

Siegfried Nowotny · Helmut E. Feustel

Lüftungs- und klimatechnische Gebäudeausrüstung

Grundlagen
und Berechnungsmodelle

unter Mitarbeit von

J. Christoffer, J. Gasser, C.-D. Kruse, P. Loose, U. Marmai,
E. Mayer, P. V. Nielsen, C. Svensson, W. Thommes, H. Werner

BAUVERLAG GMBH · WIESBADEN UND BERLIN

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	15
1. Einleitung	17
2. Grundlagen	20
2.1 Bauphysik	20
Übersicht über die verwendeten Formelzeichen	20
2.1.1 Aufgabe der Bauphysik	21
2.1.2 Wärmetransport	22
2.1.2.1 Wärmeleitung	22
2.1.2.2 Wärmeströmung und Wärmekonvektion	23
2.1.2.3 Wärmestrahlung	25
2.1.3 Stationäre Wärmeübertragung	27
2.1.3.1 Kenngrößen des baulichen Wärmeschutzes	28
2.1.3.2 Temperaturen im Bauteil	35
2.1.4 Wärmebrücken	36
2.1.5 Instationäre Wärmeübertragung	39
2.1.5.1 Kenngrößen und Beschreibung des Temperaturfeldes	39
2.1.5.2 Aufheiz- und Abkühlverhalten von Gebäuden	41
2.1.6 Wärmeschutzanforderungen	41
2.1.6.1 Mindestwärmeschutz	41
2.1.6.2 Energiesparender Wärmeschutz	47
2.1.7 Heizwärmebedarfsberechnung	47
2.1.7.1 Wärmeschutzverordnung 1995	47
2.1.7.2 Europäische Methode nach EN 832	51
Literatur	57
2.2 Meteorologie	58
Übersicht über die verwendeten Formelzeichen	58
2.2.1 Die Bedeutung der Klimadaten für die Raumluftechnik	58
2.2.2 Meßnetze des Deutschen Wetterdienstes	59
2.2.3 Meteorologische Elemente	60
2.2.3.1 Lufttemperatur	60
2.2.3.2 Luftfeuchte	73
2.2.3.3 Kombinationen von Lufttemperatur, -feuchte und Enthalpie	76
2.2.3.4 Sonnenstrahlung	79
2.2.3.5 Wind	84
2.2.3.6 Das Testreferenzjahr	90
Danksagung	91
Literatur	92
2.3 Physiologische und physikalische Grundlagen der thermischen Behaglichkeit	94
Übersicht über die verwendeten Formelzeichen	94
Vorbemerkung	94
2.3.1 Physiologische Grundlagen	94
2.3.1.1 Grundlagen	94

