

Vorwort**i****Inhaltsverzeichnis****iii**

1	Grundlagen der Wärmeversorgung	1
1.1	Politische und wirtschaftliche Randbedingungen, Stand der Technik	1
1.1.1	Kosten des Wärmeverbrauchs	1
1.1.2	Individuelle Heizkostenerfassung im Wohnungsbereich	2
1.2	Grundstrukturen der Wärmeversorgung	4
1.3	Übersicht über Wärmeerfassungsgeräte	9
1.3.1	Wärmezähler	9
1.3.2	Kältezähler	10
1.3.3	Wärme- und Kältezähler für andere Wärmeträger als Wasser	10
1.3.4	Heizkostenverteiler	11
2	Grundlagen der Wärmemengenmessung	13
2.1	Zur Theorie der exakten Wärmeverbrauchserfassung	13
2.2	Betrachtungen zum realen Wärmekoeffizienten	16
2.3	Dampfförmige Wärmeträger	21
2.3.1	Der Phasenübergang Flüssigkeit-Dampf	21
2.3.2	Die Enthalpieänderung beim Phasenübergang	22
2.4	Direkte Messung der Wärmeabgabe von Heizflächen	23
2.4.1	Zur Leistung von Heizkörpern	23
2.4.1.1	Allgemeines	23
2.4.1.2	Konvektion	24
2.4.1.3	Strahlungsanteil	26
2.4.1.4	Zum Temperaturprofil der Heizkörperoberfläche	29
2.4.1.5	Wärmeleistung eines Modellheizkörpers	32
2.4.1.6	Einfluss des Heizmittelstromes auf die Wärmeleistung	34
2.4.1.7	Weitere Einflüsse auf die Wärmeleistung	34
2.4.1.7.1	Außenwand	34
2.4.1.7.2	Anschlussart der Heizkörper	36
2.4.1.7.3	Wirkung von Heizkörperverkleidungen	39
2.4.1.7.4	Einfluss erzwungener Konvektion	39
2.4.1.7.5	Gibt es horizontale Temperaturgradienten?	40
2.4.1.8	Potenzgesetz	42
3	Messprinzip Wärmezähler	47
3.1	Zum Messprinzip	47
3.2	Physikalische Eigenschaften der Wärmeträger	50
3.2.1	Physikalisch relevante Größen	51
3.2.1.1	Allgemeines	51
3.2.1.2	Wasser als Wärmeträger	51
3.2.1.2.1	Allgemeines	51
3.2.1.2.2	Dichte des Wassers	53
3.2.1.3	Das Gemisch Wasser-Glykol	60
3.3	Berechnung des Wärmekoeffizienten	65
3.3.1	Wärmekoeffizienten für Wasser nach EN 1434	65
3.3.2	Wärmekoeffizienten bei Verwendung von Frostschutzmitteln	67



