

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Thermometrie	1
1.1	Temperaturbegriff	1
1.2	Kelvin-Temperaturskala	2
1.3	Statistische Wärmetheorie	4
1.4	Negative absolute Temperaturen	5
1.5	Thermodynamische Temperaturskala	6
1.5.1	Carnot-Prozeß	7
1.5.2	Kelvin-Skala	8
1.5.3	Temperaturskalen	9
1.5.4	Ideales Gasverhalten und thermodynamische Temperaturskala	10
1.5.5	Carnot-Prozeß für das ideale Gas	11
1.5.6	Die Entropie	12
1.5.7	Thomson-Joule-Effekt	14
1.6	Thermodynamische Temperaturskala unterhalb von 1 K	15
1.6.1	Thermometereichung nach dem 2. Hauptsatz	16
1.6.2	Besetzungsthermometrie	17
1.6.3	Temperaturmessung durch den osmotischen Druck	19
1.6.4	Schmelzdruck von ^3He	20
1.7	Rauschthermometrie	20
1.8	Strahlungstheoretische Temperaturskala	22
1.9	Akustische Thermometrie	26
1.10	Internationale praktische Temperaturskala 1968 (IPTS-68)	26
1.10.1	Allgemeines	26
1.10.2	Einheiten	27
1.10.3	Definition der IPTS-68	27
1.10.4	Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der IPTS-68	29
1.10.5	Empfohlene praktische Temperaturskala unterhalb von 5,2 K	30
1.10.6	Bereich zwischen 5,189 und 13,81 K	30
	Literatur zu Kapitel 1	31
2	Praktische Temperaturmessung	33
2.1	Ausdehnungsthermometer	33
2.1.1	Allgemeines	33
2.1.2	Gasthermometer	33
2.1.2.1	Gasthermometer konstanten Volumens	33
2.1.2.2	Gasthermometer konstanten Druckes	35

2.1.2.3	Gefäßmaterialien	36
2.1.2.4	Füllgase	37
2.1.2.5	Reduktion der gasthermometrischen Temperatur auf die thermodynamische Skala	37
2.1.2.6	Differential-Gasthermometer	38
2.1.3	Flüssigkeitsthermometer	39
2.1.3.1	Allgemeines	39
2.1.3.2	Bauarten, Theorie	40
2.1.3.3	Thermometerkorrekturen	42
2.1.3.4	Spezielle Formen des Flüssigkeitsthermometers	43
2.1.4	Flüssigkeits-Federthermometer	44
2.1.5	Metallausdehnungsthermometer	45
2.2	Dampfdruckthermometer	46
2.2.1	Allgemeines	46
2.2.2	Meßmethoden, Ausführungsformen	47
2.2.3	Thermomolekulare Druckdifferenz	48
2.2.4	Dampfdrucktabellen	49
2.3	Thermoelemente	51
2.3.1	Thermoelektrischer Effekt	51
2.3.2	Thermoelektrische Thermometer	52
2.3.3	Gebräuchliche Thermoelemente	54
2.3.4	Ausführungsformen und Herstellung	59
2.3.5	Messung der Thermospannung	62
2.3.5.1	Ausschlagsverfahren	62
2.3.5.2	Kompensationsmethoden	62
2.3.5.3	Digital-Millivoltmeter	63
2.3.5.4	Nachweis kleiner Thermospannungen durch Gleichspannungs-Wechselspannungs-Umsetzer	65
2.3.5.5	Thermospannungskonverter	65
2.3.6	Prüfung und Eichung von Thermoelementen	66
2.3.6.1	Allgemeines zu den Eichmethoden	66
2.3.6.2	Spezielle Eichverfahren	67
2.3.6.3	Erzielbare Genauigkeit	69
2.3.6.4	Einfluß der Temperatur der Nebenlötstelle	69
2.3.6.5	Prüfung der Homogenität von Thermodrähten	70
2.3.7	Meßfehler beim Einbau, äußere Einflüsse und Alterung	72
2.3.7.1	Einbaufehler	72
2.3.7.2	Einfluß des Druckes	74
2.3.7.3	Einfluß eines Magnetfeldes	75
2.3.7.4	Einfluß einer Neutronenbestrahlung	75
2.3.7.5	Alterungseffekte	76
2.4	Widerstandsthermometer	78
2.4.1	Allgemeines	78
2.4.2	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes	78
2.4.3	Werkstoffe für metallische Widerstandsthermometer	80
2.4.3.1	Grundsätzliches	80
2.4.3.2	Platin-Widerstandsthermometer	80
2.4.3.3	Platinthermometer für hohe Temperaturen	82
2.4.3.4	Platinthermometer und Internationale Temperaturskala	82
2.4.3.5	Widerstandsthermometer aus anderen Metallen	83
2.4.4	Halbleiterwiderstände (Thermistoren)	84
2.4.5	Konstruktion der Widerstandsthermometer	86
2.4.5.1	Drahtwicklung	86
2.4.5.2	Dünnschichtwiderstände	88
2.4.5.3	Anschlußleitungen	88
2.4.5.4	Thermometerformen; Schutzrohre	89