Inhaltsverzeichnis

2.3.1.2	Definition der thermischen Behaglichkeit	96
2.3.1.3	Konsequenzen aus der Behaglichkeitsdefinition	98
2.3.2	Physikalische Grundlagen und Berechnungsmethoden	100
2.3.2.1	Ausführliche Wärmebilanzgleichung	100
2.3.2.2	Vereinfachte Wärmebilanzgleichung	100
2.3.2.3	Äquivalenttemperatur	103
2.3.3	Geräte zur Raumklimamessung	103
2.3.3.1	Comfy-Testgerät nach Madsen [2.3.8]	104
2.3.3.2	Raumklimameßgerät nach Mayer [2.3.9]	104
Literatur		106
3.	Luftströmung und Luftverteilung in Räumen	107
3.1	Luftströmung in Räumen mit Mischlüftung	107
Übersicht	über die verwendeten Formelzeichen	107
3.1.1	Einleitung	109
3.1.2	Luftverteilung in einem Raum mit Mischlüftung	110
3.1.3	Turbulente Freistrahlen und Wandstrahlen	110
3.1.3.1	Die Strömung in der Nähe der Zuluftöffnung	111
3.1.3.2	Geschwindigkeitsabbau in Freistrahlen und Wandstrahlen	112
3.1.3.3	Die Strömung aus verschiedenen Luftauslässen	118
3.1.3.4	Nichtisotherme Frei- und Wandstrahlen	120
3.1.3.5	Einfluß deckenmontierter Hindernisse	126
3.1.4	Abluftöffnungen und Absaughauben	129
3.1.4.1	Abluftöffnung in der Komfortlüftung	129
3.1.4.2	Absaughauben in der Industrielüftung	130
3.1.5	Dimensionierung von Luftverteilungssystemen für Mischlüftung	132
3.1.5.1	Ablöseabstand einer horizontalen Strahlströmung in einem tiefen Raum	132
3.1.5.2	Entwurf entsprechend der Wurfweite des isothermen Strahles	134
3.1.5.3	Maximalgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich	135
3.1.5.4	Eindringtiefe eines nichtisothermen Strahles und maximale thermische Last	139
3.1.6	Kontaminatverteilung und Effektivität eines Luftverteilungssystems	141
3.1.6.1	Verteilung der Verunreinigungen	141
3.1.6.2	Lüftungseffektivität	144
3.1.6.3	Luftaustauschwirkungsgrad	147
3.1.7	Bestimmung der Luftverteilung mit computergestützter Fluidodynamik	151
3.1.7.1	Methoden und Routinen, die zur Simulation der Luftströmung in Räumen entwickelt wurden	152
3.1.7.2	Berechnung der Luftverteilung	155
Literatur		160
3.2	Quelllüftung	163
Übersicht	über die verwendeten Formelzeichen	163
3.2.1	Einleitung	164
3.2.2	Freie Konvektionsströmung	166
3.2.2.1	Auftriebsströmungen an Wärmequellen	166
3.2.2.2	Strömung oberhalb von Personen und Komponenten	168
3.2.2.3	Integrierte Auftriebsströmung über mehreren Wärmequellen und der Einfluß der Wände	170
3.2.2.4	Thermische Strömung und Kaltluftabfall an vertikalen Flächen	172

3.2.3 Schichtungshöhe und Konzentrationsverteilung	172
3.2.3.1 Schichtungshöhe	173
3.2.3.2 Konzentrationsverteilung	174
3.2.3.3 Lüftungseffektivität	176
3.2.4 Temperaturverteilung	177
3.2.4.1 Vertikaler Temperaturgradient für verschiedene Arten der thermischen Last	177
3.2.4.2 Temperaturgradienten bei thermisch basierter Auslegung	181
3.2.4.3 Temperatureffektivität	182
3.2.5 Geschwindigkeitsverteilung im Aufenthaltsbereich	184
3.2.5.1 Geschwindigkeitsverteilung in der Strömung wandmontierter Diffusoren	184
3.2.5.2 Geschwindigkeitsverteilung aus einem bodenmontierten Diffusor und aus in Möbeln integrierten Diffusoren	189
3.2.5.3 Strömung zwischen Hindernissen im Aufenthaltsbereich und Strömung als Folge eines Kaltluftabfalls	191
Literatur	193
 4. Lüftung von Gebäuden	195
Übersicht über die verwendeten Formelzeichen	195
4.1 Überblick	196
4.2 Physikalische Grundlagen des Luftaustausches	197
4.2.1 Überblick	197
4.2.2 Winddrücke	198
4.2.3 Thermische Druckdifferenz	202
4.2.4 Druckeinflüsse durch raumluftechnische Anlagen	202
4.3 Widerstandscharakteristik von Bauteilen	203
4.3.1 Einführung	203
4.3.2 Physikalische Grundlagen der Fugenströmung	203
4.3.3 Strömung durch Öffnungen	205
4.4 Beurteilungsmethoden für die Durchlässigkeiten und für die Luftdurch- strömung von Gebäuden	207
4.4.1 Verfahren zur Beurteilung der Durchlässigkeit der Gebäudehülle	207
4.4.2 Einzonengebäude	209
4.4.3 Mehrzonengebäude	210
4.4.3.1 Guarded-Zone-Methode	210
4.4.3.2 Deduction-Methode	212
4.5 Verfahren zur Bestimmung des Luftaustausches	213
4.5.1 Einführung	213
4.5.2 Abklingmethode	214
4.5.3 Messung mit konstanter Konzentration	215
4.5.4 Konstanter Spurengasmassenstrom	215
4.5.5 Passive Meßmethode	216
4.6 Rechnerische Bestimmung der Luftmassenströme	216
4.6.1 Überblick	216
4.6.2 Einzonenmodelle	216
4.6.3 Mehrzonenmodelle	218
4.7 Zusammenfassung	220
Literatur	221