4	Messtechnische Begriffe	71
4.1	Wärmezähler als Messgerät	71
4.2	Fehlergrenzen für den Durchflusssensor	75
4.3	Fehlergrenzen für das Temperaturfühlerpaar	76
4.4	Fehlergrenzen für das Rechenwerk	77
4.5	Fehlergrenzen für Vollständige Wärmezähler	78
4.6	Verkehrsfehlergrenzen	79
4.7	Kritische Betrachtungen zur Festlegung der Fehlergrenzen eines Wärmezählers	79
4.8	Weitere wichtige messtechnische Begriffe	80
4.9	Rückführung	82
5	Durchflusssensoren	89
5.1	Einige Grundlagen aus der Strömungslehre	89
5.1.1	Fluide	89
5.1.2	Kontinuitätsgleichung	90
5.1.3	Die Bernoulli-Gleichung	91
5.1.4	Einfluss der Reibung	93
5.1.5	Geschwindigkeit und Durchfluss	97
5.1.6	Druckverlust	98
5.2	Qualifizierung von Durchflusssensoren	98
5.2.1	Bemerkungen zur Fehlerdefinition	98
5.2.2	Sensoreigenschaften von Durchflusssensoren	99
5.2.2.1	Empfindlichkeit	100
5.2.2.2	Ansprechgeschwindigkeit	100
5.2.2.3	Genauigkeit	102
5.2.2.4	Stabilität	102
5.2.3	Sekundäre Kenngrößen	102
5.2.3.1	Temperatur	103
5.2.3.2	Viskosität	103
5.3	Verfahren der Durchflusserfassung in der Wärmemengenmessung	104
5.3.1	Allgemeine Bemerkungen	104
5.3.2	Übersicht über mögliche Durchflusssensoren für die Wärmemengenmessung	105
5.4	Mittelbare Volumenzähler	106
5.4.1	Flügelradzähler	106
5.4.2	Woltmanzähler	109
5.4.3	Konstruktive Details zu den Flügelrad- und Woltmanzählern	113
5.4.4	Schwingstrahlzähler	114
5.4.5	Ultraschall-Durchflussmessung	116
5.4.5.1	Prinzip	116
5.4.5.2	Laufzeitmessung	117
5.4.5.3	Lambda-Locked-Loop-Verfahren	118
5.4.5.4	Ausführungsformen von Ultraschallzählern	119
5.4.5.5	Ultraschallmessung nach dem Doppler-Effekt	121
5.4.5.6	Clamp-on-Verfahren	122
5.4.5.7	Bewertung der Ultraschall-Messverfahren	122
5.4.6	Magnetisch-induktive Durchflussmessung	123
5.4.6.1	Übersicht	123
5.4.6.2	Zur Theorie der magnetisch-induktiven Zähler	124
5.4.6.3	Messsignalverarbeitung	126
5.4.6.4	Ausführungsformen magnetisch-induktiver Durchflusszähler	126
5.4.6.5	Vor- und Nachteile magnetisch-induktiver Durchflusszähler	127
5.4.7	Staudruckverfahren	128
5.4.8	Wirkdruckverfahren	129
5.4.8.1	Allgemeine Betrachtungen	129
5.4.8.2	Ausführungsformen von Wirkdruckgeräten	130
5.4.8.3	Zum Druckverlust	132
5.4.8.4	Fehler bei der Durchflussmessung mit Wirkdruckgeräten	133

5.4.8.5	Bewertung der Wirkdruckverfahren	133
5.5	Massendurchflussmessung	134
5.6	Laser-Doppler-Velozimetrie (LDV)	136
5.7	Durchflusssensoren für andere Wärmeträger als Wasser	138
5.8	Zur Normung von Durchflusssensoren	140
5.9	Abschließende Bemerkungen	141

6 Temperatur- und Temperatur-Differenzmessung 143

6.1	Darstellung der Temperaturskala, metrologische Probleme	143
6.2	Grundprobleme der Temperaturmessung in Wärmenetzen	146
6.2.1	Eigenschaften der bei der Wärmemessung verwendeten Temperatursensoren	146
6.2.2	Temperatur-Differenzmessung	149
6.2.3	Die Bezugstemperatur für Messungen in Rohrleitungen	151
6.2.3.1	Turbulente Rohrströmung	152
6.2.3.2	Laminare Rohrströmung	152
6.2.3.3	Energietemperatur	152
6.2.3.4	Linear gemittelte Temperatur	152
6.2.3.5	Fehlerbetrachtungen	153
6.2.3.6	Messungen zur Temperaturverteilung in der Rohrströmung	154
6.3	Einbaufehler von Temperatursensoren	154
6.3.1	Allgemeines	154
6.3.2	Thermometer für Kleinwärmesähler	155
6.3.3	Thermometer für größere Rohrnennweiten	156
6.3.4	Bewertung	157
6.3.4.1	Längeneinfluss	158
6.3.4.2	Einfluss des Volumendurchflusses	159
6.3.4.3	Weitere Einflüsse	160
6.4	Modellvorstellungen	160
6.4.1	Bestimmungsgleichungen	161
6.4.1	Widerstand R_1	161
6.4.2	Wärmeableitwiderstände R_2 und R_4	162
6.4.3	Wärmedurchgangswiderstand R_3	162
6.4.4	Wärmedurchgangswiderstand R_5	163
6.4.5	Wärmeableitwiderstand R_6	163
6.4.6	Wärmeübergangswiderstand R_7	163
6.4.7	Kontaktwiderstand R_8 zwischen dem inneren Schutzrohr und der Rohrwand	164
6.4.8	Standardfühler	165
6.5	Einbau-Differenzfehler	169
6.6	Anlegefühler	170
6.7	Praktische Auswirkungen der verschiedenen Störquellen auf die Genauigkeit der Temperatur-Differenzmessung	173
6.8	Dynamische Temperaturmessung	177
6.9	Temperaturmessung in Frostschutzmitteln	185
6.10	Bemerkungen zum Anschluss von Temperatursensoren in Zweileiter- und Vierleitertechnik	186
6.11	Zur Problematik der Tauchhülsen	189
6.12	Einiges zur Normung	189
6.13	Abschließende Betrachtungen	191