2.4.5.5	Alterung der Widerstandsthermometer	89
2.4.6	Meßverfahren	90
2.4.6.1	Kompensationsverfahren	90
2.4.6.2	Brückenschaltungen	91
2.4.6.3	Kreuzspulinstrument	96
2.4.6.4	Linearisierung von Widerstandsthermometern; Widerstandskonverter	97
2.4.6.5	Temperaturintegrator mit Thermistor	100
2.4.6.6	Direkte Verstärkungsmethoden	101
2.4.6.7	Messung von Temperaturdifferenzen	102
2.4.7	Meßfehler und Eichung	102
2.4.7.1	Erwärmung des Thermometers durch den Meßstrom	102
2.4.7.2	Druckeinflüsse	103
2.4.7.3	Stabilität von Widerstandsthermometern	103
2.4.7.4	Eichmethoden	104
2.4.8	Anwendungen spezieller Art	105
2.5	Strahlungspyrometer	105
2.5.1	Grundlagen der Pyrometrie	105
2.5.1.1	Bestimmung der Temperatur aus Strahlungsmessungen	106
2.5.1.2	Der schwarze Körper	107
2.5.1.3	Methoden der Lichtschwächung	110
2.5.2	Gesamtstrahlungspyrometer	113
2.5.2.1	Allgemeines	113
2.5.2.2	Strahlungsempfänger	114
2.5.2.3	Gesamtstrahlungspyrometer mit Thermoelement	126
2.5.2.4	Gesamtstrahlungspyrometer mit Fotozellen	128
2.5.2.5	Messung nichtschwarzer Körper	129
2.5.2.6	Meßfehler	130
2.5.3	Optische Pyrometrie	130
2.5.3.1	Temperatur und Helligkeit	130
2.5.3.2	Glühfadenpyrometer	131
2.5.3.3	Objektive optische Pyrometer	133
2.5.3.4	Pyrometer nach Wanner	134
2.5.3.5	Spektralfotometer von König-Martens	135
2.5.3.6	Emissionsgrad und Messung nichtschwarzer Strahler	136
2.5.4	Farbpyrometrie	137
2.5.4.1	Verteilungstemperatur	138
2.5.4.2	Messung mit dem Glühfadenpyrometer	139
2.5.4.3	Farbpyrometer nach Naeser	140
2.5.4.4	Objektive Farbpyrometer	141
2.5.5	Fotothermometrie	142
2.5.6	Temperaturmessung an Flammen	142
2.5.6.1	Temperatur einer Flamme	142
2.5.6.2	Messung an leuchtenden Flammen	143
2.5.6.3	Methode der Linienumkehr	144
2.5.6.4	Temperaturbestimmung aus der Breite von Spektrallinien	145
2.5.6.5	Andere Meßmethoden in Gasentladungen	146
2.6	Weitere Temperaturmeßmethoden; Temperaturindikatoren	147
2.6.1	Temperaturbestimmung mittels Schallgeschwindigkeit	147
2.6.2	Quarzresonator als Thermometer	150
2.6.3	Rauschthermometrie	151
2.6.4	Interferometrische Temperaturmessung	156
2.6.5	Magnetische Temperaturmessung	158
2.6.6	Pyro- und ferroelektrische Thermometer	159
2.6.7	Thermokolore; Seger-Kegel	160
2.6.8	Thermographie, optische Methoden	161
2.6.9	Kalorimetrische Temperaturmessung	162