5. Luftbehandlung	223
Übersicht über die verwendeten Formelzeichen	223
5.1 Luftbehandlungskomponenten im Klimatisierungsprozeß	226
5.1.1 Aufgabe der Luftbehandlung	226
5.1.2 Einteilung der Luftbehandlungskomponenten	227
5.1.3 Basisgröße Luftvolumenstrom	227
5.1.3.1 Vorgaben	227
5.1.3.2 Grundgleichung für den Zuluftvolumenstrom bei idealer Mischungs Lüftung	230
5.1.3.3 Abluftvolumenstrom	232
5.2 Thermodynamische Luftbehandlungsprozesse	233
5.2.1 Wärmeübertragung	233
5.2.1.1 Übertragene Wärmeleistung	233
5.2.1.2 Luftheizer	236
5.2.1.3 Luftkühler	238
5.2.1.4 Wärmerückgewinner	238
5.2.2 Befeuchten	242
5.2.2.1 Wasser im Klimatisierungsprozeß	242
5.2.2.2 Sprühbefeuchter	243
5.2.2.2.1 Sprühdüsenbefeuchter	243
5.2.2.2.2 Sprühscheibenbefeuchter	246
5.2.2.2.3 Ultraschallzerstäuber	247
5.2.2.3 Dampfbefeuchter	247
5.2.2.4 Verdunstungsbefeuchter	249
5.2.3 Entfeuchten	250
5.2.3.1 Oberflächenkühler	250
5.2.3.2 Sorptionsbefeuchter	253
5.2.3.2.1 Adsorptionsentfeuchter	253
5.2.3.2.2 Absorptionsentfeuchter	255
5.2.4 Mischen	256
5.3 Hygienische Luftbehandlungsprozesse	258
5.3.1 Filtern	258
5.3.1.1 Stofftrennprozesse der Klimatisierung	258
5.3.1.2 Mechanische Faserfilter	259
5.3.1.3 Adsorptionsfilter	264
5.3.1.4 Elektrofilter	265
5.3.1.5 Biofilter	266
5.3.1.6 Filterkombination im Luftreiniger	266
5.3.2 Schalldämpfen	266
5.4 Logistische Luftbehandlungsfunktionen	269
5.4.1 Fördern	269
5.4.1.1 Ventilatoren	269
5.4.1.2 Pumpen	273
5.4.2 Verteilen	275
5.4.2.1 Kanäle	275
5.4.2.2 Stellglieder	276
5.4.2.3 Luftdurchlässe	278
5.5 Kombinierte Luftbehandlungselemente	280
5.5.1 Kombinationsmethoden	280
5.5.2 Kapillargebläse	280
5.5.3 BefeuchtungsfILTER	281

5.5.4 Kühlen durch Befeuchten	281
5.6 Klimaanlage	285
5.6.1 Einordnung	285
5.6.2 Einteilung, Bauarten	286
Literatur	289
6. Heizungstechnik	290
Übersicht über die verwendeten Formelzeichen	290
6.1 Einführung: Systemkonzeption	291
6.2 Lastanalyse	292
6.2.1 Heizlasten	292
6.2.2 Trinkwarmwasser-Lasten	295
6.2.3 Wärmehöchstlast	296
6.2.4 Lastoptimierung für Kraft-Wärme-gekoppelte Anlagen (KWK-Anlagen)	297
6.3 Raumheizung	298
6.3.1 Statische Heizfläche	298
6.3.2 Fußbodenheizung	298
6.3.3 Kombination unterschiedlicher Raumheizsysteme	300
6.4 Wärmeverteilsysteme	300
6.4.1 Grundlagen der Netzhydraulik	300
6.4.2 Netzkonzeption und -dimensionierung	302
6.4.3 Teillastverhalten von Strahlennetzen	304
6.4.4 Berechnung und Teillastverhalten von Ringnetzen	304
6.5 Steuerung und Regelung von Wärmeverteilsystemen	306
6.5.1 Hydraulische Schaltungen zur Leistungsregelung	306
6.5.2 Raumtemperaturregelung	307
6.5.3 Auslegung von Regelventilen	308
6.6 Wärmeerzeugungsanlagen	309
6.6.1 Kesselanlagen	309
6.6.2 Blockheizkraftwerke	311
6.6.3 Solaranlagen	314
6.7 Steuerung von Wärmeerzeugungsanlagen	316
6.7.1 Aufteilung von Lasten auf die Wärmeerzeuger	316
6.7.2 Hydraulische Schaltungen zur Steuerung von Wärmeerzeugern	318
6.8 Ergänzungen	319
6.8.1 Sicherheitstechnik	319
6.8.2 Druckhaltung	320
6.8.3 Schornsteinberechnung	322
6.8.4 Emissionsminderung	323
Literatur	324
7. Kälteanlagen	325
Übersicht über die verwendeten Formelzeichen	325
7.1 Kurze historische Betrachtung	326
7.2 Berechnung der Kühllast zur Auslegung von Kälteanlagen	327
7.2.1 Geltungsbereich und Grundsätze	327
7.2.2 Grundlegende Definition	327
7.2.3 Kurzverfahren der Kühllastberechnung	328
7.2.4 Kühllast mit wählbaren Belastungsverläufen	330
7.3 Grundlagen der Kälteerzeugung	332
7.3.1 Thermodynamische Beurteilung von Kreisprozessen	332

