

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Kalibrierung</b>	<b>3</b>
3.1	Messverfahren . . . . .	3
3.2	Messergebnis . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes einer Stahlprobe</b>	<b>4</b>
4.1	Messverfahren . . . . .	4
4.2	Messergebnis . . . . .	5
4.3	Interpretation . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines FeSi-Halbleiters</b>	<b>8</b>
5.1	Messverfahren . . . . .	8
5.2	Messergebnis . . . . .	9
5.3	Auswertung und direkte Anpassung der Exponentialfunktion . . . . .	10
5.4	Arrheniusplot . . . . .	12
5.5	Interpretation . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines “Bi-2223 multifilament tapes”-Supraleiters</b>	<b>14</b>
6.1	Messverfahren . . . . .	14
6.2	Messergebnis . . . . .	15
6.3	Interpretation . . . . .	18
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>19</b>

# 1 Einleitung

Die in diesem Protokoll beschriebenen Experimente wurden am 10.05.2017 an der TU Wien im Rahmen des Praktikums Laborübungen III (134.126) von *Kassandra Kunz* und *Helmut Hörner* durchgeführt. Sie beschäftigen sich mit der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes einer Probe aus NBS-Stahl, einer FeSi-Halbleiterprobe und eines Hochtemperatursupraleiters.

Da zur vorhandenen Messausrüstung keine Daten zur Messgenauigkeit vorlagen, wurde auf eine Fehlerrechnung verzichtet.

## 2 Versuchsaufbau

Bei allen Experimenten wurde mit folgendem Versuchsaufbau gearbeitet:

- Der Windows-PC [WINPC] mit der in LabView programmierten Individualsoftware [LABVPRG] war über ein serielles Datenkabel mit der Lake Shore 370AC 16-Kanal Resistance Bridge [LS-370AC] verbunden. Der Anschluss erfolgte über einen USB/Serial Adapter, der in Windows XP als virtueller COM-Port [RS232-Schnittstelle] aufschien.
- Die Resistance-Bridge [LS-370AC] war über Oxfordstecker an Kanal 2 mit dem PT-100 Temperaturfühler des Messkopfs und an Kanal 1 mit den 4-Punkt-Widerstandsmesskontakten der Probe verbunden. Außerdem war sie am Lake Shore 3716L Low Resistance Scanner [LS-3716L] angeschlossen.
- Am Low Resistance Scanner [LS-3716L] wurde auf Kanal 1 der “Current Mode” fix eingestellt und auf Kanal 2 (zuständig für den PT-100 Temperaturfühler) ein Widerstandsmessbereich von  $200\ \Omega$  fix eingestellt. Diese Einstellungen blieben für alle Messungen unverändert.
- Der am Messstab [MSTAB] montierte Messkopf inkludiert einen PT100-Temperaturfühler, eine elektrische Heizspule und an seiner Unterseite 3 Dornen, die die thermische Koppelung zum Stickstoff gewährleisten sollen. Die elektrische Heizspule wurde über das Labornetzteil [DCCONST] gespeist. An der Unterseite befindet sich eine Verstellungsschraube, die das Fixieren der Proben ermöglichte.
- Der mit flüssigem Stickstoff gefüllte Dewar [AGIL2] (ein doppelwandiges evakuiertes Edelstahlgefäß, Höhe: 50 cm, Durchmesser: 18 cm) wurde unter dem am absenkbaaren Messstab [MSTAB] montierten Messkopf positioniert. Verschlussen wurde der Dewar zwischen den Messungen (bei hochgezogenem Messstab) mit einem Korkdeckel, während der Messung (bei angesenktem Messkopf) mit einem geschlitzten Styroporaufsatz.

## 3 Kalibrierung

### 3.1 Messverfahren

Im Messkopf wird der Widerstand einer Messprobe mit der 4-Punkt-Methode ermittelt, wobei zwischen den zwei äußeren Kontaktpunkten ein Strom aufgeprägt wird, und an zwei inneren Kontaktpunkten in gewissem Abstand  $d$  sehr hochohmig (und daher mit geringem Messfehler) der Spannungsabfall ermittelt wird. Aus diesem Spannungsabfall im Zusammenhang mit dem aufgeprägten Strom errechnet der Low Resistance Scanner [LS-3716L] automatisch den Widerstandswert.