2.7	Thermostate; Temperaturregelung und -aufzeichnung	164
2.7.1	Theorie der selbsttätigen Temperaturregelung	164
2.7.2	Temperaturfühler und -regler; Peltier-Kühlung	169
2.7.3	Gas- und Flüssigkeitsthermostate	173
2.7.3.1	Badflüssigkeiten	173
2.7.3.2	Rührvorrichtung	173
2.7.3.3	Wasserbadthermostate	173
2.7.3.4	Gasthermostate	175
2.7.3.5	Thermostate für höhere Temperaturen	176
2.7.3.6	Thermostate für Temperaturen unterhalb des Eispunktes	177
2.7.4	Präzisionsthermostate	178
2.7.5	Hochtemperaturthermostate	182
2.7.6	Steuerung von zeitlich veränderlichen Temperaturen	183
2.7.6.1	Programmierbare Temperaturregelung	184
2.7.6.2	Thermostate mit linearem Temperaturanstieg	185
2.7.6.3	Thermostate für zyklische Temperaturänderungen	187
2.7.6.4	Thermostate zum Erzeugen eines konstanten Temperaturdifferentials	188
2.7.6.5	Thermostate für periodischen Temperaturverlauf	189
2.7.7	Temperaturaufzeichnung	190
2.8	Thermometereichung; Standardinstrumente	190
2.8.1	Allgemeines über Thermometereichung	191
2.8.2	Eichung von Standardthermometern	191
2.8.3	Vergleich mit Standardthermometern	192
2.8.4	Allgemeines über Temperaturfixpunkte	194
2.8.5	Primäre thermometrische Fixpunkte	195
2.8.5.1	Primäre Fixpunkte zwischen 13,81 und 27,102 K	195
2.8.5.2	Die Sauerstoff-Fixpunkte	196
2.8.5.3	Der Wassertripelpunkt	197
2.8.5.4	Der Wassersiedepunkt	198
2.8.5.5	Erstarrungspunkte von Zn, Ag und Au	199
2.8.6	Sekundäre Fixpunkte unterhalb des Eispunktes	200
2.8.7	Sekundäre Fixpunkte oberhalb des Eispunktes	201
2.9	Einbau und Trägheit des Thermometers	203
2.9.1	Theorie des inneren Einbaus	203
2.9.2	Innerer Einbau der Thermometer	207
2.9.2.1	Allgemeines	207
2.9.2.2	Messung in festen Körpern	208
2.9.2.3	Temperaturmessung in Flüssigkeiten	209
2.9.2.4	Lufttemperaturmessung	209
2.9.2.5	Gastemperaturmessung in Rohrleitungen	209
2.9.2.6	Messung hoher Gastemperaturen	210
2.9.2.7	Messung in schnell strömenden Gasen	212
2.9.3	Messung der Oberflächentemperatur	213
2.9.4	Anzeigetragheit des Thermometers	216
2.9.4.1	Einmalige, plötzliche Temperaturänderung	217
2.9.4.2	Periodische Temperaturänderungen	218
2.9.4.3	Nachteile des Thermometers	219
2.9.5	Temperaturmessung an rotierenden Teilen	220
2.9.6	Berührungsfreie Temperaturmessung	221
2.9.6.1	Oberflächentemperaturmessung durch kompensierte Wärmeübertragung	221
2.9.6.2	Oberflächentemperaturmessung an Ultrazentrifugen	222
2.9.6.3	Induktive Signalübertragung von rotierenden Teilen	223
2.9.6.4	Induktive Temperaturübertragung bei Waagen	224
2.9.6.5	Spezielle Verfahren	225
2.9.7	Untersuchung von Temperaturfeldern	226
	Literatur zu Kapitel 2	226