7 Wärmesähler 193

7.1	Allgemeines	193
7.2	Ausführungsformen der Wärmesähler	194
7.2.1	Mechanische Wärmesähler	194
7.2.2	Elektronische Wärmesähler	194
7.2.2.1	Wärmesähler nach analogen Messprinzipien	194
7.2.2.2	Wärmesähler nach digitalen Messprinzipien	195

7.2.2.3	Wärmezähler mit Mikroprozessor-Rechenwerken	196
7.3	Ausführungsformen moderner Wärmezähler	197
7.4	Spezielle Probleme bei der Verwendung von Wärmezählern	200
7.4.1	Übersicht	200
7.4.2	Kontaktprobleme	200
7.4.3	Zur Tastrate	204
7.5	Europäische Norm für Wärmezähler	205
7.5.1	Teil 1: Allgemeine Anforderungen	205
7.5.2	Teil 2: Anforderungen an die Konstruktion	205
7.5.3	Teil 3: Datenaustausch und Schnittstellen	207
7.5.4	Teil 4: Prüfungen für die Bauartzulassung	207
7.5.5	Teil 5: Ersteinrichtung	210
7.5.6	Teil 6: Einbau, Inbetriebnahme, Überwachung und Wartung	212
7.6	Intelligenter Zähler – Smart Metering	213

8 Praxis der Wärmemengenmessung 215

8.1	Einbau der Wärmezähler	215
8.1.1	Messung vor dem Wärmeaustauscher	216
8.1.2	Messung nach dem Wärmeaustauscher	216
8.1.3	Anlagen mit Beimischung	216
8.1.4	Anlagen zur Versorgung mehrerer parallel angeschlossener Einzelabnehmer	217
8.2	Dimensionierung von Wärmezählern	218
8.2.1	Allgemeines	218
8.2.2	Durchflusssensoren	218
8.2.3	Temperaturfühler	219
8.2.4	Rechenwerke	220
8.2.5	Messung dampfförmiger Wärmeträger	220
8.3	Praktische Erfahrungen mit der Erfassung von Betriebszuständen in Heizanlagen	221
8.3.1	Ältere Untersuchungen	221
8.3.2	Neuere Untersuchungen	228
8.4	Hydraulische Störungen	232
8.4.1	Messergebnisse (Wien Energie, BEV)	232
8.4.1.1	Flügelradzähler	233
8.4.1.2	Woltmanzähler der Bauarten WS und WP	235
8.4.1.3	Ultraschallzähler nach dem Laufzeit-Differenzverfahren	236
8.4.1.4	Magnetisch-induktive Durchflusszähler	237
8.4.1.5	Neuere Ergebnisse	238
8.4.1.6	Bewertung der Ergebnisse	239
8.4.2	Messungen mittels LDV	240
8.5	Kennzahlen von gestörten Geschwindigkeitsprofilen	247
8.5.1	Allgemeines	247
8.5.2	Axiale Geschwindigkeitskomponente	248
8.5.3	Der Profilfaktor K_p	248
8.5.4	Der Asymmetriefaktor K_a	249
8.5.5	Der Turbulenzfaktor K_T	250
8.5.6	Tangentiale Geschwindigkeitskomponente (v_t)	251
8.5.7	Akzeptanz der Messergebnisse	252
8.6	Zur Problematik der Reihenschaltung von Durchflusssensoren bei der Kalibrierung	253
8.6.1	Flügelradzähler	253
8.6.2	Ultraschallzähler	256
8.7	Erfahrungen mit der Großwärmemessung	259
8.7.1	Allgemeine Angaben	259
8.7.2	Messprogramme	262
8.7.3	Messergebnisse im Beobachtungszeitraum von 2009 bis 2015	262
8.7.4	Messunsicherheitsschätzungen	267
8.7.4.1	LDV-System	267
8.7.4.2	Klassische Messsysteme	267

