

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Bedeutung der Temperaturmessung	1
1.2 Entwicklungstendenzen der Temperaturmesstechnik	4
1.3 Übersicht über technische Temperaturmessverfahren	5
1.4 Literatur	7
2 Grundlagen der Temperaturmesstechnik	9
2.1 Charakteristik der Messgröße Temperatur	10
2.1.1 Die thermodynamische Temperatur	10
2.1.2 Der 0. Hauptsatz der Thermodynamik	14
2.1.3 Die Temperatur als intensive Größe	14
2.2 Temperaturmittelwerte	15
2.2.1 Örtlicher Mittelwert als allgemeine Aufgabengröße der Temperaturmessung	15
2.2.2 Arithmetische Temperaturmittelwerte	17
2.2.3 Thermische Temperaturmittelwerte	19
2.3 Prinzipielle Einteilung der Temperatur-Messverfahren	22
2.3.1 Direkte Messung und indirekte Temperaturmessung	22
2.3.2 Primäre und sekundäre Temperaturmessverfahren	23
2.3.3 Unmittelbare Temperaturmessung	25
2.3.4 Mittelbare Temperaturmessung	27
2.4 Temperaturskalen	28
2.4.1 Thermodynamische Temperatur und praktische Temperaturskalen	28
2.4.2 Neudefinition des Kelvin	30
2.4.3 Klassische Temperaturskalen	31
2.4.4 Wasserstoffskala von 1887	32
2.4.5 Internationale Temperaturskala ITS-27	32
2.4.6 Internationale Praktische Temperaturskala IPTS-48	33
2.4.7 Internationale Praktische Temperaturskala IPTS-68	34
2.4.8 Internationale Temperaturskala ITS-90	38
2.4.9 Provisorische Tieftemperaturskala PLTS-2000	49
2.5 Literatur	52
3 Grundlagen der Temperaturmessung mit Berührungsthermometern	57
3.1 Allgemeine messtechnische Eigenschaften	58
3.1.1 Prinzip des Berührungsthermometers	58
3.1.2 Das Berührungsthermometer als Messkette	58
3.1.3 Temperaturmessfehler	61
3.2 Thermische Messfehler	67
3.2.1 Einflussfaktoren auf die thermischen Messfehler	67

3.2.2	Elektro-thermische Analogie	68
3.2.3	Statischer thermischer Messfehler	69
3.3	Messfehler durch geometrische Integration	76
3.3.1	Grundlagen	76
3.3.2	Beispiele für den Integrations-Messfehler bei räumlich ausgedehnten Sensoren	78
3.3.3	Integrationsmessfehler bei mehreren Einzelsensoren	81
3.4	Literatur	89
4	Temperaturmessung mit Berührungsthermometern an Festkörpern	91
4.1	Temperaturmessung in Festkörpern und Schüttgütern	92
4.1.1	Einführung und allgemeine Messbedingungen	92
4.1.2	Eingegebetteter Temperatursensor ohne thermische Kopplung zur Umgebung	94
4.1.3	Temperatursensor mit thermischer Kopplung zur Umgebung . .	102
4.1.4	Praktische Hinweise zur Ausführung von Messstellen	111
4.2	Temperaturmessung an Oberflächen von Festkörpern	114
4.2.1	Einführung	114
4.2.2	Einflussgrößen auf die Oberflächentemperatur	118
4.2.3	Messfehler der Oberflächentemperaturmessung	121
4.3	Temperatursensor an der Oberfläche - Tast-Temperaturfühler	122
4.3.1	Thermische Messfehler	122
4.3.2	Modell mit diskreten thermischen Widerständen	124
4.3.3	Modelle mit spezifischen thermischen Widerständen für ebene Sensoren	126
4.3.4	Zusätzliche thermische Isolation des Temperatursensors . . .	130
4.3.5	Einfluss des Kontaktwiderstandes	132