3	Messung tiefer Temperaturen	234
3.1	Gas-, Dampfdruck- und akustische Thermometer	235
3.1.1	Gasthermometer für tiefe Temperaturen; Theorie	235
3.1.2	Aufbau der Gasthermometer	236
3.1.3	Andere Bauformen der Gasthermometer	238
3.1.4	Gasthermometer im überkritischen Druckbereich	239
3.1.5	Dampfdruck tiefsiedender Gase; Korrekturen	241
3.1.5.1	Dampfdruck von Sauerstoff	242
3.1.5.2	Dampfdruck von Neon	242
3.1.5.3	Dampfdruck von Wasserstoff	243
3.1.5.4	Dampfdruck der Helium-Isotope	243
3.1.5.5	Dampfdruckkorrekturen	245
3.1.6	Praktische Dampfdruckmessung	247
3.1.7	Akustisches Thermometer	250
3.2	Thermoelemente bei tiefen Temperaturen	251
3.2.1	Grundsätzliches	251
3.2.2	Materialien für Tieftemperatur-Thermoelemente	252
3.2.2.1	Der „passive“ Schenkel	252
3.2.2.2	Kupfer/Konstantan-Element	254
3.2.2.3	Gold-Kobalt-Legierungen	254
3.2.2.4	Gold-Eisen-Legierungen	255
3.2.2.5	Weitere Materialien	257
3.2.3	Einfluß von Magnetfeldern u. a.	257
3.2.4	Messung sehr kleiner Thermospannungen	259
3.2.5	Supraleitende Schalter und Wechselrichter	261
3.2.6	Eichmethoden und Befestigung	262
3.3	Widerstands- und Dioden-Thermometrie	263
3.3.1	Allgemeines	264
3.3.2	Andere Metallthermometer	264
3.3.3	Germaniumthermometer	265
3.3.3.1	Grundsätzliches	265
3.3.3.2	Aufbau und Eigenschaften	266
3.3.3.3	Si- und SiC-Widerstandsthermometer	268
3.3.3.4	Meßwertinterpolation	270
3.3.4	Kohle-Widerstandsthermometer	271
3.3.4.1	Kompakte Kohle-Widerstandsthermometer	272
3.3.4.2	Kohleschicht-Thermometer	277
3.3.4.3	Kohle-Glasthermometer	281
3.3.4.4	Kohlethermometer bei sehr tiefen Temperaturen	282
3.3.4.5	Zur Widerstandsmessung	283
3.3.4.6	Trägheit der Kohlethermometer; thermische Ankopplung	286
3.3.4.7	Einfluß äußerer Parameter	290
3.3.5	Halbleiter-Diodenthermometer	294
3.3.5.1	Theorie des Diodenthermometers	294
3.3.5.2	GaAs-Dioden	295
3.3.5.3	Ge- und Si-Dioden	296
3.3.5.4	GaAs-Widerstandsthermometer	296
3.3.6	Widerstandsmeßverfahren	296
3.3.6.1	Gleichspannungsverfahren	297
3.3.6.2	Wechselstrombrücken	298
3.3.6.3	Phasenempfindlicher Detektor	301
3.3.6.4	Meßbrücken mit induktiven Spannungsteilern	303
3.3.6.5	Selbstabgleichende Widerstandsbrücken	308
3.3.6.6	Gepulste Wechselspannungsbrücken	309
3.3.6.7	Widerstands-Frequenz-Konverter	310

