

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Helium – Grundlegende Eigenschaften</b> .....	1
1.1 Allgemeines .....	1
1.2 Van der Waals-Bindung .....	2
1.3 Thermodynamische Eigenschaften .....	4
1.3.1 Dichte .....	4
1.3.2 Spezifische Wärme .....	5
1.3.3 Latente Wärme .....	6
1.4 Phasendiagramm .....	7
1.4.1 $^4\text{He}$ .....	7
1.4.2 $^3\text{He}$ .....	7
<b>2. Suprafluides <math>^4\text{He}</math> – Helium-II</b> .....	9
2.1 Experimentelle Beobachtungen .....	9
2.1.1 Viskosität und Suprafluidität .....	10
2.1.2 Becherexperimente .....	11
2.1.3 Thermomechanischer Effekt .....	13
2.1.4 Wärmetransport .....	15
2.1.5 Zweiter Schall .....	17
2.2 Zwei-Flüssigkeits-Modell .....	18
2.2.1 Zwei-Flüssigkeits-Hydrodynamik .....	19
2.2.2 Schallausbreitung .....	20
2.2.3 Viskositätsmessungen und Becherexperimente .....	29
2.2.4 Andronikashvili-Experiment .....	30
2.2.5 Thermomechanischer Effekt .....	32
2.2.6 Wärmetransport .....	32
2.2.7 Impuls des Wärmeflusses .....	34
2.3 Bose-Einstein-Kondensation .....	35
2.3.1 Ideales Bose-Gas .....	36
2.3.2 Helium .....	40
2.4 Anregungsspektrum von Helium-II .....	42
2.4.1 Phononen und Rotonen .....	43
2.4.2 Spezifische Wärme .....	45
2.4.3 Konzept der kritischen Geschwindigkeit .....	46

2.5	Quantisierung der Zirkulation . . . . .	48
2.5.1	Wellenfunktion der suprafluiden Komponente . . . . .	48
2.5.2	Helium-II unter Rotation . . . . .	49
2.6	Kritische Geschwindigkeit – Experimente . . . . .	54
2.6.1	Bewegung von Ionen in flüssigem Helium . . . . .	54
2.6.2	Flußexperimente . . . . .	57
2.7	Kritisches Verhalten am $\lambda$ -Punkt . . . . .	58
2.7.1	Spezifische Wärme . . . . .	58
<b>3.</b>	<b>Normalfluides <math>^3\text{He}</math></b> . . . . .	<b>61</b>
3.1	Ideales Fermi-Gas – Vergleich mit flüssigem $^3\text{He}$ . . . . .	61
3.1.1	Spezifische Wärme . . . . .	63
3.1.2	Suszeptibilität . . . . .	66
3.1.3	Transporteigenschaften . . . . .	67
3.1.4	Quantitativer Vergleich: $^3\text{He}$ und ideales Fermi-Gas . . . . .	70
3.2	Schmelzkurve . . . . .	70
3.3	Landau-Theorie der Fermi-Flüssigkeit . . . . .	71
3.3.1	Quasiteilchenkonzept . . . . .	72
3.3.2	Wechselwirkungsfunktion . . . . .	74
3.3.3	Anwendung der Landau-Theorie auf normalfluides $^3\text{He}$ . . . . .	75
3.4	Nullter Schall . . . . .	77
3.4.1	Longitudinale Schallausbreitung . . . . .	77
3.4.2	Transversale Schallausbreitung . . . . .	79
3.4.3	Stoßfreie Spinwellen . . . . .	80
3.4.4	Abschließende Bemerkungen zur Landau-Theorie . . . . .	80
<b>4.</b>	<b>Suprafluides <math>^3\text{He}</math></b> . . . . .	<b>83</b>
4.1	Grundlegende experimentelle Beobachtungen . . . . .	84
4.1.1	Phasendiagramm . . . . .	84
4.1.2	Spezifische Wärme . . . . .	86
4.1.3	Suprafluidität . . . . .	87
4.1.4	Relevanz des Zwei-Flüssigkeits-Modells für $^3\text{He}$ . . . . .	87
4.1.5	Kernspinresonanz (NMR) . . . . .	90
4.2	Quantenzustände von suprafluidem $^3\text{He}$ . . . . .	92
4.3	Eigenschaften der suprafluiden Phasen von $^3\text{He}$ . . . . .	94
4.3.1	$^3\text{He}$ A-Phase . . . . .	94
4.3.2	Textur . . . . .	95
4.3.3	$^3\text{He}$ -A <sub>1</sub> und $^3\text{He}$ -B . . . . .	99
4.3.4	Energielücke . . . . .	99
4.3.5	Suprafluides $^3\text{He}$ unter Rotation . . . . .	100
4.3.6	Kollektive Anregungen — Schallausbreitung . . . . .	102