8.7.5	Das Segmentverfahren	269
8.7.6	Zusammenfassende Bemerkungen	270

9 Grundlegendes zur Kalibrierung von Wärmezählern 273

9.1	Kalibriertechniken	273
9.1.1	Allgemeines	273
9.1.2	Kalibrierung von Durchflusssensoren	274
9.1.2.1	Allgemeine Betrachtungen	274
9.1.2.2	Stehende und fliegende Kalibrierung	277
9.1.3	Kalibrierung der Temperaturfühler	278
9.1.3.1	Wärmezähler mit fix angeschlossenen Temperatursensoren	278
9.1.3.2	Einzel-Kalibrierung der Temperaturfühler	278
9.1.4	Kalibrierung des Rechenwerkes	280
9.1.5	Besonderheiten bei der Kalibrierung von Kältezählern	280
9.2	Normalmesseinrichtungen für die Kalibrierung von Wärmezählern	281
9.2.1	Normalmesseinrichtungen zur Bestimmung des Volumens bzw. der Masse	281
9.2.1.1	Wägeeinrichtungen und Wägeprozess	281
9.2.1.2	Ermittlung des Volumens durch Wägung und Temperaturmessung	283
9.2.2	Masterzähler	287
9.2.3	Normalthermometer	290
9.2.4	Kalibrier- und Normalwiderstände	291
9.3	Randbedingungen beim Bau von Wärmezähler-Kalibrier-Einrichtungen	291
9.3.1	Kalibriereinrichtungen für Durchflusssensoren	292
9.3.1.1	Prinzipielles	292
9.3.1.2	Temperaturänderung der Rohrleitung durch Abkühlung	294
9.3.1.3	Luft in Rohrleitungen	298
9.3.2	Flüssigkeitsthermostate	298
9.3.3	Kalibriereinrichtungen für das Rechenwerk	299

10 Messunsicherheit bei Wärmemengenmessungen 301

10.1	Kalibrierung von Durchflusssensoren	301
10.1.2	Messunsicherheitsquellen	301
10.1.3	Auflösung des Prüflings	303
10.1.4	Auflösung des Referenz- oder Masterzählers	304
10.1.5	Waagen	305
10.1.6	Volumenermittlung durch Wägung, Auftriebskorrektur und Temperaturmessung	307
10.1.7	Temperaturänderung des Rohrleitungssystems	307
10.1.8	Luft in Rohrleitungen	309
10.1.9	Umschaltvorrichtung	310
10.1.10	Feuchtigkeitsmessung	311
10.1.11	Masterzähler	312
10.1.12	Einfluss von Durchflussschwankungen	313
10.1.13	Start-Stopp-Einfluss	318
10.1.14	Druckabhängigkeit	318
10.1.15	Beispiele für Messunsicherheitsermittlungen	319
10.1.16	Kalibrierstände mit Messbehältern	322
10.1.17	Weitere Kalibriermethoden für Durchflusssensoren	323
10.2	Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Temperatursensoren für Wärmezähler	323
10.2.1	Allgemeine Bemerkungen	323
10.2.2	Messunsicherheitsquellen	325
10.2.3	Schätzungen der Unsicherheitsbeiträge	325
10.2.4	Unsicherheit des Messsystems	326
10.2.5	Referenzthermometer	326
10.2.6	Thermostatisierte Kalibrierbäder	326
10.2.7	Kontakt- und Zuleitungswiderstände	327