Die Ermittlung des Abstandes  $d$  (Kalibrierung) wurde mit folgender Messmethode durchgeführt:

- Die Abmessungen einer stabförmigen Probe NBS 1460 Stahl mit quadratischem Querschnitt wurden mit einer Mikrometerschraube auf 0,005 mm genau bestimmt (Querschnittsseitenlänge  $a$ , und Gesamtprobenlänge  $l$ ).
- Die NBS Stahlprobe wurde danach in den Messkopf eingespannt, so dass alle vier Messkontakte auflagen.
- Am Low Resistance Scanner [LS-3716L] wurde auf Kanal 1 eine “Current Excitation” von 10 mA und ein Widerstandsmessbereich (“Resistance Range”) von 2 m $\Omega$  eingestellt.
- Der Widerstand bei Raumtemperatur wurde gemessen und dokumentiert.
- Der Low Resistance Scanner [LS-3716L] wurde auf Kanal 2 umgestellt. Die aktuelle Probertemperatur wurde abgelesen und dokumentiert.
- Der spezifische elektrische Widerstand  $\rho$  der Eichprobe bei der gemessenen Raumtemperatur wurde dem NBS-Datenblatt [Hust, Lankford 1984] entnommen.

Es gilt folgende makroskopische Beziehung zwischen dem spezifischen Widerstand  $\rho$ , der Querschnittsfläche  $A$ , dem inneren Kontaktabstand  $d$  und dem gemessenen Widerstand  $R$ :

$$\rho = \frac{A}{d} R \quad (1)$$

Setzt man für  $A = a \cdot a$  ein, und formt man um, so erhält man:

$$d = \frac{a^2}{\rho} R \quad (2)$$

Dies ist der gesuchte Kontaktabstand.

## 3.2 Messergebnis

Seitenlänge Querschnittsquadrat:	$a = 1,5852 \text{ mm}$
Probenlänge:	$l = 9,915 \text{ mm}$
Widerstand:	$R = 0,886 \text{ m}\Omega$
Messtemperatur:	$T = 304 \text{ K}$
spez. Widerstand gem. Datenblatt:	$\rho = 810 \text{ n}\Omega \text{ m}$
Kontaktabstand gem. Formel (2):	$d = 2,75 \text{ mm}$

## 4 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes einer Stahlprobe

### 4.1 Messverfahren

- Die NBS Stahlprobe blieb im Messkopf eingespannt.
- Die LabView-Software [LABVPRG] wurde gestartet. In den entsprechenden Feldern wurde als Messprobe "NBS-Stahl", als Kontaktabstand 2,75 mm, und als Querschnittsfläche der Wert  $A = a \cdot a = 2,521 \text{ mm}^2$  eingetragen.
- Am Low Resistance Scanner [LS-3716L] blieb auf Kanal eine "Current Excitation" von 10 mA und ein Widerstandsmessbereich ("Resistance Range") von 2 m $\Omega$  eingestellt.
- An der Heizsspule wurde mit dem Labornetzteil [DCCONST] eine Spannung von 10 V angelegt.
- Der Low Resistance Scanner [LS-3716L] wurde auf Kanal 2 umgestellt. Die aktuelle Proben­temperatur konnte so laufend abgelesen werden.
- Der Korkdeckel des Dewars wurde entfernt, und der Messstab [MSTAB] so weit abgesenkt, bis die Dornen des Messkopfs vollständig in das flüssige Helium eingetaucht waren.
- Der geschlitzte Styropordeckel wurde aufgesetzt.
- Das Absinken der Temperatur wurde beobachtet. Bei zu starker Verlangsamung der Temperaturänderung (Aufgrund von Verdampfungsverlusten sank der Stickstoffpegel langsam ab) wurde die Probe weiter abgesenkt.
- Bei Erreichen einer Proben­temperatur von ca. 85 K wurde der Messstab um ca. 20 cm angehoben, so dass sich der Messkopf nunmehr außerhalb des Stickstoffbads, aber noch innerhalb des Dewars befand.