4.3.6	Senkrecht aufgesetzter zylindrischer Sensor	135
4.3.7	Darstellung der Einflussfaktoren auf den thermischen Messfehler einer Oberflächentemperaturmessung	143
4.4	Ausführungen von Oberflächen-Temperaturfühlern	145
4.4.1	Fest angebrachte Oberflächen-Temperaturfühler	145
4.4.2	Tast-Temperaturfühler	147
4.5	Korrektur des thermischen Messfehlers	155
4.5.1	Rechnerische Korrektur	155
4.5.2	Statische thermische Kompensation	157
4.5.3	Dynamische Messverfahren mit thermischer Kompensation .	159
4.6	Kalibrierung von Oberflächen-Tasttemperaturfühlern	163
4.6.1	Allgemeine Grundsätze	163
4.6.2	Kalibrierung an rückwirkungsfreien Prüfoberflächen	164
4.6.3	Kalibrierung an thermisch passiven Prüfkörpern	165
4.7	Temperatursensor in der Oberfläche	170
4.7.1	Temperatursensor ohne thermische Rückwirkung	170
4.7.2	Temperatursensor mit thermischer Kopplung zur Umgebung .	178
4.8	Temperatursensor im Körper - Extrapolationsmethode	183

4.9	Temperaturmessung an bewegten Oberflächen	186
4.9.1	Temperatursensor im angrenzenden Fluid	187
4.9.2	Mitbewegte Berührungsthermometer	190
4.10	Literatur	192
5	Temperaturmessung mit Berührungsthermometern in Flüssigkeiten und Gasen	197
5.1	Messbedingungen in Flüssigkeiten und Gasen	198
5.1.1	Messsituation und Messaufgaben	198
5.1.2	Thermische Messfehler	200
5.2	Wärmeübergangskoeffizient α	201
5.2.1	Definition und Einflussfaktoren	201
5.2.2	Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten aus Stoff- und Betriebsdaten	202
5.3	Wärmeableitungsfehler	211
5.3.1	Wärmeströme und Temperaturen einer Temperaturmessstelle	212
5.3.2	Vereinfachtes Modell: Schutzrohr-Wand	212
5.3.3	Erweitertes Modell: Schutzrohr - Wand - Halsrohr	219
5.3.4	Erweitertes Modell: Schutzrohr - Wand - Halsrohr - Messeinsatz	220
5.3.5	Numerische Berechnungen des Wärmeableitungsfehlers	222
5.3.6	Kennwerte zum Wärmeableitungsfehler von Thermometern in strömenden Medien	230
5.3.7	Maßnahmen zur Verminderung bzw. Korrektur des Wärmeableitungsfehlers	241
5.4	Strahlungsmessfehler	247
5.4.1	Ursachen, Grundlagen	247
5.4.2	Möglichkeiten zur Verkleinerung des Strahlungsmessfehlers	249
5.5	Fehler durch adiabatischen Aufstau - Recovery-Effekt	254
5.6	Schutzrohre für Temperaturfühler	256
5.6.1	Grundsätze für Auswahl und Gestaltung von Schutzrohren	256
5.6.2	Keramische Schutzrohrwerkstoffe	257
5.6.3	Metallische Schutzrohrwerkstoffe	259
5.6.4	Oberflächenveredelung	260
5.6.5	Bauformen von Metall-Schutzrohren	263
5.7	Mechanisch-thermische Belastung von Schutzrohren	268
5.7.1	Grundsätze und Bedeutung der Schutzrohrberechnung	268
5.7.2	Berechnung nach DIN 43763 / DIN 43772 bei statischer Druck- und Biegebelastung	275
5.7.3	Schwingungsbelastung	289
5.7.4	Festigkeitsberechnung nach ASME PTC 19.3 - 1974	294
5.7.5	Festigkeitsberechnung nach ASME PTC 19.3 TW-2010	301
5.7.6	Zu Unterschieden der Berechnungsmethoden	315
5.7.7	Berechnung eines Grenzgestaltrohres	315
5.8	Literatur	319