10.2.8	Unterschiedlich temperierte Zuleitungen	328
10.2.9	Ergebnis der Analyse	328
10.3	Messunsicherheitsermittlung bei der Kalibrierung von Rechenwerken	329
10.3.1	Messunsicherheitsquellen	329
10.3.1.1	Auflösung des Prüflings	330
10.3.1.2	Simulationswiderstände für Vor- und Rücklauf	330
10.3.1.3	Temperaturkoeffizienten der Simulationswiderstände	331
10.3.1.4	Kontakt- und Zuleitungswiderstände	331
10.3.1.5	Wärmekoeffizient	332
10.3.1.6	Zählunsicherheit der Volumenimpulse	331
10.3.2	Messunsicherheit bei der Rechenwerks-Kalibrierung bei separierbaren Widerstandsthermometern	332
11	Ringvergleiche	335
11.1	Allgemeines	335
11.2	Zur Organisation von Ringvergleichen	335
11.3	Begleitendes Beispiel 11.1	338
11.3.1	Beschreibung und erste Ergebnisse	338
11.3.2	Drifteinfluss der Transfornormale	341
11.4	Referenzwerte	343
11.4.1	Klassische Vorgangsweise	343
11.4.2	Der χ^2 -Test	345
11.4.3	Der En-Wert	352
11.5	Angabe der Ergebnisse von Ringvergleichen	356
11.5.1	Prinzip des Youden-Plots	356
11.5.2	Youden-Plots zum begleitenden Beispiel	358
11.5.3	Quantitative Aussagen zum Youden-Plot	362
11.6	Aussagen von Ringvergleichen	365
11.7	Schlussbemerkungen	366
12	Grundlagen der Heizkostenverteilung	367
12.1	Allgemeine Überlegungen	367
12.2	Bauphysikalische Einflüsse	369
12.2.1	Wärmeflüsse in Gebäuden	369
12.2.2	Nutzerverhalten	372
12.2.2.1	Grundsätzliche Überlegungen	372
12.2.2.2	Praktische Erfahrungen	376
12.3	Methoden der Heizkostenverteilung	377
12.3.1	Pauschalverrechnung	378
12.3.2	Verbrauchsorientierte Heizkostenverteilung	378
12.3.2.1	Heizkostenverteilung durch Bestimmung der Wärmeabgabe von Heizkörpern mit Heizkostenverteilern	378
12.3.2.2	Verbrauchserfassung mit Wärmezählern	380
12.3.2.3	Gemischte Verbrauchserfassung	381
12.4	Verhaltensbestimmte Einflussfaktoren auf den Wärmeverbrauch	381
12.5	Künftige Entwicklungen	382
13	Heizkostenverteiler	385
13.1	Übersicht und Einteilung der Messsysteme	385
13.2	Heizkostenverteiler nach dem Verdunstungsprinzip (HKVV)	386
13.3	Elektronische Heizkostenverteiler	392
13.4	Betrachtungen zur Anzeigegenauigkeit von Heizkostenverteilern	393
13.4.1	Allgemeines	393
13.4.2	Häufigkeitsverteilung der Wärmeleistungen bzw. Übertemperaturen	395
13.4.3	Jahresmessfehler von HKVV	398
13.4.4	Jahresmessfehler von HKVE	399

13.5	Bewertungsfaktoren	401
13.5.1	Der Bewertungsfaktor K_Q	402
13.5.2	Der Bewertungsfaktor K_C	403
13.5.3	Der Bewertungsfaktor K_T	404
13.5.4	Einfluss der Klimas	405
13.5.5	Zur Anwendung der Bewertungsfaktoren	407
13.5.6	Gesamtbewertungsfaktor	408
13.6	Skalenarten	408
13.7	Ensembleverhalten, Verteilfehler	409
13.8	Europannormen EN 834 und EN 835	414
13.8.1	EN 835	414
13.8.2	EN 834	422
14	Jahresmessfehler	425
14.1	Betrachtungen zum Messfehler von integrierenden Messgeräten	425
14.2	Methoden zur Ermittlung des Jahresmessfehlers (JMF)	427
14.3	Beispiele	430
14.3.1	Jahresmessfehler von Wärmezählern	430
14.3.1.1	Jahresmessfehler für die Zweirohrheizung	433
14.3.1.2	Jahresmessfehler für die Einrohrheizung	433
14.3.1.3	Jahresmessfehler für die Fußbodenheizung	435
14.3.2	Jahresmessfehler für Durchflusssensoren mit Anlaufhemmung	439
14.3.3	Einfluss von Tauchhülsen auf die Wärmemengenmessung	442
14.4	Zusammenfassung zum Kapitel 14	446
A	Anhänge	449
A1	Grundlagen aus der Wärmeübertragung	449
A1.1	Wärmeleitung	449
A1.2	Konvektion	450
A1.3	Wärmestrahlung	452
A1.4	Wärmedurchgang	454
A2	Ausgleichskurve eines Durchflusssensors	455
A3	Ermittlung der Koeffizienten eines Widerstandsthermometers	456
A4	Energieeinheiten	460
Literatur		463
Formelzeichen und Abkürzungen		473
Stichwortverzeichnis		477