

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundlagen der Thermometrie</b>	<b>1</b>
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 $^3\text{He}$	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
<b>2</b>	<b>Praktische Temperaturmessung</b>	<b>33</b>
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 Thermo drähten . . . . .	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	Dünnpfilmwiderstände . . . . .	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 Temperatursteuerung . . . . .	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	Anzeigeträgheit des Thermometers . . . . .	216
2.9.4.1	Einmalige, plötzliche Temperaturänderung . . . . .	217
2.9.4.2	Periodische Temperaturänderungen . . . . .	218
2.9.4.3	Nacheilen des Thermometers . . . . .	219
2.9.5	Temperaturmessung an rotierenden Teilen . . . . .	220
2.9.6	Berührungsreie 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

<b>3</b>	<b>Messung tiefer Temperaturen . . . . .</b>	<b>234</b>
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 $^3\text{He}$ . . . . .	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	$\text{SrTiO}_3$ -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 $^3\text{He}$ . . . . .	399
3.9.1	Eigenschaften von festem und flüssigem $^3\text{He}$ . . . . .	400
3.9.2	Neuere Bestimmungen der $^3\text{He}$ -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
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	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