

*Werner Buckel, Reinhold Kleiner*

# **Supraleitung**

Grundlagen und Anwendungen

6., vollständig überarbeitete  
und erweiterte Auflage



WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

## Inhaltsverzeichnis

### Einleitung 1

<b>1</b>	<b>Grundlegende Eigenschaften von Supraleitern</b>	<b>11</b>
1.1	Das Verschwinden des elektrischen Widerstandes	11
1.2	Idealer Diamagnetismus, Flussschläuche und Flussquantisierung	22
1.3	Die Flussquantisierung im supraleitenden Ring	29
1.4	Supraleitung: ein makroskopisches Quantenphänomen	32
1.5	Quanteninterferenzen	46
1.5.1	Josephsonströme	47
1.5.2	Quanteninterferenzen im Magnetfeld	60
	Literatur	73
<b>2</b>	<b>Supraleitende Elemente, Legierungen und Verbindungen</b>	<b>75</b>
2.1	Vorbemerkung: Konventionelle und unkonventionelle Supraleiter	75
2.2	Supraleitende Elemente	78
2.3	Supraleitende Legierungen und metallische Verbindungen	83
2.3.1	Die $\beta$ -Wolfram-Struktur	83
2.3.2	Magnesium-Diborid	86
2.3.3	Metall-Wasserstoff-Systeme	87
2.4	Fulleride	88
2.5	Chevrel-Phasen und Borkarbide	89
2.6	Schwere-Fermionen-Supraleiter	92
2.7	Natürliche und künstliche Schichtsupraleiter	94
2.8	Die supraleitenden Oxide	97
2.8.1	Kuprate	97
2.8.2	Wismutate, Ruthenate und andere oxidische Supraleiter	103
2.9	Organische Supraleiter	104
2.10	Supraleiter durch Feldeffekt?	107
	Literatur	109
<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	123

3.1.3	Experimente zur unmittelbaren Bestätigung der Grundvorstellungen über den supraleitenden Zustand	128
3.1.3.1	Der Isotopeneffekt	129
3.1.3.2	Die Energielücke	132
	Absorption elektromagnetischer Strahlung	132
	Ultraschallabsorption	134
	Tunnelexperimente	135
3.1.4	Spezielle Eigenschaften der konventionellen Supraleiter	148
3.1.4.1	Der Einfluss von Gitterstörungen auf die konventionelle Cooper-Paarung	148
	Der Anisotropieeffekt	148
	Der Valenzeffekt	150
	Die Elektron-Phonon-Wechselwirkung	152
3.1.4.2	Der Einfluss paramagnetischer Ionen auf die konventionelle Cooper-Paarung	155
3.2	Unkonventionelle Supraleitung	161
3.2.1	Allgemeine Gesichtspunkte	161
3.2.2	Hochtemperatursupraleiter	167
3.2.3	Schwere Fermionen, Ruthenate und andere unkonventionelle Supraleiter	185
	Literatur	192
<b>4</b>	<b>Thermodynamik und thermische Eigenschaften des supraleitenden Zustandes</b>	<b>197</b>
4.1	Allgemeine Vorbemerkungen zur Thermodynamik	198
4.2	Die spezifische Wärme	202
4.3	Die Wärmeleitfähigkeit	205
4.4	Grundzüge der Ginzburg-Landau-Theorie	209
4.5	Die charakteristischen Längen der Ginzburg-Landau-Theorie	212
4.6	Typ-I-Supraleiter im Magnetfeld	218
4.6.1	Das kritische Feld und die Magnetisierung stabförmiger Proben	218
4.6.2	Die Thermodynamik des Meißner-Zustandes	223
4.6.3	Kritisches Magnetfeld dünner Schichten in einem Feld parallel zur Oberfläche	227
4.6.4	Der Zwischenzustand	228
4.6.5	Die Phasengrenzenergie	233
4.6.6	Der Einfluss von Druck auf den supraleitenden Zustand	236
4.7	Typ-II-Supraleiter im Magnetfeld	241
4.7.1	Magnetisierungskurve und kritische Felder	243
4.7.2	Die Shubnikov-Phase	254
4.8	Fluktuationen oberhalb der Sprungtemperatur	265
4.9	Zustände außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichts	270
	Literatur	275

