

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Bedeutung der Temperaturmessung . . . . .	1
1.2	Entwicklungstendenzen der Temperaturmesstechnik . . . . .	4
1.3	Übersicht über technische Temperaturmessverfahren . . . . .	5
1.4	Literatur . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Temperaturmesstechnik</b>	<b>9</b>
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 Temperaturska- len . . . . .	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
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Temperaturmessung mit Berührungsthermometern</b>	<b>57</b>
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
<b>4</b>	<b>Temperaturmessung mit Berührungsthermometern an Festkörpern</b>	<b>91</b>
4.1	Temperaturmessung in Festkörpern und Schüttgütern . . . . .	92
4.1.1	Einführung und allgemeine Messbedingungen . . . . .	92
4.1.2	Eingebetteter 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
<b>5</b>	<b>Temperaturmessung mit Berührungsthermometern in Flüssigkeiten und Gasen</b>	<b>197</b>
5.1	Messbedingungen in Flüssigkeiten und Gasen . . . . .	198
5.1.1	Messsituation und Messaufgaben . . . . .	198
5.1.2	Thermische Messfehler . . . . .	200
5.2	Wärmeübergangskoeffizient $\alpha$ . . . . .	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

<b>6</b>	<b>Dynamisches Verhalten von Berührungsthermometern in Flüssigkeiten und Gasen</b>	<b>323</b>
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 $\alpha$ -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 Modellfunktionen des homogenen Zylinders	414
6.8.2	Approximation von Übergangsfunktionen mit Modellfunktionen 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 über die Bestimmung der Ableitungen	472
6.10.6	Endwertextrapolation bei unbekannten Zeitkonstanten über Differenzengleichungen	476
6.10.7	Fehlereinflüsse auf die Endwertextrapolation	477
6.11	Literatur	480
<b>7</b>	<b>Kalibrierung von Berührungsthermometern</b>	<b>485</b>
7.1	Einführung und Begriffe	486
7.1.1	Prüfung	486
7.1.2	Kalibrierung	486
7.1.3	Rückführbare 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	Einführung	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	Fehlereinflüsse 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	Miniaturfixpunktzellen 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
<b>8</b>	<b>Mechanische Berührungsthermometer</b> . . . . .	<b>637</b>
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
<b>9</b>	<b>Widerstandsthermometer</b> . . . . .	<b>677</b>
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
<b>10</b>	<b>Thermoelemente</b> . . . . .	<b>831</b>
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	Grundsicherungen 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



<b>11 Spezielle elektrische Temperaturmessverfahren</b>	<b>1049</b>
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
<b>12 Spezielle nichtelektrische Temperaturmessverfahren</b>	<b>1105</b>
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
<b>13 Strahlungstemperaturmessung</b>	<b>1161</b>
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	Quantendetektoren . . . . .	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 Strahlungstemperatur- messung . . . . .	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-Temperatur- messverfahrens . . . . .	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
<b>14</b>	<b>Thermografie</b> . . . . .	<b>1395</b>
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 Strahlungscontrast . . . . .	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 $\delta T_{Ra}$ (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
<b>15</b>	<b>Spektroskopische Temperaturmessung</b>	<b>1465</b>
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
<b>16</b>	<b>Tabellen zur Temperaturmesstechnik</b>	<b>1497</b>
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
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>1593</b>