6 Dynamisches Verhalten von Berührungsthermometern in Flüssigkeiten und Gasen	323
6.1 Einführung	325
6.1.1 Einstellvorgang - Sprungantwort - Übergangsfunktion	326
6.1.2 Ständige thermische Kopplung	327
6.1.3 Ursachen und Einflussfaktoren	328
6.2 RC-Ketten-Modelle für das dynamische Verhalten	329
6.2.1 RC-Modell 1. Ordnung	329
6.2.2 RC-Modell 2. Ordnung	334
6.2.3 RC-Modell n-ter Ordnung	343
6.2.4 Berechnung des dynamischen Verhaltens eines koaxial aufgebauten Temperaturfühlers mit einem RC-Modell	349
6.3 Dynamisches Verhalten eines homogenen Zylinders	354
6.3.1 Der Übergang $n \rightarrow \infty$ bei einem RC-Modell n-ter Ordnung	354
6.3.2 Die Fouriersche Differentialgleichung der Wärmeleitung	356
6.3.3 Analytische Lösung der Fourierschen Differentialgleichung	359
6.3.4 Vereinfachte Approximationsmodelle für das dynamische Verhalten homogener, unendlich langer Zylinder	367
6.3.5 Passive dynamische α -Kalorimeter	369
6.4 Parallel-Modelle für das dynamische Verhalten	372
6.4.1 Prinzip der Parallel-Modelle	372
6.4.2 Beispiele für Temperaturfühler mit Parallel-Struktur	376
6.5 Numerische Berechnung des dynamischen Verhaltens	382
6.5.1 FEM-Berechnungen instationärer Temperaturfelder	382
6.5.2 Beispiele für FEM-Berechnungen des dynamischen Verhaltens	385
6.6 Experimentelle Bestimmung dynamischer Kennwerte	389
6.6.1 Verfahren für Temperatur-Sprungfunktionen	389
6.6.2 Verfahren für sinusoidale Temperaturänderungen	397
6.6.3 Verfahren mit pseudostochastischen Testsignalfolgen	399
6.7 Kennwertermittlung von Temperaturfühlern im eingebauten Zustand	401
6.7.1 Dynamischer Eigenerwärmungs-(LCSR-)Test von Widerstandsthermometern	401
6.7.2 Plug-in-Test	410
6.7.3 Rauschanalyse	412
6.7.4 Ermittlung dynamischer Kennwerte unter Einsatzbedingungen als Mittel der technischen Diagnostik	413
6.8 Kennwertermittlung aus Übergangsfunktion oder Sprungantwort	413
6.8.1 Approximation von Übergangsfunktionen mit Modelfunktionen des homogenen Zylinders	414
6.8.2 Approximation von Übergangsfunktionen mit Modelfunktionen 1. - 3. Ordnung	420
6.8.3 Kennwertermittlung aus der Sprungantwort	434
6.8.4 Regressionsverfahren bei gestörten Messwerten	443
6.8.5 Kennwertermittlung aus der Übergangsfunktion eines Parallel-Modells	445

6.9	Umrechnung dynamischer Kennwerte auf andere Betriebsbedingungen	446
6.9.1	Umrechnung auf der Basis eines Modells 1. Ordnung	447
6.9.2	Umrechnung auf der Basis eines Modells 2. Ordnung	448
6.9.3	Abhängigkeit dynamischer Kennwerte von der Temperatur	450
6.10	Korrektur des dynamischen Verhaltens	455
6.10.1	Messtechnische Zielstellungen	455
6.10.2	Analoge Korrekturverfahren	456
6.10.3	Korrektur des dynamischen Verhaltens mit einem Kalman-Filter	464
6.10.4	Endwert-Extrapolation bei bekannten Zeitkonstanten	466
6.10.5	Endwertextrapolation bei unbekannten Zeitkonstanten er die Bestimmung der Ableitungen	472
6.10.6	Endwertextrapolation bei unbekannten Zeitkonstanten er Differenzengleichungen	476
