Wasserdampfspeicherung in Baustoffoberflächen .....	273
6.3	Kapillares Saugen bei begrenztem Wasserangebot .....	276
6.4	Austrocknungs- und Befeuchtungsvorgänge .....	278
7	<b>Hygrische Beanspruchung von Bauteilen</b> .....	281
7.1	Quellen und Schwinden der Baustoffe .....	281
7.2	Verformungen und Risse in Mauerwerk zwischen Betondecken .....	285
7.3	Verformungen und Risse in Estrichen und Betonbodenplatten .....	287
7.4	Verformungen und Risse in Holzbauteilen .....	290

### III Klima

<b>Einführung, Definitionen und bauklimatische Relevanz .....</b>	<b>295</b>
<b>1 Komponenten des Außenklimas .....</b>	<b>298</b>
1.1 Außenlufttemperatur .....	300
1.1.1 Jahresgang der Außenlufttemperatur .....	300
1.1.2 Simulation des tatsächlichen Temperaturganges .....	301
1.1.3 Tagesgang der Außenlufttemperatur .....	306
1.1.4 Summenhäufigkeit der Außenlufttemperatur .....	307
1.2 Kurzwellige und langwellige Wärmestrahlungsbelastung .....	309
1.2.1 Kurzwellige Strahlungswärmestromdichte auf eine Horizontalfläche ..	310
1.2.2 Strahlungswärmestromdichte auf beliebig orientierte und geneigte Flächen .....	314
1.2.3 Langwellige Abstrahlung .....	325
1.3 Wasserdampfdruck und relative Luftfeuchtigkeit .....	330
1.3.1 Wasserdampfsättigungsdruck .....	330
1.3.2 Relative Luftfeuchtigkeit .....	331
1.3.3 Tatsächlicher Wasserdampfdruck .....	332
1.4 Niederschlag und Wind .....	334
1.4.1 Regenstromdichte .....	334
1.4.2 Windgeschwindigkeit und Windrichtung .....	337
1.5 Gebäudeumströmung und Schlagregenbelastung .....	340
1.6 Testreferenzjahr .....	351
<b>2 Charakterisierung des Raumklimas .....</b>	<b>354</b>
2.1 Raumtemperaturen .....	354
2.1.1 Energieumsatz des Menschen .....	354
2.1.2 Raumlufttemperatur, Umschließungsflächen- und Empfindungs- temperatur .....	356
2.2 Raumluftfeuchte .....	358
2.2.1 Relative Luftfeuchtigkeit .....	358
2.2.2 Enthalpie und Wasserdampfgehalt – h-x-Diagramm .....	363
2.2.3 Taupunkttemperatur .....	365
2.3 Raumklimaklassen .....	367
2.4 Einfluss der Raumluftparameter auf die Behaglichkeit .....	370
<b>3 Raumklima bei quasifreier Klimatisierung .....</b>	<b>373</b>
3.1 Vorbemerkung .....	373
3.2 Modellierung der Energiebilanzen in einem ausgewählten Raum zur Ermittlung der Lufttemperatur im Jahresverlauf .....	374
3.2.1 Wärmestrombilanz für die äußere Oberfläche der opaken Bauteile ..	375
3.2.2 Wärmestrombilanz für den Raum .....	376
3.2.3 Wärmestrombilanz für die innere Raumumschließungsfläche .....	377
3.3 Modellierung der Feuchtebilanz – Tages- und Jahresgang der Raumluftfeuchte	381
3.4 Beispielrechnung für einen wärme- und feuchteträgen Archivraum .....	384
3.4.1 Raum und Bauteilparameter, Speicherwirksame Massen und spezifische Transmissionswärmeströme .....	385

