

## Inhaltsverzeichnis

**Vorwort zur 1. Auflage** *vii*

**Vorwort zur 8. Auflage** *ix*

**Einleitung** *1*

<b>1</b>	<b>Grundlegende Eigenschaften von Supraleitern</b>	<b>11</b>
1.1	Das Verschwinden des elektrischen Widerstands	11
1.1.1	Grundlegendes zum Widerstand von Metallen	11
1.1.2	Dauerströme im Supraleiter	16
1.2	Idealer Diamagnetismus, Flussschläuche und Flussquantisierung	20
1.2.1	Der ideale Leiter	21
1.2.2	Der ideale Diamagnetismus	21
1.2.3	Typ-I- und Typ-II-Supraleiter; Flussschläuche	22
1.2.4	Levitation in der Shubnikov-Phase	28
1.3	Die Flussquantisierung in supraleitenden Ringen und Hohlzylindern	29
1.4	Supraleitung: ein makroskopisches Quantenphänomen	32
1.4.1	Fluxoid- und Flussquantisierung	33
1.4.2	Der ideale Diamagnetismus	35
1.4.3	Warum gibt es Typ-I- und Typ-II-Supraleiter?	40
1.4.4	Widerstand null	41
1.5	Quanteninterferenzen	45
1.5.1	Allgemeines zu Interferenzen	46
1.5.2	Josephson-Ströme und die Josephson-Gleichungen	47
1.5.3	Zeitliche Quanteninterferenz: Beobachtung des Josephson-Wechselstroms	55
1.5.4	Räumliche Quanteninterferenzen im Magnetfeld	58
1.5.4.1	Der supraleitende Quanteninterferenzdetektor	58
1.5.4.2	Quanteninterferenz im Josephson-Kontakt	63
	Zusammenfassung	70

<b>2</b>	<b>Supraleitende Elemente, Legierungen und Verbindungen</b>	<b>73</b>
2.1	Vorbemerkungen	73
2.1.1	Entdeckung, Herstellung und Charakterisierung von neuen Supraleitern	73
2.1.2	Konventionelle und unkonventionelle Supraleiter	74
2.2	Supraleitende Elemente	77
2.3	Die supraleitenden Hydride	81
2.4	Supraleitende Legierungen und metallische Verbindungen	84
2.4.1	Die $\beta$ -Wolframstruktur	84
2.4.2	Magnesiumdiborid	86
2.5	Fulleride	87
2.6	Chevrel-Phasen und Borkarbide	88
2.7	Schwere-Fermionen-Supraleiter	90
2.8	Natürliche und künstliche Schichtsupraleiter	93
2.9	Die supraleitenden Oxide	95
2.9.1	Kuprate	95
2.9.2	Wismutate, Ruthenate, Nickelate und andere oxidische Supraleiter	100
2.10	Eisenpniktide und verwandte Verbindungen	102
2.11	Organische Supraleiter	105
2.12	Supraleitung an Grenzflächen	107
2.13	Graphenbasierte Supraleitung	109
	Zusammenfassung	112
<b>3</b>	<b>Die Cooper-Paarung</b>	<b>115</b>
3.1	Konventionelle Supraleitung	115
3.1.1	Cooper-Paarung durch die Elektron-Phonon Wechselwirkung	115
3.1.2	Der supraleitende Zustand, Quasiteilchen und die BCS-Theorie	120
3.1.3	Experimente zur unmittelbaren Bestätigung der Grundvorstellungen über den supraleitenden Zustand	125
3.1.3.1	Der Isotopeneffekt	125
3.1.3.2	Die Energielücke	128
3.1.3.3	Tunnelspektroskopie	140
3.1.4	Spezielle Eigenschaften der konventionellen Supraleiter	143
3.2	Unkonventionelle Supraleitung	152
3.2.1	Allgemeine Gesichtspunkte: Wie erkennt man (un)konventionelle Supraleiter?	153
3.2.2	Kupratsupraleiter	159
3.2.2.1	Einleitende Betrachtungen	159
3.2.2.2	Amplitudensensitive Experimente zur Symmetrie des Ordnungsparameters	162
3.2.2.3	Phasensensitive Experimente zur Symmetrie des Ordnungsparameters	166
3.2.3	Schwere Fermionen, Ruthenate und andere unkonventionelle Supraleiter	175