6.10.7	Fehlereinflusse auf die Endwertextrapolation	477
6.11	Literatur	480
7	Kalibrierung von Beruhungsthermometern	485
7.1	Einführung und Begriffe	486
7.1.1	Prüfung	486
7.1.2	Kalibrierung	486
7.1.3	Ruckfuhrbare Kalibrierung	487
7.1.4	Eichung und Klassifizierung	488
7.1.5	Akkreditierte Kalibrierlaboratorien	488
7.1.6	Kalibrier- und Eichscheine	489
7.1.7	Rekalibrierfrist von Normalthermometern	489
7.2	Grundlagen der Kalibrierung	492
7.2.1	Ziele einer Kalibrierung und Beiträge zur Kalibrierunsicherheit	492
7.2.2	Kalibrierverfahren	495
7.3	Kalibrierung an Temperaturfixpunkten	499
7.3.1	Einführung	499
7.3.2	Realisierung von Metall-Schmelz- und Erstarrungs-Fixpunkten der ITS-90 im Temperaturbereich	
	429 K 1358 K (156 °C 1085 °C)	503
7.3.3	Schmelzpunkt von Gallium	511
7.3.4	Wassertripelpunkt	512
7.3.5	Realisierung von Fixpunkten der ITS-90 im Temperaturbereich < 0 °C	515
7.3.6	Fehlereinflusse auf Fixpunkt-Temperaturen	518
7.3.7	Sekundäre Fixpunkte	523
7.3.8	Drahtschmelzmethode	532
7.3.9	Kalibrierung eines Standard-Platin-Widerstandsthermometers an Fixpunkten nach Vorgaben der ITS-90	533
7.3.10	Erreichbare Messunsicherheiten bei der Darstellung der ITS-90	546
7.4	Miniaturlfixpunktzellen und selbstkalibrierende Temperaturfühler	548
7.4.1	Entwicklungs- und Anwendungsziele	548

7.4.2	Funktionsweise und Auswertemethodik	549
7.4.3	Langzeitstabilität und Einfluss von Verunreinigungen	554
7.4.4	Thermoelemente mit Miniaturfixpunktzelle als Kalibriernormal	556
7.4.5	Selbskalibrierende Thermoelemente für den Industrieinsatz .	558
7.4.6	Curie-Temperatur ferroelektrischer Materialien als Fixpunkt .	561
7.5	Vergleichsverfahren	563
7.5.1	Prinzip des Vergleichsverfahrens	563
7.5.2	Flüssigkeitsthermostate	565
7.5.3	Fluidthermostate	567
7.5.4	Luft-Thermostate	571
7.5.5	Rohröfen	571
7.5.6	Messtechnische Überprüfung und Optimierung von Kalibrier-Thermostaten und -Öfen	573
7.5.7	Metallblock-Kalibratoren	580
7.5.8	Beispiel für die Berechnung der Messunsicherheit bei der Vergleichskalibrierung	583
7.6	Ermittlung von Kalibrier-Kennlinien	587
7.6.1	Auswahl des Kennlinientyps	588
7.6.2	Mathematische Behandlung	590
7.6.3	Kalibrierkennlinien für Platin-Widerstandsthermometer . .	596
7.6.4	Kalibrier-Kennlinien von Thermoelementen	604
7.6.5	Kalibrierung von Flüssigkeits-Glasthermometern	609
7.6.6	Einpunkt-Kalibrierung	610
7.6.7	Unsicherheit von Kalibrier-Kennlinien	613
7.7	Besondere Kalibrierverfahren	615
7.7.1	Kalibrierung von Sensoren für örtliche Temperaturdifferenzen	615
7.7.2	Dynamische Kalibrierung	618
7.7.3	Kalibrierung von Sensoren für kleine Langzeit-Temperatur- änderungen	620
7.7.4	Vergleichs-Kalibrierung von Temperaturfühlern unter Einsatzbedingungen	621
7.8	Literatur	624
8	Mechanische Berührungsthermometer	637
8.1	Übersicht und Einsatzgebiete	637
8.2	Flüssigkeits-Glasthermometer	638
8.2.1	Grundlagen	638
8.2.2	Typische Messfehler von Flüssigkeits-Glasthermometern . .	646