<b>5</b>	<b>Kritische Ströme in Supraleitern 1. und 2. Art</b>	<b>281</b>
5.1	Die Begrenzung des Suprastroms durch Paarbrechung	281
5.2	Typ-I-Supraleiter	283
5.3	Typ-II-Supraleiter	289
5.3.1	Ideale Typ-II-Supraleiter	290
5.3.2	Harte Supraleiter	294
5.3.2.1	Die Verankerung von Flussschläuchen	295
5.3.2.2	Die Magnetisierungskurve von harten Supraleitern	299
5.3.2.3	Kritische Ströme und Strom-Spannungs-Kennlinien	309
	Literatur	317
<b>6</b>	<b>Josephsonkontakte und ihre Eigenschaften</b>	<b>319</b>
6.1	Stromtransport über Grenzflächen im Supraleiter	319
6.1.1	Supraleiter-Isolator-Grenzflächen	319
6.1.2	Supraleiter-Normalleiter-Grenzflächen	326
6.2	Das RCSJ-Modell	334
6.3	Josephsonkontakte unter Mikrowelleneinstrahlung	340
6.4	Flusswirbel in ausgedehnten Josephsonkontakten	343
6.5	Quanteneigenschaften von supraleitenden Tunnelkontakten	355
6.5.1	Coulomb-Blockade und Tunneln einzelner Ladungen	355
6.5.2	Flussquanten und makroskopische Quantenkohärenz	361
	Literatur	364
<b>7</b>	<b>Anwendungen der Supraleitung</b>	<b>367</b>
7.1	Supraleitende Magnetspulen	369
7.1.1	Allgemeine Aspekte	369
7.1.2	Supraleitende Kabel und Bänder	370
7.1.3	Spulenschutz	379
7.2	Supraleitende Permanentmagnete	381
7.3	Anwendungen für supraleitende Magnetspulen	384
7.3.1	Kernspinresonanz	384
7.3.2	Kernspintomographie	388
7.3.3	Teilchenbeschleuniger	389
7.3.4	Kernfusion	391
7.3.5	Energiespeicher	393
7.3.6	Motoren und Generatoren	395
7.3.7	Magnetische Separation	396
7.3.8	Schwebezüge	396
7.4	Supraleiter für die Leistungsübertragung: Kabel, Transformatoren und Strombegrenzer	397
7.4.1	Supraleitende Kabel	398
7.4.2	Transformatoren	400
7.4.3	Strombegrenzer	401

#### **XIV** | *Inhaltsverzeichnis*

7.5	Supraleitende Resonatoren und Filter	402
7.5.1	Das Hochfrequenzverhalten von Supraleitern	402
7.5.2	Resonatoren für Teilchenbeschleuniger	407
7.5.3	Resonatoren und Filter für die Kommunikationstechnik	410
7.6	Supraleiter als Detektoren	414
7.6.1	Empfindlichkeit, thermisches Rauschen und Störeinflüsse	415
7.6.2	Inkohärente Strahlungs- und Teilchendetektion: Bolometer und Kalorimeter	416
7.6.3	Kohärente Strahlungsdetektion und -erzeugung: Mischer, Lokaloszillatoren und integrierte Empfänger	420
7.6.4	Quanteninterferometer als Magnetfeldsensoren	427
7.6.4.1	SQUID-Magnetometer: Grundlegende Konzepte	428
7.6.4.2	Störsignale, Gradiometer und Abschirmungen	439
7.6.4.3	Anwendungen von SQUIDs	442
7.7	Supraleiter in der Mikroelektronik	446
7.7.1	Spannungsstandards	446
7.7.2	Digitalelektronik mit Josephsonkontakten	450
	Literatur	455

#### **Monographien und Stoffsammlungen** 461

#### **Ausblicke** 465

#### **Stichwortverzeichnis** 471