- Mittels der LabView-Software [LABVPRG] wurde der automatische Messvorgang gestartet. Die sich ändernden Widerstandswerte bei langsam ansteigender Temperatur wurden automatisiert in eine Datei protokolliert.
- Bei ca. 230 K wurde die Messung beendet.
- Die Styroporabdeckung wurde entfernt, und der Messkopf mittels des Messstabes [MSTAB] zur Gänze aus dem Dewar herausgezogen. Der Dewar wurde mit dem Korkdeckel verschlossen.
- Die Heizspannung wurde am Labornetzteil [DCCONST] abgedreht, und der Messkopf vor Entfernen der Probe vorsichtig mit einem Heißluftföhn auf Raumtemperatur gebracht und mit Papiertüchern getrocknet.

## 4.2 Messergebnis

Tabelle 1 zeigt die ermittelten Messwerte. Der in der Tabelle 1 eingeklammert ausgewiesene Messpunkt wurde als ‐Ausreißer‐ ausgeschieden.

Die folgende Grafik zeigt die Messpunkte und die lineare Interpolation  $\rho(T) = \rho_0 + \alpha T$ .

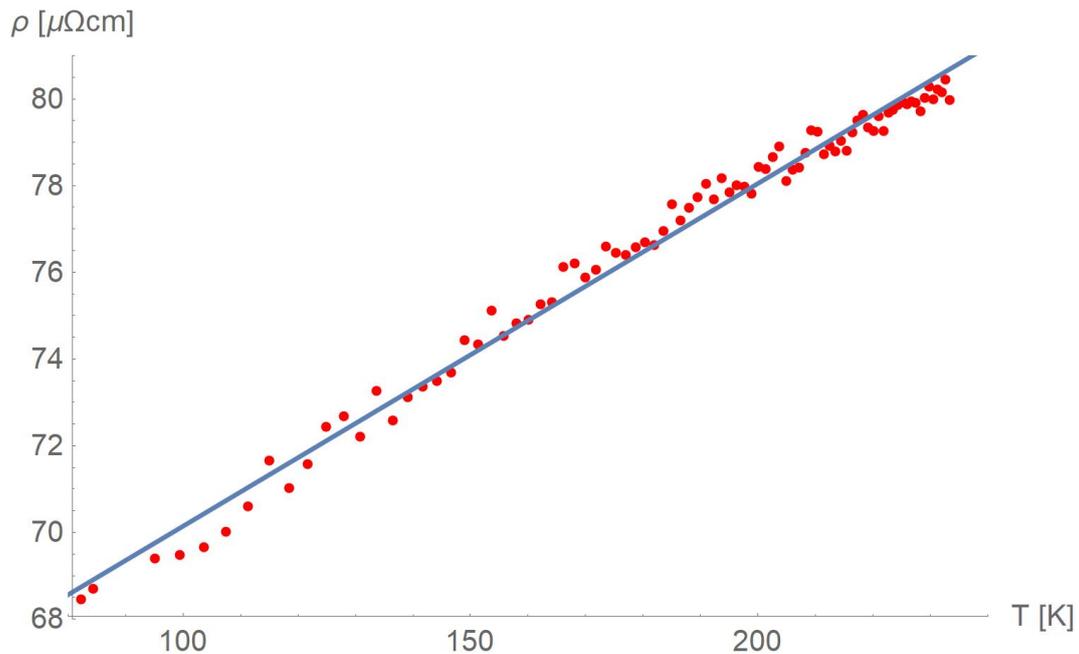


Abbildung 1: Spezifischer Widerstand von NBS-Stahl in Abhängigkeit von der Temperatur. Linearer Interpolation mit  $\rho = \rho_0 + \alpha T$ .