Inhaltsverzeichnis

7.3.1.1	Klassifizierung von Kreisprozessen	332
7.3.1.2	Exergie und Anergie	333
7.3.2	Berechnung von Kältemaschinen	334
7.3.2.1	Kaltdampfmaschinen	334
7.3.2.1.1	Kompressions-Kältemaschinen	334
7.3.2.1.2	Absorptions-Kältemaschinen	342
7.3.2.2	Kaltluftmaschinen	347
7.3.2.3	Adiabate Verdunstungskühlung	350
7.3.2.3.1	Dessicant Cooling	351
7.3.3	Kältespeicherung	353
7.3.3.1	Grundlagen der Speicherung	353
7.3.3.2	Latentspeicher	353
7.3.3.2.1	Externe Speichersysteme	353
7.3.3.2.2	Interne Speichersysteme	353
7.3.4	Behandlung der Kondensationswärme des Kältemaschinen-Prozesses	355
7.3.4.1	Abführung der Kondensationswärme	355
7.3.4.2	Nutzung der Kondensationswärme im Wärmepumpenbetrieb	356
7.3.4.2.1	Exergetische Betrachtung der Wärmepumpe	356
7.3.4.2.2	Thermodynamik der Heizungs-wärmepumpe	357
7.3.4.2.3	Optimierung einer bivalenten Wärmepumpenheizung	358
7.4	Bereitstellung der erforderlichen Kälteleistung	361
7.4.1	Direkte Kühlung	361
7.4.2	Indirekte Kühlung	362
7.4.3	Kühldecken	362
7.5	Ausführung und Betrieb von Kälteanlagen	363
7.5.1	Wahl der Ausrüstung	364
7.5.2	Teillastverhalten	367
7.5.3	Abnahme- und Leistungsbedingungen	369
7.6	Kältemittel	372
7.6.1	Zerstörung der Ozonschicht und Treibhauseffekt	372
7.6.1.1	Zerstörung der Ozonschicht	372
7.6.1.1.1	Mögliche Folgen der Zerstörung der Ozonschicht	373
7.6.1.1.2	Ozonzerstörungspotential (Ozon-Depletion-Potential)	373
7.6.1.2	Der Treibhauseffekt und mögliche Folgen für das Klima	374
7.6.1.3	Das Montreal-Protokoll	375
7.6.2	Anforderungen an neue Kältemittel	376
7.6.2.1	Chemische Anforderungen	376
7.6.2.2	Thermodynamische Anforderungen	378
7.6.2.3	Technische Anforderungen	379
7.6.2.4	Ökonomische Anforderungen	380
7.6.3	Alternative Kältemittel	380
7.7	Übersicht über verfügbare Berechnungs- und Planungssoftware	381
	Literatur	381
8.	Rohrleitungs- und Kanalnetze	383
	Übersicht über die verwendeten Formelzeichen	383
8.1	Strömung in Rohrleitungen und Kanälen	384
8.1.1	Grundlagen	384
8.1.2	Viskosität von Fluiden	384