3.4.2 Außenklimatische Belastung des Raumes .....	387
3.4.3 Berechnung der Raumtemperaturen .....	393
3.4.4 Berechnung der relativen Luftfeuchtigkeit im Raum .....	395
3.5 Nutzerfreundliche Umsetzung des Modells Programm CLIMT (CLimate-Indoor-Moisture-Temperature) .....	397
3.5.1 Programmbeschreibung CLIMT .....	397
3.5.2 Ermittlung des Raumklimas in einem Testhaus .....	402
<b>4 Klimagerechtes Bauen .....</b>	<b>406</b>
4.1 Klimazonen der Erde .....	406
4.2 Autochthone Bauweisen und Architektur .....	408
4.3 Kalt .....	409
4.4 Gemäßigt .....	412
4.5 Arid .....	415
4.6 Tropisch .....	418

## IV Schall

<b>1 Einführung in die Akustik .....</b>	<b>423</b>
1.1 Physikalische Grundlagen .....	423
1.1.1 Wellen .....	423
1.1.2 Schallfeldgrößen .....	426
1.2 Hören .....	432
1.2.1 Frequenzbewertungsverfahren .....	433
1.2.2 Psychoakustik .....	434
1.2.3 Lärm .....	434
1.3 Schallfelder .....	436
1.3.1 Schallfelder im Freien .....	436
1.3.2 Schallfelder in Räumen .....	437
<b>2 Raumakustik .....</b>	<b>440</b>
2.1 Nachhallzeit .....	440
2.1.1 Berechnung der Nachhallzeit .....	440
2.1.2 Nachhallzeitanforderungen .....	441
2.2 Schallabsorber .....	443
2.2.1 Poröse Absorber .....	444
2.2.2 Plattenresonatoren .....	448
2.2.3 Helmholzresonatoren .....	450
2.2.4 Mikroperforierte Absorber .....	451
2.2.5 Schallabsorptions-Tabellen .....	453
2.3 Schallreflektoren .....	458
2.3.1 Reflektoren für geometrische Reflexionen .....	458
2.3.2 Reflektoren für diffuse Reflexionen .....	458
2.3.3 Schallschirme in Räumen .....	460
2.4 Schallausbreitung in Räumen .....	462
2.4.1 Raumimpulsantwort .....	462
2.4.2 Raumakustische Parameter .....	463
2.5 Raumformen .....	464

## Inhaltsverzeichnis

2.5.1	Günstige Raumformen . . . . .	464
2.5.2	Gekrümmte Flächen . . . . .	465
2.6	Raumakustische Planung . . . . .	466
2.6.1	Räume mit hohen Schallpegeln . . . . .	466
2.6.2	Räume für Sprache . . . . .	467
2.6.3	Räume für Musik . . . . .	468
2.6.4	Kirchen . . . . .	468
2.6.5	Planungswerkzeuge . . . . .	468
2.6.6	Unsicherheiten bei der raumakustischen Planung . . . . .	469
<b>3</b>	<b>Bauakustik</b> . . . . .	<b>471</b>
3.1	Schallübertragung durch Baukonstruktionen . . . . .	471
3.1.1	Einschalige Bauteile . . . . .	471
3.1.2	Zweischalige Bauteile . . . . .	475
3.1.3	Zusammengesetzte Bauteile . . . . .	477
3.2	Luftschallübertragung . . . . .	477
3.2.1	Luftschallübertragung zwischen Räumen . . . . .	477
3.2.2	Luftschallübertragung von Außenlärm . . . . .	490
3.2.3	Schalldämmung von Türen . . . . .	493
3.2.4	Schalldämmung von Fenstern . . . . .	494
3.3	Trittschallübertragung . . . . .	498
3.3.1	Trittschallübertragung von Massivdecken . . . . .	499
3.3.2	Trittschallübertragung von Holzbalkendecken . . . . .	504
3.3.3	Trittschallübertragung von Treppen. . . . .	506
3.3.4	Gehschall im eigenen Raum . . . . .	507
3.4	Geräusche aus haustechnischen Anlagen . . . . .	507
3.5	Nachweis des baulichen Schallschutzes . . . . .	508
3.5.1	Bauordnungsrechtlich zu erbringender Schallschutz . . . . .	508
3.5.2	Zivilrechtlich geschildeter Schallschutz . . . . .	508
3.6	Bauakustische Planung . . . . .	515
3.6.1	Allgemeine Konstruktionshinweise für die bauakustische Planung . . . . .	515
3.6.2	Wohngebäude . . . . .	516
3.6.3	Verwaltungsgebäude . . . . .	516
3.6.4	Gebäude mit hohen bauakustischen Anforderungen . . . . .	517
3.6.5	Unsicherheiten bei der bauakustischen Planung . . . . .	517
<b>4</b>	<b>Schall aus Anlagen der Gebäudetechnik</b> . . . . .	<b>518</b>
4.1	Maschinenlagerung . . . . .	518
4.2	Schall aus raumluftechnischen Anlagen . . . . .	522
<b>5</b>	<b>Schallimmissionsschutz</b> . . . . .	<b>528</b>
5.1	Berechnung der Schallausbreitung im Freien . . . . .	528
5.2	Lärmschutzwände . . . . .	538
5.3	Rechtliche Rahmenbedingungen des Immissionsschutzes . . . . .	539
5.4	Regelwerke zum Schallimmissionsschutz . . . . .	540
5.4.1	Gewerbelärm nach TA Lärm . . . . .	540
5.4.2	Schallschutz im Städtebau . . . . .	543
5.4.3	Weitere Regelwerke des Schallimmissionsschutzes . . . . .	547
5.4.4	Maßgeblicher Außenlärmpegel nach DIN 4109 . . . . .	551