<b>5.</b>	<b><math>^3\text{He}/^4\text{He}</math>-Mischungen</b>	105
5.1	Spezifische Wärme und Phasendiagramm	105
5.1.1	Verdünnte Lösungen von $^3\text{He}$ in Helium-II	106
5.2	Normalfluide Komponente	108
5.2.1	Andronikashvili-Experiment	108
5.2.2	Osmotischer Druck	109
5.3	Transporteigenschaften	110
5.3.1	Wärmetransport	110
5.3.2	Viskosität	111
5.3.3	Selbstdiffusionskoeffizient	112
<b>6.</b>	<b>Phononen</b>	115
6.1	Spezifische Wärme – Debyesche Theorie	115
6.1.1	Bedeutung der Debye-Temperatur	121
6.1.2	Zweidimensionale Systeme	123
6.2	Wärmetransport	125
6.2.1	Experimentelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	127
6.2.2	Temperaturverlauf der Wärmeleitfähigkeit in dielektrischen Kristallen	128
6.2.3	Phonon-Phonon-Streuung	129
6.2.4	Defektstreuung	131
6.3	Einfluß von N-Prozessen auf den Wärmetransport	136
6.3.1	Poiseuille-Fluß	136
6.3.2	Zweiter Schall	139
6.4	Ballistische Ausbreitung von Phononen	141
6.4.1	Phononenfokussierung	142
6.4.2	Zeitaufgelöste Messungen der Phononenausbreitung	144
<b>7.</b>	<b>Leitungselektronen</b>	147
7.1	Spezifische Wärme	147
7.1.1	Leitungselektronen in einfachen Metallen	147
7.1.2	Metalle mit „schweren“ Elektronen	150
7.2	Elektrische Leitfähigkeit	151
7.2.1	Boltzmann-Gleichung, Ladungstransport	152
7.2.2	Matthiesensche Regel	155
7.2.3	Streuung von Elektronen an Verunreinigungen	156
7.2.4	Elektron-Phonon-Streuung	158
7.2.5	Elektron-Magnon-Streuung	160
7.3	Thermische Leitfähigkeit von Metallen	162
7.4	Kondo-Effekt	166
7.4.1	Einfluß der freien Elektronen auf lokale magnetische Momente	167
7.4.2	Streuung von Leitungselektronen an lokalisierten magnetischen Momenten	170
7.4.3	Kondo-Widerstand	171

7.5	Schwer-Fermion-Systeme	174
7.5.1	Elektrischer Widerstand	176
7.5.2	Suszeptibilität	178
7.5.3	Spezifische Wärme	180
<b>8.</b>	<b>Spins</b>	<b>183</b>
8.1	Paramagnetische Systeme – Isolierte Spins	183
8.1.1	Magnetisches Moment	184
8.1.2	Suszeptibilität	185
8.1.3	Spezifische Wärme	188
8.2	Spinwellen – Magnonen	196
8.2.1	Ferromagnete	196
8.2.2	Antiferromagnete	202
8.3	Spingläser	204
8.4	Magnetische Ordnung von Kernspins	208
8.4.1	Systeme mit starker Elektron-Kern-Kopplung	209
8.4.2	Systeme mit schwacher Elektron-Kern-Kopplung	211
8.5	Negative Spintemperaturen	213
8.5.1	Thermodynamik bei negativen Temperaturen	214
8.5.2	Kernordnung	216
8.5.3	Stimulierte Emission	217
<b>9.</b>	<b>Tunnelsysteme</b>	<b>219</b>
9.1	Beschreibung als Zwei-Niveau-Systeme	219
9.1.1	Doppelmuldenpotentiale	220
9.1.2	Kopplung an elektrische und elastische Felder	222
9.1.3	Relaxationsprozesse	223
9.1.4	Relaxationszeiten	228
9.1.5	Resonante Wechselwirkung	230
9.2	Isolierte Tunnelsysteme in Kristallen	232
9.2.1	Termschema	232
9.2.2	Spezifische Wärme	236
9.2.3	Einfluß auf die Wärmeleitung von dielektrischen Kristallen	239
9.2.4	Level-Crossing	241
9.2.5	Dielektrische Suszeptibilität	242
9.2.6	Schallgeschwindigkeit	245
9.3	Wechselwirkende Tunnelsysteme in Kristallen	247
9.3.1	Dielektrische Eigenschaften	247
9.3.2	Theoretische Beschreibung	248
9.3.3	Dielektrische Suszeptibilität im Modell von Würger	251
9.4	Asymmetrische Tunnelsysteme in Kristallen	253
9.4.1	Nb:O,H und Nb:O,D	253
9.4.2	CN <sup>-</sup> in KBr:KCl	256