8.1.3	Gesamtdruck, dynamischer Druck, statischer Druck	385
8.1.4	Hydraulischer Durchmesser	386
8.1.5	Berechnung einzelner Druckverluste	386
8.1.5.1	Rohrreibungszahl λ bei laminarer Strömung	386
8.1.5.2	Rohrreibung bei turbulenter Strömung	386
8.1.5.3	Einzelwiderstände	388
8.1.6	Bestimmung des Gesamtdruckverlustes	390
8.1.7	Empfohlene Strömungsgeschwindigkeiten in Rohrleitungen von Kälteanlagen	393
8.1.8	Druckverlust in Wärmeübertragern und Apparaten	393
8.2	Kanalnetzberechnung	394
8.2.1	Begriffe	394
8.2.2	Berechnung von Kanalnetzen	395
8.2.2.1	Grundlegende Aufgabenstellungen	395
8.2.2.2	Berechnungsverfahren bei vorgegebenem Volumenstrom	395
8.2.2.3	Berechnungsverfahren bei vorgegebener Gesamtdruckdifferenz	396
8.2.2.4	Verfahren des statischen Druckrückgewinns	396
8.2.2.5	Änderung der Volumenstromverhältnisse	396
8.2.2.6	Über- bzw. Unterdruck in Räumen	397
8.2.3	Gesamtdruckverlust und Leistungsbedarf des Ventilators	398
8.2.4	Nutzung von Computerprogrammen zur Berechnung von Kanalnetzen	398
8.2.4.1	Schnittstellen	398
8.2.4.2	Kanalschema	398
8.2.4.3	Berechnung von Kanalnetzen	400
8.2.4.4	Berechnung des Druckverlustes und der Einzelwiderstände	400
8.2.4.5	Variantenplanung und Variantenkonstruktion	400
8.2.4.6	Schnittstellen zu Fertigungssystemen für Kanal- und Formstücke	400
8.3	Akustische Berechnung von Kanalnetzen	404
8.3.1	Allgemeines	404
8.3.2	Ermittlung der Schalleistung von Anlagensystemen	404
8.3.3	Schallschutz	406
8.4	Übersicht über verfügbare Berechnungs- und Planungssoftware	410
	Literatur	412
9.	Regelung von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagensystemen	413
9.1	Notwendigkeit der Regelung von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen	413
	Auswahl von Leistungszielen	414
	Wahl von Regelgrößen	415
	Wahl von Meßgrößen	415
	Wahl von Stellgrößen	415
	Wahl der Konfiguration der Regelung	415
9.2	Wechselwirkungen zwischen Gestaltung und Regelung	415
9.3	Aufgliederung der Regelungsaufgaben	417
9.4	Das steuernde Regelungssystem	419
9.4.1	Konzept der Feedback-Regelung	420
9.4.2	Analyse einiger gängiger Feedback-Regelkreise	422
	Beispiel 9.1: Aktuator mit konstanter Geschwindigkeit in einem Feuchteregelkreis	425
	Volumenstromregelung	425
	Druckregelung	426