- 3.2.4 FFLO-Zustand und Mehrbandsupraleitung 179
- Zusammenfassung 182

#### **4 Thermodynamik und thermische Eigenschaften des supraleitenden Zustands 187**

- 4.1 Allgemeine Vorbemerkungen zur Thermodynamik 187
- 4.2 Die spezifische Wärme 191
- 4.3 Die Wärmeleitfähigkeit 195
- 4.4 Grundzüge der Ginzburg-Landau-Theorie 198
- 4.5 Die charakteristischen Längen der Ginzburg-Landau-Theorie 202
- 4.6 Typ-I-Supraleiter im Magnetfeld 208
- 4.6.1 Das kritische Feld und die Magnetisierung stabförmiger Proben 208
- 4.6.1.1 Magnetisierungskurven 208
- 4.6.1.2 Gibbs-Funktion und kritisches Magnetfeld 210
- 4.6.2 Die Thermodynamik des Meißner-Zustands 212
- 4.6.2.1 Differenz der Entropien im Normal- und Suprazustand 212
- 4.6.2.2 Differenz der spezifischen Wärmen im Normal- und Suprazustand 214
- 4.6.3 Kritisches Magnetfeld dünner Schichten in einem Feld parallel zur Oberfläche 216
- 4.6.4 Der Zwischenzustand 217
- 4.6.5 Die Phasengrenzenergie 222
- 4.6.6 Der Einfluss von Druck auf den supraleitenden Zustand 225
- 4.7 Typ-II-Supraleiter im Magnetfeld 229
- 4.7.1 Vorbemerkungen 230
- 4.7.2 Magnetisierungskurven und kritische Felder 231
- 4.7.3 Die Shubnikov-Phase 242
- 4.8 Fluktuationen und Zustände außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichts 253
- Zusammenfassung 263

#### **5 Kritische Ströme in Supraleitern erster und zweiter Art 267**

- 5.1 Die Begrenzung des Suprastroms durch Paarbrechung 268
- 5.2 Typ-I-Supraleiter 270
- 5.3 Typ-II-Supraleiter 275
- 5.3.1 Ideale Typ-II-Supraleiter 276
- 5.3.2 Harte Supraleiter 280
- 5.3.2.1 Die Verankerung von Flussschläuchen 280
- 5.3.2.2 Die Magnetisierungskurven von harten Supraleitern 286
- Zustandekommen der Hysterese: Bean-Modell 291
- Flusskriechen 294
- 5.3.2.3 Kritische Ströme und Strom-Spannungs-Kennlinien 295
- Zusammenfassung 302

<b>6</b>	<b>Josephson-Kontakte und ihre Eigenschaften</b>	<b>305</b>
6.1	Stromtransport über Grenzflächen im Supraleiter	305
6.1.1	Supraleiter-Isolator-Grenzflächen	305
6.1.2	Supraleiter-Normalleiter-Grenzflächen	312
6.1.3	Supraleiter-Ferromagnet-Grenzflächen	319
6.2	Das RCSJ-Modell	320
6.3	Josephson-Kontakte unter Mikrowelleneinstrahlung	327
6.4	Flusswirbel in ausgedehnten Josephson-Kontakten	330
6.4.1	Sinus-Gordon-Gleichung	330
6.4.2	Plasmawellen und Fluxonen	332
6.4.3	Fiske-Stufen	334
6.4.4	Nullfeldstufen	336
6.4.5	Flux-Flow-Stufen	340
6.5	Makroskopische Quanteneffekte in Josephson-Kontakten und verwandten Systemen	342
6.5.1	Coulomb-Blockade und Tunneln einzelner Ladungen	342
6.5.2	Makroskopische Quantenkohärenz mit Josephson-Kontakten	348
6.5.3	Schaltkreis-Quantenelektrodynamik	352
	Zusammenfassung	355
<b>7</b>	<b>Anwendungen der Supraleitung</b>	<b>359</b>
7.1	Supraleitende Magnetspulen	361
7.1.1	Allgemeine Aspekte	361
7.1.2	Supraleitende Drähte, Bänder und Kabel	362
7.1.3	Spulenschutz	373
7.2	Supraleitende Permanentmagnete	375
7.3	Anwendungen für supraleitende Magnetspulen	377
7.3.1	Kernspinresonanz	377
7.3.2	Kernspintomographie	380
7.3.3	Teilchenbeschleuniger	381
7.3.4	Kernfusion	384
7.3.5	Energiespeicher	385
7.3.6	Motoren und Generatoren	388
7.3.7	Magnetische Separatoren und Induktionsheizer	391
7.3.8	Schwebezüge	393
7.4	Supraleiter für die Leistungsübertragung: Kabel, Transformatoren und Strombegrenzer	394
7.4.1	Supraleitende Kabel	394
7.4.2	Transformatoren	397
7.4.3	Strombegrenzer	398
7.5	Supraleitende Resonatoren und Filter	399
7.5.1	Das Hochfrequenzverhalten von Supraleitern	399
7.5.2	Resonatoren für Teilchenbeschleuniger	404

7.5.3	Resonatoren und Filter für die Kommunikationstechnik	405
7.6	Supraleiter als Detektoren	410
7.6.1	Empfindlichkeit, thermisches Rauschen und Störeinflüsse	411
7.6.2	Inkohärente Strahlungs- und Teilchendetektion: Bolometer und Kalorimeter	412
7.6.3	Kohärente Strahlungsdetektion und -erzeugung: Mischer, Lokaloszillatoren und integrierte Empfänger	418
7.6.4	Quanteninterferometer als Magnetfeldsensoren	426
7.6.4.1	SQUID-Magnetometer: grundlegende Konzepte	426
7.6.4.2	Störsignale, Gradiometer und Abschirmungen	436
7.6.4.3	Anwendungen von SQUIDs	438
7.7	Supraleiter in der Mikroelektronik	444
7.7.1	Spannungsstandards	444
7.7.2	Digitalelektronik mit Josephson-Kontakten	447
7.7.3	Auf dem Weg zum Quantencomputer	452
	Zusammenfassung	459

Stichwortverzeichnis	465
----------------------	-----