**V Licht**

<b>1 Einführung</b>	555
<b>2 Grundlagen</b>	556
2.1 Elektromagnetische Strahlung	556
2.1.1 Strahlungsintensität – Strahlungsflussdichte	557
2.2 Sonnenspektrum – Temperaturstrahler	557
2.2.1 Minderung der Solarstrahlung – Airmass-Faktor	558
2.2.2 Wiensches Verschiebungsgesetz – Farbtemperatur	559
2.3 Grundgrößen der Lichttechnik	560
2.3.1 Photometrisches Strahlungsäquivalent $K_m$ – $V(\lambda)$ -Kurve	560
2.3.2 Lichtstrom	563
2.3.3 Lichtmenge	563
2.3.4 Lichtstärke	565
2.3.5 Leuchtdichte	566
2.3.6 Spezifische Lichtabstrahlung	568
2.3.7 Beleuchtungsstärke	568
2.3.8 Belichtung	570
2.3.9 Lichtausbeute – Leistungsausbeute	570
2.3.10 Transmission – Reflexion – Absorption	571
2.4 Photometrisches Entfernungsgesetz	571
2.5 Formfaktoren Photometrisches Grundgesetz	572
2.5.1 Reziprozitätsbeziehungen	574
2.5.2 Berechnungsbeispiele	575
2.6 Berechnung der Lichtverteilung im Raum durch Interreflexion	577
2.7 Nicht-analytische Ermittlung von Formfaktoren	579
2.7.1 Graphische Methoden	579
2.7.2 Computergestützte Methode	582
2.8 Computergraphik und lichttechnische Berechnungsverfahren	583
2.9 Wahrnehmung von Licht	585
2.9.1 Helligkeitswahrnehmung Adaptation	585
2.9.2 Weber-Fechnersches Gesetz	586
2.9.3 Blendung	587
2.9.4 Farbmetrik – Farbwiedergabe	588
<b>3 Tageslicht</b>	591
3.1 Qualitative Abschätzungen zum Lichteinfall – Projektionsverfahren	592
3.1.1 Fenster niedrig/hoch angeordnet	593
3.1.2 Vergleich von Seitenlicht und Oberlicht	593
3.1.3 Lichtempfang horizontal / vertikal in Fensternähe und in Raumtiefe	594
3.1.4 Licht von oben in Raummitte und am Rand – horizontal/vertikal	594
3.2 LeuchtdichteVerteilung des Himmels	595
3.3 Tageslichtquotient	597
3.3.1 Berechnung des Direktlichtanteils	600
3.3.2 Berechnung des Innenreflexionsanteils	601
3.3.3 Minderungsfaktoren	602
3.4 Richtwerte von Tageslichtquotienten	603
3.5 Verglasungen	604