8.2.3	Bauformen von Flüssigkeits-Glasthermometern	649
8.2.4	Flüssigkeits-Glasthermometer mit Sonderfunktionen	652
8.3	Federthermometer	655
8.3.1	Allgemeines Wirkprinzip und Grundbauformen	655
8.3.2	Flüssigkeits-Federthermometer	656
8.3.3	Gasdruck-Federthermometer	661
8.3.4	Dampfdruck-Thermometer	664

8.4	Metall-Ausdehnungsthermometer	666
8.4.1	Stab-Ausdehnungsthermometer	666
8.4.2	Bimetall-Thermometer	669
8.5	Literatur	674
9	Widerstandsthermometer	677
9.1	Elektrische Leitfähigkeit von Festkörpern	679
9.2	Metall-Widerstandsthermometer	680
9.2.1	Industrielle Platin-Widerstandsthermometer	682
9.2.2	Weitere Metall-Widerstandsthermometer	721
9.2.3	Bauformen technischer Widerstandsthermometer	729
9.2.4	Aufbau und Eigenschaften von Platin-Präzisionsthermometern	735
9.3	Halbleiter-Widerstandsthermometer	738
9.3.1	Einführung	738
9.3.2	NTC-Thermistoren	740
9.3.3	PTC-Thermistoren	755
9.3.4	Silizium-Planar-Temperatursensoren	758
9.3.5	Weitere Halbleiter-Temperatursensoren	760
9.4	Eigenerwärmung bei Widerstandsthermometern	763
9.4.1	Grundlagen	763
9.4.2	Einflussfaktoren auf den Eigenerwärmungskoeffizienten	766
9.4.3	Experimentelle Bestimmung des Eigenerwärmungskoeffizienten	770
9.4.4	Verminderung bzw. Korrektur des Eigenerwärmungsfehlers	772
9.5	Kennlinien-Korrektur durch passive Beschaltung	773
9.5.1	Beschaltung mit einem Vorwiderstand	774
9.5.2	Beschaltung mit einem Parallel-Widerstand	775
9.5.3	Beschaltung mit Reihen- und Parallelwiderstand	778
9.6	Messschaltungen für Widerstandsthermometer	780
9.6.1	Einfache Messschaltungen	780
9.6.2	Brückenschaltungen	783
9.6.3	Wechselstrom-Messbrücken	792
9.6.4	Widerstands-Frequenz-Wandler	797
9.7	Zusätzliche Fehlerquellen	799
9.7.1	Thermospannungen im Messkreis	799
9.7.2	Elektromagnetische Einstreuungen	800
9.7.3	Isolationswiderstand	801
9.7.4	Einfluss der Zuleitungs- und Innenleitungs-Widerstände	805
9.8	Messumformer für Widerstandsthermometer	813
9.8.1	Transmitter mit analoger Ausgangsgröße	813
9.8.2	Transmitter mit digitalem Ausgangssignal, Feldbus	820
9.9	Literatur	822
10	Thermoelemente	831
10.1	Grundlagen	832
10.1.1	Thermoelektrische Effekte	832

10.1.2	Seebeck-Koeffizienten	835
10.1.3	Thermospannung $U(T)$ und Empfindlichkeit $S(T)$ von Metallen gegen Platin-67	839
10.1.4	Die traditionellen Regeln für thermoelektrische Stromkreise	860
10.1.5	Analyse thermoelektrischer Stromkreise	865
10.1.6	Thermospannung und Temperaturgradient	870
10.1.7	Inhomogenität, Kennlinien-Abweichungen und Drift von Thermoelementen	873
10.2	Thermoelement-Messtechnik	891
10.2.1	Grundschaltungen von Thermoelementen	891
10.2.2	Korrektur des Einflusses der Vergleichsstellen-Temperatur	896
10.2.3	Bauformen von Thermoelementen	903
10.2.4	Thermoelement-Steckverbindungen	916
10.2.5	Thermo- und Ausgleichsleitungen	918
10.3	International genormte Thermoelemente	931
10.3.1	Übersicht	931
10.3.2	Thermoelemente Typ T - Kupfer/Kupfer-Nickel	938
10.3.3	Thermoelemente Typ J - Eisen/Kupfer-Nickel	944