Temperatur	spez. Widerst.	Temperatur	spez. Widerst.	Temperatur	spez. Widerst.
$T [K]$	$\rho [\mu\Omega cm]$	$T [K]$	$\rho [\mu\Omega cm]$	$T [K]$	$\rho [\mu\Omega cm]$
82,2	68,46	168,1	76,20	209,3	79,28
84,3	68,70	170,0	75,88	210,4	79,24
(90,6)	(68,06)	171,8	76,06	211,4	78,72
95,1	69,40	173,6	76,60	212,5	78,92
99,4	69,49	175,3	76,46	213,5	78,79
103,6	69,67	177,0	76,40	214,4	79,03
107,5	70,02	178,7	76,59	215,4	78,81
111,3	70,60	180,4	76,69	216,4	79,23
115,0	71,67	182,0	76,64	217,3	79,50
118,4	71,02	183,5	76,96	218,3	79,64
121,7	71,58	185,1	77,57	219,2	79,34
124,9	72,45	186,6	77,19	220,1	79,26
127,9	72,68	188,0	77,48	221,0	79,60
130,8	72,21	189,5	77,74	221,9	79,25
133,7	73,26	190,9	78,05	222,7	79,68
136,4	72,58	192,3	77,69	223,5	79,75
139,1	73,12	193,7	78,17	224,4	79,87
141,7	73,37	195,0	77,84	225,2	79,93
144,2	73,49	196,3	78,00	226,0	79,87
146,6	73,68	197,6	77,98	226,7	79,94
149,0	74,44	198,9	77,82	227,5	79,91
151,3	74,35	200,2	78,44	228,3	79,72
153,6	75,12	201,4	78,38	229,1	80,03
155,8	74,54	202,6	78,66	229,8	80,29
158,0	74,82	203,7	78,91	230,6	80,00
160,1	74,91	204,9	78,11	231,3	80,22
162,1	75,26	206,0	78,37	232,0	80,16
164,2	75,31	207,2	78,41	232,7	80,44
166,1	76,12	208,3	78,76	233,4	79,97

Tabelle 1: Spezifischer Widerstand von NBS-Stahl in Abhängigkeit von der Temperatur.  
Der eingeklammerte Messpunkt wurde als "Ausreißer" ausgeschieden.

Die Werte für  $\rho_0$ ,  $\alpha^*$  und  $\kappa$  wurden in Mathematica 11.1.1 mittels des folgenden Befehls ermittelt:

```
FindFit[data,  $\rho_0 + \alpha^* T$ , { $\rho_0, \alpha^*$ }, T]
```

Damit ergeben sich folgende Werte:

$$\rho_0 = 62,24 \mu\Omega \text{ cm} \quad \alpha = 0,079 \mu\Omega \text{ cm/K}$$

Bei Berücksichtigung des Mott-Jones-Terms  $\kappa T^3$  im physikalischen Modell  $\rho(T) = \rho_0 + \alpha^* T + \kappa T^3$  ergibt sich folgende Interpolationskurve:

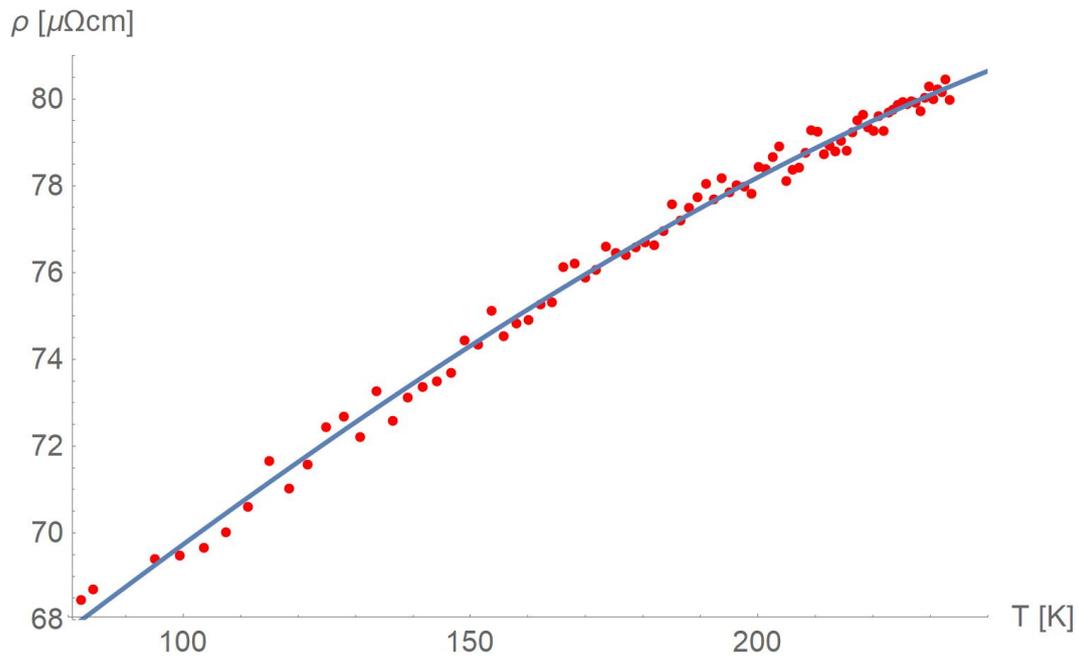


Abbildung 2: Spezifischer Widerstand von NBS-Stahl in Abhängigkeit von der Temperatur. Interpolation mit  $\rho(T) = \rho_0 + \alpha^* T + \kappa T^3$ .

Die Werte für  $\rho_0$ ,  $\alpha^*$  und  $\kappa$  wurden mit Mathematica 11.1.1 mittels des folgenden Befehls ermittelt:

```
FindFit[data,  $\rho_0 + \alpha^* T + \kappa T^3$ , { $\rho_0, \alpha^*, \kappa$ }, T]
```

Damit ergeben sich folgende Werte:

$$\rho_0 = 59,43 \mu\Omega \text{ cm} \quad \alpha^* = 0,106 \mu\Omega \text{ cm/K} \quad \kappa = -0,3087 \text{ p}\Omega \text{ cm/K}^3$$

### 4.3 Interpretation

- Der spezifische Widerstand steigt annähernd linear mit der Temperatur an (siehe Abbildung 1). Dies passt zum Modell, nach dem in Metallen der Widerstand einerseits temperaturunabhängig von der Streuung der Elektronen an Gitterfehlstellen, andererseits linear temperaturabhängig von der Streuung an thermisch angeregten Phononen abhängt.
- Bei Unterstellung des linearen Zusammenhanges ergibt sich eine Elektron-Phonon-Wechselwirkungskonstante von  $\alpha = 0,079 \mu\Omega \text{ cm/K}$
- Berücksichtigt man im physikalischen Modell zusätzlich eine Widerstandsabhängigkeit proportional zu  $T^3$  ("Mott-Jones-Term"), so ergibt sich eine noch bessere Übereinstimmung des Modells mit den Messwerten (siehe Abbildung 2).
- Die so ermittelte Elektron-Phonon-Wechselwirkungskonstante beträgt  $\alpha^* = 0,106 \mu\Omega \text{ cm/K}$
- $\alpha^*$  ist größer als  $\alpha$ , da die (nichtlineare) Verringerung der Steigung bei höheren Temperaturen im Mott-Jones-Term berücksichtigt wird, und der durch die Elektron-Phonon-Wechselwirkung verursachte lineare Anteil im Modell somit genauer abgebildet wird.
- Die absoluten gemessenen Werte stimmen innerhalb von 10 Prozent mit den Referenzwerten aus [Hust, Lankford 1984] überein.

## 5 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines FeSi-Halbleiters

### 5.1 Messverfahren

- Die Abmessungen einer quaderförmigen Probe eines FeSi-Halbleiters rechteckigem Querschnitt wurden mit einer Mikrometerschraube auf 0,005 mm genau bestimmt (Querschnittsseitenlängen  $a$  und  $b$ , und Gesamtprobenlänge  $l$ ).
- Die Probe wurde danach in den Messkopf eingespannt, so dass alle vier Messkontakte auflagen.
- Am Low Resistance Scanner [LS-3716L] wurde auf Kanal 1 eine "Current Excitation" von 10 mA und ein Widerstandsmessbereich ("Resistance Range") von  $2 \Omega$  eingestellt.
- Der Widerstand bei Raumtemperatur wurde gemessen und dokumentiert.
- Der Low Resistance Scanner [LS-3716L] wurde auf Kanal 2 umgestellt. Die aktuelle Probertemperatur wurde abgelesen und dokumentiert.