## Inhaltsverzeichnis

3.5.1	Glaskennwerte	607
3.5.2	Lichttransmissionsgrad für nicht-senkrechten Lichteinfall	608
3.5.3	Glasaufbau	609
3.5.4	Verglasungsarten	609
3.6	Besonnung	610
3.6.1	Astronomische Gegebenheiten	611
3.6.2	Sonnenstandsdiagramme/Zeitumrechnung	613
3.6.3	Besonnungsuntersuchungen	614
3.6.4	Blend- und Sonnenschutzmaßnahmen	618
4	<b>Kunstlicht</b>	624
4.1	Einführung	624
4.2	Lichterzeugung	624
4.2.1	Temperaturstrahler	626
4.2.2	Niederdruckentladungslampen	628
4.2.3	Hochdruckentladungslampen	631
4.2.4	Lichtemittierende Dioden – LED	634
4.3	Lichtlenkung – Leuchten	636
4.3.1	Reflektoren	637
4.3.2	Linsen	639
4.3.3	Lichtstärkeverteilungskurven LVK	641
4.3.4	Verteilung des Lichtstroms in Raumbereiche	643
4.3.5	Leuchtenbetriebswirkungsgrad	643
4.3.6	Leuchtentypen	643
4.4	Beleuchtungskriterien	645
4.4.1	Energieeffizienzklassen	646
4.5	Berechnungen	646
4.5.1	Mittlere Beleuchtungsstärke nach dem Wirkungsgradverfahren	647
4.5.2	Lokale Beleuchtungsstärken anhand von Lichtstärken / LVK	648
5	<b>Lichttechnische Messungen</b>	650
5.1	Was gemessen wird	650
5.2	Messungen mit der Ulbrichtschen Kugel	650
5.2.1	Messung des Lichtstroms von Lichtquellen	651
5.2.2	Messung des Reflexionsgrades von Proben	651
6	<b>Lichtregelung</b>	652
6.1	Vorteile und Prinzip	652
6.2	Beispiel-Datenaufzeichnung	653
<b>VI Brand</b>		
1	<b>Einführung</b>	657
2	<b>Ordnungen und Normen</b>	659
2.1	Landesbauordnungen, Verordnungen für bauliche Anlagen besonderer Art und Nutzung	659
2.2	Richtlinien	660

<b>2.3 Normen</b>	660
2.3.1 DIN 4102 „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen“	660
2.3.2 DIN 18 230 „Baulicher Brandschutz im Industriebau“; rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer	663
<b>2.4 Europäische Brandschutznormung</b>	664
2.4.1 Klassifizierung von Baustoffen	664
2.4.2 Klassifizierung von Bauteilen	666
2.4.3 Eurocodes	669
<b>3 Grundlagen des Brandes, Verlauf</b>	671
3.1 Pyrolyse und Verbrennung	671
3.2 Brandverlauf und Einflüsse	673
3.3 Normbrand	675
3.4 Äquivalente Branddauer	676
3.5 Bemessungsbrand	677
3.5.1 Standardisierte Bemessungsbrände	678
3.5.2 Ausbreitung	680
3.5.3 Löschung	681
<b>4 Mechanische und thermische Hochtemperatur-eigenschaften der Baustoffe</b>	682
<b>4.1 Stahl</b>	682
4.1.1 Festigkeit und Verformung	682
4.1.2 Elastizität	684
4.1.3 Thermische Dehnung	685
4.1.4 Wärmeleitfähigkeit	685
4.1.5 Spezifische Wärmekapazität	685
4.1.6 Dichte	686
4.1.7 Temperaturleitfähigkeit	686
4.1.8 Temperaturverteilung	686
<b>4.2 Beton</b>	689
4.2.1 Festigkeit	689
4.2.2 Elastizität	690
4.2.3 Gesamtverformung	690
4.2.4 Kritische Temperatur	692
4.2.5 Zwängung	692
4.2.6 Thermische Dehnung	693
4.2.7 Wärmeleitfähigkeit	693
4.2.8 Spezifische Wärmekapazität	693
4.2.9 Dichte	694
4.2.10 Temperaturleitfähigkeit	694
4.2.11 Temperaturverteilung	694
4.2.12 Temperaturverteilung in Stahl-Verbundquerschnitten	697
<b>4.3 Sonderbetone</b>	697
<b>4.4 Mauerwerk</b>	698
<b>4.5 Holz</b>	698
4.5.1 Entzündung, Abbrand	698
4.5.2 Festigkeit	700
4.5.3 Elastizität	700