Inhaltsverzeichnis

Temperaturregelung	427
Gemischregelung	427
Beispiel 9.2: Analyse des Temperaturregelkreises eines Luftauslasses	427
9.4.3 Vorausführende Regelung (Feedforward)	429
Beispiel 9.3: Vorausführende Regelung eines Umluftventilators in einem Lüftungssystem mit variablem Volumenstrom	432
9.4.4 Kaskadenregelung	432
Beispiel 9.4: Kaskadenregelung eines Endgerätes mit variablem Luftvolumenstrom	433
9.4.5 Selektive Regelung	434
Übersteuerungsregelung	434
Beispiel 9.5: Übersteuerungsregelung zum Schutz eines Kanalsystems einer Lüftungsanlage mit variablem Volumenstrom	435
Auctioneering-Regelung	435
Beispiel 9.6: Statische Kanaldruckregelung einer Lüftungsanlage mit variablem Volumenstrom	435
Split-Range-Regelung	435
Beispiel 9.7: Split-Range-Regelung eines Einzonensystems mit konstantem Volumenstrom	435
9.4.6 Adaptive Regelung	436
Programmierte Adaptation	436
Beispiel 9.8: Programmierte adaptive Regelung eines Wärmeübertragers	437
Regelung mit Selbstabgleich	437
9.4.7 Inferentialregelung	438
Beispiel 9.9: Inferentialregelung der Außenluft	438
9.4.8 Fuzzy-Regelung	439
9.5 Das überwachende Regelsystem	441
Beispiel 9.10: Heuristik der Optimierungsregel von HLK-Systemen	441
9.5.1 Statische Optimierungsregeln	443
Direkte Suchmethoden	443
Indirekte Suchmethoden	444
Beispiel 9.11: Stationäre Optimierungsregelung einer Wärmepumpeneinheit	445
9.5.2 Struktur der Optimierungsregelung mit Feedback	448
Beispiel 9.12: Feedback-Optimierungsregelung eines Kaltwassersystems	448
9.5.3 Software für die Prozeßregelung	450
Literatur	452
 10. Energiemanagement	454
Übersicht über die verwendeten Formelzeichen	454
10.1 Einleitung	454
10.1.1 Begriffsdefinition und Problemstellung	454
10.1.2 Aufgabengebiet eines Energiemanagements	455
10.1.2.1 Allgemeine Aufgaben	455
10.1.2.2 Spezielle Aufgaben in der Gebäudetechnik	456
10.2 Energieverbrauchsrechnung	459
10.2.1 Erfassung der Energieströme in der Gebäudetechnik	460
10.2.1.1 Erfassung der Primärenergieströme	461
10.2.1.2 Erfassung der End- und Nutzenergieströme	461
10.2.1.3 Erfassung der jeweiligen Maximallasten	462

10.2.2 Darstellung der Energieströme	463
10.2.2.1 Energieflußbilder, Sankey-Diagramme	463
10.2.2.2 Lastgangslinien	465
10.2.2.3 Teillasten	465
10.2.2.4 t,q-Diagramme	467
10.3 Energiebedarfs- und Energieangebotsanalyse	469
10.3.1 Freiheitsgrade und Kennzahlen der Energieerzeugung	469
10.3.2 Gegenüberstellung des Energiebedarfs und des Energieangebotes	472
10.4 Optimierung des Gesamtenergieverbrauches	475
10.5 Beispiel: Klimatisierung fernwärmebeheizter Verwaltungsgebäude	478
10.5.1 Definition einer möglichen Aufgabenstellung	478
10.5.2 Ermittlung der Bedarfssituation für Klimatisierungskälte im Versor- gungsgebiet der Stadtwerke X	479
10.5.2.1 Vorbereitende Maßnahmen zur Datenerfassung und Kälte- bedarfsanalyse	479
10.5.2.2 Durchführung der Datenerfassung und Kältebedarfsanalyse	480
10.5.2.3 Auswertung der erfaßten Daten	482
10.5.3 Technische Gegenüberstellung der wichtigsten Verfahren zur Klimatisierungskälteerzeugung	488
10.5.3.1 Klimatisierungskälteerzeugung mit Kompressionskälte- maschinen	488
10.5.3.2 Klimatisierungskälteerzeugung mit Absorptionskälte- maschinen	489
10.5.4 Ökonomische und ökologische Betrachtung der Klimatisierungs- kälteerzeugung mittels Absorptions- anstelle von Kompressionskälte- maschinen	492
10.5.4.1 Auswirkungen und Parameteranforderungen an ein Fern- wärmenetz, das Absorptionskältemaschinen speist	492
10.5.4.1.1 Mindestvorlauftemperatur	492
10.5.4.1.2 Massenströme	495
10.5.4.2 Möglichkeiten zur Integration von Absorptionskältemaschinen in Fernwärmeversorgungsnetze, die aus Kraft-Wärme- Kopplungsanlagen gespeist werden	495
10.5.4.3 Auswirkungen auf das Lastverhalten und den Jahresnutzungs- grad der Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die ein Fern- wärmeversorgungsnetz speisen	498
10.5.5 Abschließende Bemerkungen und Ausblick	501
10.5.6 Empfohlene Software	502
Literatur	504
Autoren dieses Bandes	505
Stichwortverzeichnis	506