10.3.4	Thermoelemente Typ E - Nickel-Chrom/Kupfer-Nickel	952
10.3.5	Thermoelemente Typ K - Nickel-Chrom/Nickel-Aluminium	961
10.3.6	Thermoelemente Typ N - Nickel-Chrom-Silizium/Nickel-Silizium	969
10.3.7	Thermoelemente Typ R - Platin-13%Rhodium/Platin	978
10.3.8	Thermoelemente Typ S - Platin-10%Rhodium/Platin	989
10.3.9	Thermoelemente Typ B - Platin-30%Rhodium/Platin-6%Rhodium	997
10.3.10	Hochtemperatur-Thermoelemente Typ C - Wolfram-5%Rhenium/Wolfram-26%Rhenium	1003
10.3.11	Hochtemperatur-Thermoelemente Typ A - Wolfram-5%Rhenium/Wolfram-20%Rhenium	1010
10.4	Weitere gebräuchliche Thermoelemente	1016
10.4.1	Thermoelemente Typ L - Eisen/Kupfer-Nickel	1016
10.4.2	Thermoelemente Typ U - Kupfer/Kupfer-Nickel	1021
10.4.3	Thermoelemente Chromel-Kopel (Nickel-Chrom/Kupfer-Nickel)	1023
10.4.4	Hochtemperatur-Thermoelemente Wolfram-3%Rhenium/Wolfram-25%Rhenium	1029
10.4.5	Weitere hochschmelzende metallische und nichtmetallische Thermoelemente	1032
10.5	Reinmetall-Thermoelemente	1034
10.5.1	Reinmetall-Thermoelemente Platin/Palladium	1034
10.5.2	Reinmetall-Thermoelemente Gold/Platin	1037
10.5.3	Weitere Edelmetall-Thermoelemente	1040
10.6	Literatur	1042

11 Spezielle elektrische Temperaturmessverfahren	1049
11.1 Rauschthermometer	1050
11.1.1 Grundlagen	1050
11.1.2 Direkte Messverfahren	1052
11.1.3 Vergleichsverfahren	1055
11.1.4 Verfahren mit Referenz-Rauschspannungsquelle	1060
11.1.5 Anwendungs- und Ausführungsbeispiele für den Hochtemperaturbereich	1060
11.1.6 Rauschthermometer für den Tieftemperaturbereich	1064
11.2 Frequenzanaloge Temperatursensoren	1066
11.2.1 Einführung	1066
11.2.2 Quarz-Thermometer	1066
11.2.3 Akustische Oberflächenwellen-Sensoren	1071
11.3 Elektronische Temperatursensoren	1086
11.3.1 U-I-Kennlinien von Dioden und Transistoren	1087
11.3.2 Temperaturlineare Spannungsquellen	1093
11.3.3 Temperaturlineare Stromquellen	1097
11.4 Literatur	1100
12 Spezielle nichtelektrische Temperaturmessverfahren	1105
12.1 Temperaturindikatoren	1106
12.1.1 Festkörper-Temperaturindikatoren	1106
12.1.2 Temperaturindikatoren mit Form- oder Größenänderung	1107
12.1.3 Temperaturmessfarben	1111
12.1.4 Flüssigkristall-Temperaturindikatoren	1113
12.2 Akustische Temperaturmessung	1116
12.2.1 Grundlagen	1116
12.2.2 Methoden der Schallgeschwindigkeitsmessung	1120
12.2.3 Typische Einsatzgebiete und Anwendungsbeispiele	1125
12.3 Faseroptische Temperaturmessung	1132
12.3.1 Einführung	1132
12.3.2 Ortsauflösende verteilte Temperaturmesstechnik	1135
12.3.3 Fasergitter-Temperatursensoren	1142
12.3.4 Thermochrome Temperatursensoren	1145
12.3.5 Lumineszenz-Temperatursensoren	1147
12.3.6 Interferometrische Temperatursensoren	1150
12.3.7 Faseroptische Strahlungsthermometer	1152
12.4 Literatur	1154
13 Strahlungstemperaturmessung	1161
13.1 Einführung	1163
13.2 Grundlagen der Strahlungstemperaturmessung	1165
13.2.1 Größen und Begriffe	1165
13.2.2 Fotometrisches Grundgesetz	1168
