

**Peter Häupl • Martin Homann • Christian Kölzow
Olaf Riese • Anton Maas • Gerrit Höfker
Christian Nocke • Wolfgang Willems (Hrsg.)**

Lehrbuch der Bauphysik

**Schall – Wärme – Feuchte – Licht –
Brand – Klima**

7., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage

 **Springer Vieweg**

Inhaltsverzeichnis

I	Wärmeschutz	
1	Baulicher Wärmeschutz	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
2	Wärmetransport	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
3	Wärmebrücken	34
3.1	Begriffsbestimmung	35
3.2	Raumseitige Oberflächentemperaturen	36
3.3	Wärmeverluste	39
3.3.1	Negative F-Werte	41
3.3.2	Bilanz der Transmissionswärmeverluste	42
3.4	Beispiele	43
3.4.1	Innenwandanschluss – geneigtes Dach	43
3.4.2	Dachanschluss – Ortgang	44
3.4.3	Sockelanschluss	45
3.4.4	Balkonplatte	46
3.4.5	Fenster	47
3.4.6	Befestigungselemente	49
4	Lüftung	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
5	Wärme-und Energiebilanzen	61
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	Raumlufittechnik- und Klimakältesysteme	92
5.4.7	Nutzungsrandbedingungen	92
6	Instationäres Wärmeverhalten von Bauteilen und Gebäuden	93
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
7	Bewertung von Maßnahmen zur Heizenergieeinsparung	117
7.1	Bauliche Maßnahmen	117
7.2	Anlagentechnische Maßnahmen	118
7.3	Heizenergiebedarf und Heizenergieeinsparung	118
7.4	Brennstoffeinsparung <i>AB</i>	119
7.5	Energiekosteneinsparung <i>AK</i>	119
7.6	Wirtschaftlichkeit	120
7.7	Beispiele	121

8	Wärmeschutztechnische Anforderungen	123
8.1	Wärmeschutztechnische Vorschriften – DIN 4108	123
8.1.1	Wärmedurchlasswiderstand nichttransparenter und transparenter Bauteile	123
8.1.2	Maßnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung	125
8.2	Mindestanforderung an den sommerlichen Wärmeschutz	126
8.2.1	Allgemeines	126
8.2.2	Nachweisführung	126
8.2.3	Verfahren Sonneneintragskennwerte	129
8.3	Energieeinsparverordnung 2009 und Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz	136
8.3.1	Einführung	136
8.3.2	Das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz	137
8.3.3	Wohngebäude – Neubau	138
8.3.4	Anforderungen im Gebäudebestand	142
8.3.5	Heizungstechnische Anlagen, Warmwasseranlagen und Wärmeverteilung, Anrechnung von Strom aus erneuerbaren Energien	148
8.3.6	Energieausweise	148
8.3.7	Nichtwohngebäude-Neubau	150
8.3.8	Gebäudestandards	153
II	Feuchteschutz	
1	Ziele und Strategien des Feuchteschutzes	157
1.1	Ziele	157
1.2	Strategien	158
2	Feuchtespeicherung	161
2.1	Feuchtespeicherung in Luft	161
2.1.1	Wasserdampfgehalt der Luft	161
2.1.2	Abkühlung und Erwärmung feuchter Luft	166
2.1.3	Die Raumluftfeuchte als Gleichgewichtszustand	168
2.2	Feuchtespeicherung in Baustoffen	172
2.2.1	Charakteristische Werte der Baustoff-Feuchte	172
2.2.2	Hygroskopische Wassergehalte	177
2.2.3	Überhygroskopische Wassergehalte	182
2.2.4	Feuchtetechnische Eigenschaften einiger Baustoffklassen	185
2.2.5	Mögliche Folgen hoher Wassergehalte in Baustoffen	189
2.3	Tauwasser- und Schimmelpilzbildung an Bauteiloberflächen	190
2.3.1	Die raumseitige Oberflächentemperatur θ_{si} und der Temperaturfaktor f^{\wedge}	190
2.3.2	Tauwasserschutz für Bauteiloberflächen	193
3	Feuchtetransport	196
3.1	Diffusion der Wassermoleküle	196
3.1.1	Varianten der Diffusion	196
3.1.2	Transportgesetz der Wasserdampfdiffusion	198
3.1.3	Diffusionswiderstandszahl n und wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d	200

3.2	Wassertransport in ungesättigten Poren	204
3.2.1	Grenzflächenspannung α , Randwinkel θ und Kapillardruck P_K	204
3.2.2	Der Flüssigkeitsleitkoeffizient K	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	Abfahren der Baufeuchte	236
4	Feuchteübergang	240
4.1	Stoffübergangskoeffizienten β_p und β_v	240
4.2	Stoffübergang im konkreten Fall	241
4.3	Schätzung der Wasserverdunstung von Wasseroberflächen	245
5	Stationärer Feuchtetransport in Bauteilen	246
5.1	Formeln für $s_{<j}$ -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	Instationärer Feuchtetransport in Bauteilen	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	Hygrische Beanspruchung von Bauteilen	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

Einführung, Definitionen und bauklimatische Relevanz	295
1 Komponenten des Außenklimas	298
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 Wasserdampf-sättigungsdruck	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
2 Charakterisierung des Raumklimas	354
2.1 Raumtemperaturen	354
2.1.1 Energieumsatz des Menschen	354
2.1.2 Raumlufttemperatur, Umschließungsflächen- und Empfindungstemperatur	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
3 Raumklima bei quasifreier Klimatisierung	373
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
4	Klimagerechtes Bauen	406
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	SchaU	
1	Einführung in die Akustik	423
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
2	Raumakustik	440
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	Helmholtzresonatoren	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

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
3	Bauakustik	471
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 geschuldeter 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
4	Schall aus Anlagen der Gebäudetechnik	518
4.1	Maschinenlagerung	518
4.2	Schall aus raumlufttechnischen Anlagen	522
5	Schallimmissionsschutz	528
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

1 Einführung	555
2 Grundlagen	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 $K_m - V(X)$ -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 Farbmeterik-Farbwiedergabe	588
3 Tageslicht	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

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	Kunstlicht	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	Lichttechnische Messungen	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	Lichtregelung	652
6.1	Vorteile und Prinzip	652
6.2	Beispiel-Datenaufzeichnung	653
VI	Brand	
1	Einführung	657
2	Ordnungen und Normen	659
2.1	Landesbauordnungen, Verordnungen für bauliche Anlagen besonderer Art und Nutzung	659
2.2	Richtlinien	660

2.3	Normen	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
2.4	Europäische Brandschutznormung	664
2.4.1	Klassifizierung von Baustoffen	664
2.4.2	Klassifizierung von Bauteilen	666
2.4.3	Eurocodes	669
3	Grundlagen des Brandes, Verlauf	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
4	Mechanische und thermische Hochtemperatureigenschaften der Baustoffe	682
4.1	Stahl	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
4.2	Beton	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
4.3	Sonderbetone	697
4.4	Mauerwerk	698
4.5	Holz	698
4.5.1	Entzündung, Abbrand	698
4.5.2	Festigkeit	700
4.5.3	Elastizität	700

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	Dämmschichtbildner	707
4.9.3	Dämmplatten	708
5	Brandverhalten von Bauteilen	709
6	Ergänzende Maßnahmen	718
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
7	Brandnebenwirkungen	725
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
8	Mathematische Brandmodelle	732
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
Anhang		763
	Symbolverzeichnis	765
	Literaturverzeichnis	784
Sachwortverzeichnis		815