3.3.6.8	Messung der thermischen Impedanz	311
3.3.7	Einfluß äußerer Parameter	312
3.3.7.1	Hydrostatischer Druck	312
3.3.7.2	Einfluß von Magnetfeldern	312
3.3.7.3	Bestrahlungseinflüsse	314
3.3.7.4	Alterung von Widerstandsthermometern	315
3.3.8	Spezielle Eichverfahren	315
3.3.9	Montage der Widerstandsthermometer	317
3.4	Magnetische Thermometrie I: Elektronischer Paramagnetismus	319
3.4.1	Allgemeines	319
3.4.2	Eigenschaften der paramagnetischen Substanzen	321
3.4.2.1	Cer-Magnesium-Nitrat (CMN)	321
3.4.2.2	Chrom-Kalium-Alaun (CPA)	323
3.4.2.3	Cer-Dipocolinat (CDP)	323
3.4.2.4	Lanthan-Cer-Magnesiumnitrat (CLMN)	323
3.4.2.5	Eisen-Ammonium-Alaun (FAS)	324
3.4.2.6	Weitere Substanzen	325
3.4.2.7	Verdünnte Legierungen	326
3.4.2.8	Hyperfeinstruktur-Resonanz-Thermometer	326
3.4.3	Meßverfahren	327
3.4.3.1	Allgemeines	327
3.4.3.2	Fluxmetrische Methoden	328
3.4.3.3	Dynamische Verfahren	330
3.4.3.4	Meßbrücken	331
3.4.3.5	Magnetische Quanteninterferenz	335
3.4.3.6	Aufbau von Kontakten und Schwachstellen	341
3.4.3.7	Supraleitender Flußtransformator	343
3.4.3.8	SQUID-Magnetometer	344
3.4.4	Spezielle Eichverfahren	347
3.4.4.1	Eichung nach dem 2. Hauptsatz	348
3.4.4.2	Vergleich mit dem Rauschthermometer	349
3.4.4.3	Eichung durch die Schmelzkurve von festem ^3He	351
3.4.4.4	Eichung durch die Sprungpunkte von Supraleitern	351
3.4.5	Thermische Ankopplung der paramagnetischen Thermometer	352
3.4.6	Temperaturskalen für paramagnetische Salze	354
3.5	Magnetische Thermometrie II: Kernphysikalische Thermometer	355
3.5.1	Kernparamagnetismus	355
3.5.2	Messung der statischen Kernsuszeptibilität	357
3.5.3	Gepulstes NMR-Thermometer	360
3.5.4	Kontinuierlich betriebenes NMR-Thermometer (CW-NMR)	365
3.5.5	Kernorientierungsthermometrie (NO-Thermometer)	367
3.5.6	Thermometrie mit Hilfe des Mößbauer-Effekts	369
3.5.7	Thermische Ankopplung der Kernthermometer	372
3.5.8	Eich- und Vergleichsmethoden	375
3.6	Dielektrische Thermometer	377
3.6.1	Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten	377
3.6.2	SrTiO_3 -Glaskeramik-Thermometer	378
3.6.3	Andere dielektrische Thermometer	379
3.6.4	Verhalten bei sehr tiefen Temperaturen	380
3.6.5	Meßverfahren	381
3.6.6	Pyroelektrische Thermometer	381
3.6.7	Eigenschaften pyroelektrischer Thermometer	383
3.6.8	Anwendung der pyroelektrischen Thermometer	384
3.7	Supraleitungsthermometer	385
3.7.1	Magnetische Thermometrie mit einem Supraleiter	385

3.7.2	Praktische Ausführung	386
3.7.3	Supraleitendes Widerstandsthermometer	387
3.7.4	Supraleitungstemperaturregler	389
3.7.5	Messung von Temperaturgradienten	390
3.8	Rauschthermometrie	390
3.8.1	Grundlagen	391
3.8.2	Rauschthermometer mit Verstärker	392
3.8.3	SQUID-Rauschthermometer	393
3.8.4	Josephson-Effekt und Rauschthermometrie	395
3.8.5	Rauschthermometer mit Josephson-Diode	397
3.8.6	Vergleich mit Kernthermometern	398
3.9	Schmelzkurve und osmotischer Druck von ^3He	399
3.9.1	Eigenschaften von festem und flüssigem ^3He	400
3.9.2	Neuere Bestimmungen der ^3He -Schmelzkurve	401
3.9.3	Messung des Schmelzdruckes	402
3.9.4	Schmelzdruckkurven	404
3.9.5	Temperaturmessung mit Hilfe des osmotischen Druckes	405
3.10	Vergleich, Einbau und Eichung der Tieftemperatur-Thermometer	407
3.10.1	Vergleich der Tieftemperatur-Thermometer	407
3.10.2	Einbau, thermische Ankopplung	408
3.10.3	Theorie der thermischen Ankopplung	411
3.10.4	Kontaktprobleme bei sehr tiefen Temperaturen	416
3.10.5	Eichmethoden, Fixpunkte	417
3.10.5.1	Spezielle Eichmethoden	417
3.10.5.2	Vergleich mit He-Dampfdruck-Thermometer	418
3.10.5.3	Thermometrische Fixpunkte	418
3.10.5.4	Fitting der Eichdaten	420
3.10.6	Vergleich der Temperaturskalen	421
3.10.7	Eichkryostaten und Temperaturregler	422
	Literatur zu Kapitel 3	428
	Sachverzeichnis	437

Inhaltsübersicht der weiteren Bände

Band II: Thermische und kalorische Stoffeigenschaften

Thermische Ausdehnung
 Kalorimetrie
 Heterogene Einstoffsysteme
 Wärmeleitfähigkeit
 Wärmeübertragung
 Mehrstoffsysteme

Band III: Tiefe und hohe Temperaturen

Kälteerzeugung
 Erzeugung tiefer Temperaturen
 Tiefste Temperaturen
 Experimentelle Technik bei tiefen Temperaturen
 Erzeugung hoher Temperaturen