- In den entsprechenden Feldern der LabView-Software [LABVPRG] wurde als Messprobe “FeSi”, als Kontaktabstand 2,75 mm, und als Querschnittsfläche der Wert  $A = a \cdot b$  eingetragen.
- An der Heizspule wurde mit dem Labornetzteil [DCCONST] eine Spannung von 10 V angelegt.
- Der Low Resistance Scanner [LS-3716L] wurde auf Kanal 2 umgestellt. Die aktuelle Proben­temperatur konnte so laufend abgelesen werden.
- Der Korkdeckel des Dewars wurde entfernt, und der Messstab [MSTAB] so weit abgesenkt, bis die Dornen des Messkopfs vollständig in das flüssige Helium eingetaucht waren.
- Der geschlitzte Styropordeckel wurde aufgesetzt.
- Das Absinken der Temperatur wurde beobachtet. Bei zu starker Verlangsamung der Temperaturänderung (Aufgrund von Verdampfungsverlusten sank der Stickstoffpegel langsam ab) wurde die Probe weiter abgesenkt.
- Bei Unterschreiten einer Proben­temperatur von ca. 85 K wurde der Messstab um ca. 20 cm angehoben, so dass sich der Messkopf nunmehr außerhalb des Stickstoffbads, aber noch innerhalb des Dewars befand.
- Mittels der LabView-Software [LABVPRG] wurde der automatische Messvorgang gestartet. Die sich ändernden Widerstandswerte bei langsam ansteigender Temperatur wurden automatisiert in eine Datei protokolliert.
- Bei ca. 230 K wurde die Messung beendet.
- Die Styroporabdeckung wurde entfernt, und der Messkopf mittels des Messstabes [MSTAB] zur Gänze aus dem Dewar herausgezogen.
- Die Heizspannung wurde am Labornetzteil [DCCONST] abgedreht, und der Messkopf vor Entfernen der Probe vorsichtig mit einem Heißluftföhn auf Raumtemperatur gebracht und mit Papiertüchern getrocknet.

## 5.2 Messergebnis

Seitenlängen Querschnitt:  $a = 1,725 \text{ mm}, b = 1,25 \text{ mm}$

Querschnittsfläche:  $A = a \cdot b = 2,1563 \text{ mm}^2$

Probenlänge:  $l = 12,425 \text{ mm}$

Widerstand bei Raumtemp.:  $R = 0,37 \Omega$

Messtemperatur:  $T = 311 \text{ K}$

Die ermittelten Tieftemperaturmesswerte werden in Tabelle 2 dargestellt.

Im Temperaturbereich zwischen 150 K und 180 K ging der Low Resistance Scanner [LS-3716L] mehrfach in den Fehlermodus VMIX OVL bzw. VDIF OVL, was zu Fehlmessungen führte. Die entsprechenden Messpunkte wurden ausgeschieden und sind in Tabelle 2 eingeklammert.

Die Fehlmessungen sind möglicherweise darauf zurückzuführen, dass sich die Probe und der Messkopf bei Erwärmung ausdehnen, und dadurch Kontaktierungsprobleme entstanden.

### 5.3 Auswertung und direkte Anpassung der Exponentialfunktion

Die folgende Grafik zeigt die Messpunkte und die Interpolation  $\rho(T) = Ae^{a/T} + \rho_0$ .