9.5	Amorphe Dielektrika . . . . .	256
9.5.1	Spezifische Wärme . . . . .	257
9.5.2	Einfluß auf die Wärmeleitfähigkeit . . . . .	260
9.5.3	Relaxationsabsorption . . . . .	262
9.5.4	Resonante Absorption . . . . .	265
9.5.5	Schallgeschwindigkeit und Dielektrizitätskonstante . . . . .	268
9.6	Metallische Gläser . . . . .	269
9.7	Echoexperimente . . . . .	271
<b>10.</b>	<b>Supraleitung . . . . .</b>	<b>277</b>
10.1	Experimentelle Beobachtungen . . . . .	277
10.1.1	Sprungtemperatur . . . . .	279
10.1.2	Meißner-Ochsenfeld-Effekt . . . . .	281
10.1.3	Supraleiter 1. Art . . . . .	284
10.1.4	Supraleiter 2. Art . . . . .	287
10.2	Thermodynamik der Supraleitung . . . . .	290
10.3	Phänomenologische Beschreibung . . . . .	295
10.3.1	London-Gleichung . . . . .	295
10.3.2	Pippard-Gleichung . . . . .	299
10.3.3	Ginzburg-Landau-Theorie . . . . .	300
10.4	Mikroskopische Theorie der Supraleitung . . . . .	307
10.4.1	Cooper-Paare . . . . .	307
10.4.2	BCS-Grundzustand . . . . .	312
10.4.3	Anregung des BCS-Grundzustandes . . . . .	317
10.4.4	BCS-Zustand bei endlicher Temperatur . . . . .	319
10.4.5	Nachweis einer Energielücke . . . . .	322
10.4.6	Tunnelexperimente . . . . .	326
10.4.7	Kritischer Strom und kritisches Magnetfeld . . . . .	330
10.5	Makroskopische Wellenfunktion . . . . .	332
10.5.1	Flußquantisierung . . . . .	333
10.5.2	Paartunneln – Josephson-Effekte . . . . .	335
10.5.3	Supraleitende Magnetometer – SQUID . . . . .	340
10.6	Supraleitung in speziellen Materialien . . . . .	344
10.6.1	Magnetische Supraleiter . . . . .	344
10.6.2	Schwer-Fermion-Supraleiter . . . . .	348
10.6.3	Organische Supraleiter . . . . .	349
10.6.4	Hochtemperatursupraleiter . . . . .	351
<b>11.</b>	<b>Erzeugung tiefer Temperaturen . . . . .</b>	<b>359</b>
11.1	Verflüssigung von Gasen . . . . .	360
11.1.1	Kühlung mit Expansionsmaschinen . . . . .	361
11.1.2	Joule-Thomson-Entspannung . . . . .	368
11.2	Einfache Heliumkryostate . . . . .	370
11.2.1	Badkryostat . . . . .	370
11.2.2	Verdampferkryostate . . . . .	373

11.3 Verdünnungskryostat . . . . .	377
11.3.1 Kühlmechanismus . . . . .	377
11.3.2 Prinzipieller Aufbau eines Verdünnungskryostaten . . . . .	378
11.3.3 Problem des Wärmewiderstands . . . . .	380
11.3.4 Kühlleistung . . . . .	384
11.4 Pomeranchuk-Kühlung . . . . .	387
11.4.1 Kühlung durch Verfestigung von $^3\text{He}$ . . . . .	387
11.4.2 Technische Realisierung . . . . .	388
11.4.3 Kühlleistung . . . . .	390
11.5 Adiabatische Entmagnetisierung . . . . .	390
11.5.1 Kühlmechanismus . . . . .	391
11.5.2 Kühlkapazität und Endtemperatur . . . . .	393
11.5.3 Elektronenspin – Paramagnetische Salze . . . . .	394
11.6 Kühlung durch Kernentmagnetisierung . . . . .	396
11.6.1 Elektron-Kern-Kopplung . . . . .	396
11.6.2 Einfluß von Wärmeeinträgen . . . . .	398
11.6.3 Wärmelecks . . . . .	398
11.6.4 Technische Realisierung . . . . .	404
<b>12. Thermometrie . . . . .</b>	<b>411</b>
12.1 Primärthermometer . . . . .	412
12.1.1 Gasthermometer . . . . .	412
12.1.2 Dampfdruckthermometer . . . . .	413
12.1.3 $^3\text{He}$ -Schmelzkurventhermometer . . . . .	414
12.1.4 Rauschthermometer . . . . .	416
12.1.5 Supraleiter-Fixpunkt-Thermometer . . . . .	417
12.1.6 Kernorientierungsthermometer . . . . .	419
12.1.7 Mössbauer-Effekt-Thermometer . . . . .	423
12.1.8 Osmotischer Druck von $^3\text{He}$ in $^4\text{He}$ . . . . .	423
12.2 Sekundärthermometer . . . . .	423
12.2.1 Widerstandsthermometer . . . . .	424
12.2.2 Thermoelemente . . . . .	433
12.2.3 Kapazitätsthermometer . . . . .	435
12.2.4 Magnetisierungsthermometer . . . . .	435
12.2.5 Kernspinresonanzthermometer . . . . .	439
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>445</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>459</b>