## Inhaltsverzeichnis

4.5.4 Thermische Dehnung . . . . .	700
4.5.5 Wärmeleitfähigkeit . . . . .	701
4.5.6 Spezifische Wärmekapazität . . . . .	701
4.5.7 Temperaturleitfähigkeit . . . . .	701
4.5.8 Temperaturverteilung . . . . .	701
4.6 Gips . . . . .	702
4.6.1 Produkte . . . . .	702
4.6.2 Physiko-chemische Vorgänge bei Einwirkung erhöhter Temperatur . . . . .	703
4.6.3 Mechanische Eigenschaften . . . . .	703
4.6.4 Thermische Eigenschaften . . . . .	703
4.7 Nichteisenmetalle . . . . .	704
4.8 Kunststoffe . . . . .	704
4.9 Dämmstoffe . . . . .	707
4.9.1 Spezialputze . . . . .	707
4.9.2 Dämmsschichtbildner . . . . .	707
4.9.3 Dämmplatten . . . . .	708
<b>5 Brandverhalten von Bauteilen . . . . .</b>	<b>709</b>
<b>6 Ergänzende Maßnahmen . . . . .</b>	<b>718</b>
6.1 Früherkennungs- und -meldeanlagen . . . . .	718
6.2 Frühbekämpfungsmaßnahmen . . . . .	718
6.3 Rettungswege . . . . .	719
6.4 Rauch- und Wärmeabzugsanlagen . . . . .	719
6.5 Leitungen, Schächte, Kanäle . . . . .	720
6.6 Wandöffnungen; Türen und Tore . . . . .	721
6.7 Brandabschnitte . . . . .	721
6.8 Definierter Objektschutz . . . . .	723
<b>7 Brandnebenwirkungen . . . . .</b>	<b>725</b>
7.1 Temperaturen . . . . .	725
7.2 Toxische Gase . . . . .	725
7.3 Rauch . . . . .	726
7.4 Korrosive Gase . . . . .	726
7.5 Modellgrößen zur Beschreibung der Personensicherheit . . . . .	726
7.5.1 Optische Dichte und Erkennungsweite . . . . .	726
7.5.2 Anhaltswerte zur Beurteilung der Personensicherheit . . . . .	728
7.5.3 FED-Konzept . . . . .	729
<b>8 Mathematische Brandmodelle . . . . .</b>	<b>732</b>
8.1 Handrechenformeln . . . . .	732
8.1.1 Plume ohne Ausbildung einer Heißgasschicht . . . . .	735
8.1.2 Rauchgasströmung an der Decke (Ceiling-Jet) . . . . .	738
8.1.3 Plume mit Ausbildung einer Heißgasschicht . . . . .	740
8.2 Wärme- und Massenbilanzmodelle . . . . .	743
8.2.1 Mehrzonenmodelle . . . . .	743
8.2.2 Mehrraum-Mehrzonenmodelle . . . . .	747
8.3 Feldmodelle für die Brandsimulation . . . . .	748
8.3.1 Erhaltungsgleichungen . . . . .	748

8.3.2 Weitere Annahmen und Vereinfachungen .....	751
8.3.3 Turbulenzmodellierung .....	753
8.3.4 Quellterme und Randbedingungen .....	754
8.3.5 Durchführung von CFD-Berechnungen .....	757
8.3.6 Beispiele für Berechnungen .....	758
8.4 Evaluierung von Modellen .....	761
<b>Anhang .....</b>	<b>763</b>
Symbolverzeichnis .....	765
Literaturverzeichnis .....	784
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>815</b>