13.2.3 Fotometrisches Entfernungsgesetz	1168

13.2.4	Strahlungsphysikalische Eigenschaften der Oberflächen und der Übertragungsstrecke	1169
13.2.5	Kirchhoffsches Strahlungsgesetz	1170
13.2.6	Spektraler Emissionsgrad	1171
13.2.7	Grundgesetze der Strahlungsmesstechnik	1171
13.2.8	Schwarze Strahler	1176
13.2.9	Graue und selektive Strahler	1183
13.3	Verfahren der Strahlungstemperaturmessung	1184
13.3.1	Grundlagen der Strahlungstemperaturmessung am Schwarzen Strahler	1184
13.3.2	Temperaturmessung durch Strahldichteabgleich	1185
13.3.3	Grundprinzip der Strahldichtethermometer	1187
13.3.4	Kennliniengleichungen von Strahldichtethermometern	1189
13.3.5	Fehlerquellen bei der Strahlungstemperaturmessung	1191
13.4	Bauarten von Strahlungsthermometern	1193
13.4.1	Gesamtstrahlungsthermometer	1193
13.4.2	Spektral-Strahlungsthermometer	1195
13.4.3	Bandstrahlungsthermometer	1197
13.4.4	Verhältnis-Strahlungsthermometer	1198
13.4.5	Mehrkanal-Strahlungsthermometer	1201
13.5	Kennwerte von Strahlungsthermometern	1204
13.6	Korrektur des Einflusses von Emissionsgrad und Umgebungstemperatur	1211
13.6.1	Grundlagen	1211
13.6.2	Korrekturgleichungen für Gesamtstrahlungsthermometer	1216
13.6.3	Korrekturgleichungen für Spektral-Strahlungsthermometer	1220
13.6.4	Korrekturgleichungen für Bandstrahlungsthermometer	1227
13.6.5	Korrekturgleichungen für Verhältnis-Strahlungsthermometer	1229
13.7	Ermittlung oder Bestimmung des Emissionsgrades	1232
13.7.1	Grundlagen	1232
13.7.2	Übernahme von Literaturwerten	1233
13.7.3	Experimentelle Bestimmung des Emissionsgrades	1234
13.8	Gerätetechnik	1251
13.8.1	Anwenderorientierte Einteilung von Strahlungsthermometern	1251
13.8.2	Optischer Kanal	1254
13.8.3	Ausführungsbeispiele	1257
13.9	Empfänger von Strahlungsthermometern	1262
13.9.1	Einführung	1262
13.9.2	Kennwerte von Empfängern für Strahlungsthermometer	1263
13.9.3	Quantendektoren	1272
13.9.4	Thermische Empfänger	1284
13.10	Elektronische Signalverarbeitung	1301
13.10.1	Gleichlicht-Strahlungsthermometer	1301
13.10.2	Wechsellicht-Strahlungsthermometer	1302
13.11	Aspekte der Gehäusekonstruktion und des Zubehörs	1304
13.11.1	Maßnahmen zur Temperaturstabilität	1304

13.11.2 Hilfsmittel zur Messfeldmarkierung	1305
13.12 Prüfung und Kalibrierung von Strahlungsthermometern	1306
13.12.1 Einführung	1306
13.12.2 Häufige Ursachen von Störungen bei der Strahlungstemperaturmessung	1306
13.12.3 Wartung und Prüfzyklus, Mindestanforderungen an eine Prüfung von Strahlungsthermometern	1308
13.12.4 Prüfung von Kennwerten und Spezifikationen	1309
13.12.5 Kalibrierung von Strahlungsthermometern	1328
13.12.6 Kontrolle der Kalibrierung von Strahlungsthermometern im Einsatz	1363
13.13 Anwendungsgrundsätze und Einsatzbeispiele	1365
13.13.1 Kriterien für die Auswahl eines Strahlungs-Temperaturmessverfahrens	1365
13.13.2 Einfluss von Zwischenmedien	1366
13.13.3 Einfluss des Tageslichts	1367
13.13.4 Verminderung des Emissionsgradeinflusses	1369
13.13.5 Anwendungsbeispiele	1372
13.14 Literatur	1382
14 Thermografie	1395
14.1 Aufgaben, Zielstellungen und Einsatzgebiete der Thermografie	1396
14.2 Grundlagen	1397
14.2.1 Strahlungsphysikalische Eigenschaften von Messobjekten und Übertragungsstrecke	1397
14.2.2 Zu beachtende Einflussfaktoren und Fehlerquellen der Thermografie	1398
14.2.3 Spezifische spektrale Ausstrahlung und Emissionsgrad	1399
14.2.4 Thermische Auflösung und Strahlungskontrast	1401
14.2.5 Einfluss von Fremdstrahlung	1403
14.3 Thermografische Verfahren und Geräte	1404
14.3.1 Temperaturmessfarben, Flüssigkristalle und Infrarot-Fotografie	1404
14.3.2 Klassische thermografische Verfahren und Geräte	1405
14.3.3 Detektoren von Thermografiegeräten	1407
14.3.4 Aufbau und Grundfunktionen von Thermografiegeräten	1416
14.4 Auswahlkriterien für ein Thermografiesystem	1430
14.4.1 Abgrenzung der Einsatzzielstellung und der Messaufgaben	1430
14.4.2 Forderungen an Thermografiesysteme	1431
14.4.3 Begriffe und messtechnische Daten von Thermografiegeräten und -Detektoren	1431
14.5 Prüfung und Kalibrierung von Thermografiegeräten	1440
14.5.1 Allgemeines	1440
14.5.2 Messung der rauschäquivalenten Temperaturdifferenz $\delta T_{R\bar{a}}$ (NETD)	1441
14.5.3 Messung der Winkelauflösung $\delta \beta_S$ (SRF)	1442

14.5.4	Messung der minimal auflösbaren Temperaturdifferenz $\delta T_{B,\min}$ (MRTD)	1443
14.5.5	Messung der minimal wahrnehmbaren Temperaturdifferenz $\delta T_{D,\min}$ (MDTD)	1444
14.5.6	Kalibrierung von Thermografiegeräten	1445
14.6	Messwertverarbeitung und Bildauswertung	1447
14.6.1	Prinzipielle Möglichkeiten zur Bildbearbeitung und Bildauswertung	1447
14.6.2	Zeitliche und örtliche Mittelung	1448
14.6.3	Inhomogenitäts-Korrektur	1448
14.6.4	Verfahren zur Emissionsgradkorrektur	1449
14.7	Anwendungsbeispiele	1451
14.7.1	Messung und Darstellung von Temperaturfeldern	1451
14.7.2	Anwendungen zur technischen Diagnostik und zur Objekterkennung	1452
14.8	Literatur	1457
15	Spektroskopische Temperaturmessung	1465
15.1	Grundlagen	1465
15.1.1	Einführung	1465
15.1.2	Grundvoraussetzungen für spektroskopische Temperaturmessverfahren	1467
15.1.3	Unterschiede zur Strahlungstemperaturmessung	1468
15.1.4	Thermische Anregung und Ionisierung von heißen Gasen und Plasmen	1469
15.1.5	Selbstabsorption und Temperaturmessung in optisch dichten Plasmen	1472
15.2	Spektroskopische Temperaturmessverfahren	1475
15.2.1	Temperaturmessung aus Linien- und Kontinuumsstrahlung	1475
15.2.2	Laserspektroskopische Temperaturmessung	1481
15.2.3	Bildgebende spektroskopische Verfahren	1491
15.3	Literatur	1494
16	Tabellen zur Temperaturmesstechnik	1497
16.1	Tabellen zu Kapitel 6 - Dynamisches Verhalten von Berührungsthermometern	1497
16.2	Tabellen zu Kapitel 9 - Widerstandsthermometer	1503
16.3	Tabellen zu Kapitel 10 - Thermoelemente	1532
16.4	Tabellen zu Kapitel 13 - Strahlungstemperaturmessung	1590
	Stichwortverzeichnis	1593