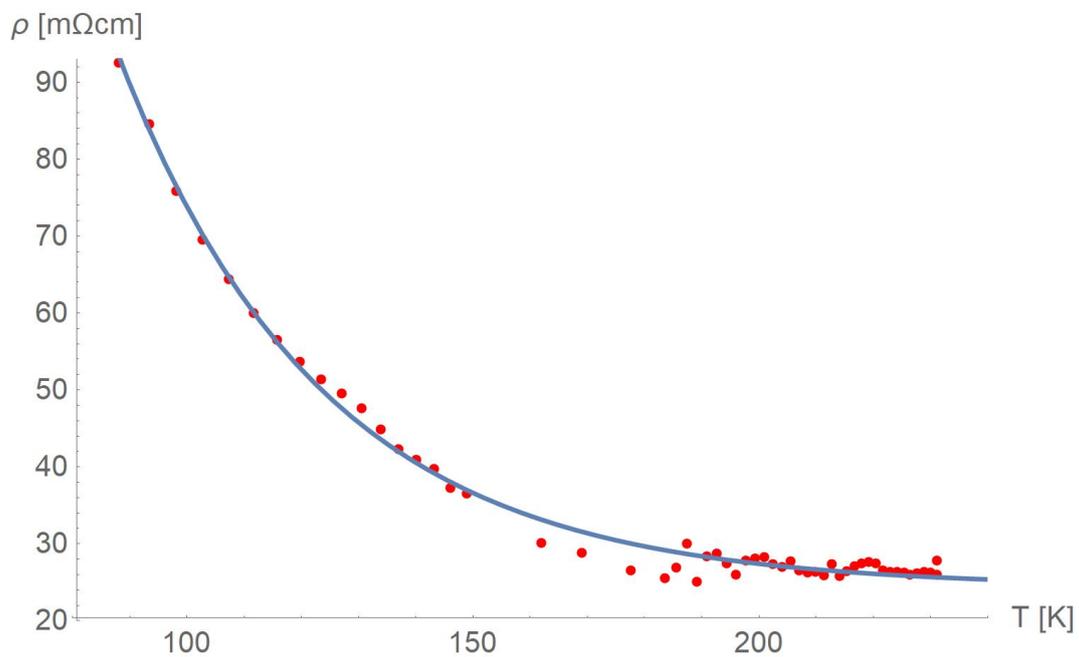


Abbildung 3: Spezifischer Widerstand eines FeSi-Halbleiters in Abhängigkeit von der Temperatur. Interpolation mit  $\rho(T) = Ae^{a/T} + \rho_0$ .

Temperatur	spez. Widerst.	Temperatur	spez. Widerst.	Temperatur	spez. Widerst.
$T$ [K]	$\rho$ [ $\mu\Omega cm$ ]	$T$ [K]	$\rho$ [ $\mu\Omega cm$ ]	$T$ [K]	$\rho$ [ $\mu\Omega cm$ ]
88,0	92,50	164,4	(18,47)	205,5	27,71
93,4	84,60	166,7	(22,79)	207,0	26,52
98,1	75,90	169,0	28,83	208,5	26,26
102,8	69,58	171,2	(14,08)	209,9	26,37
107,3	64,38	173,4	(22,73)	211,3	25,89
111,6	59,98	175,5	(21,30)	212,7	27,38
115,7	56,50	177,6	26,53	214,0	25,80
119,7	53,66	179,7	(25,17)	215,3	26,46
123,5	51,43	181,7	(15,15)	216,7	27,11
127,1	49,56	183,6	25,57	217,9	27,46
130,6	47,65	185,5	26,88	219,2	27,67
133,8	44,92	187,3	30,05	220,4	27,50
137,0	42,35	189,1	25,12	221,7	26,59
140,1	40,97	190,9	28,38	222,9	26,33
143,2	39,74	192,6	28,77	224,1	26,37
146,1	37,22	194,3	27,42	225,3	26,30
148,9	36,58	196,0	26,01	226,4	26,02
151,6	(22,41)	197,7	27,87	227,6	26,15
154,3	(10,95)	199,3	28,14	228,8	26,38
156,9	(16,55)	200,9	28,31	230,0	26,25
159,5	(11,78)	202,5	27,35	231,1	25,98
162,0	30,11	204,0	27,00	231,1	27,85

Tabelle 2: Spezifischer Widerstand eines FeSi-Halbleiters in Abhängigkeit von der Temperatur. Die eingeklammerte Messpunkte sind Fehlmessungen und wurden als "Ausreißer" ausgeschieden.

Die Werte für  $\rho_0$ ,  $A$  und  $E_g$  wurden in Mathematica 11.1.1 mittels des folgenden Befehls ermittelt:

```
NonlinearModelFit[data, A*Exp[a/T] + rho0, {{A, 28}, {a, 1}, {rho0, 1}}, T, Method->NMinimize]
```

Damit ergeben sich für die Anpassungsfunktion

$$\rho(T) = Ae^{a/T} + \rho_0 \quad (3)$$

die folgenden Parameter:

$$\boxed{\rho_0 = 5,00 \text{ m}\Omega \text{ cm}} \quad \boxed{A = 7,70 \text{ m}\Omega \text{ cm}} \quad \boxed{a = 217,0 \text{ K}}$$

Die tatsächliche Zielfunktion lautet jedoch

$$\rho(T) = Ae^{\frac{E_g}{2k_b T}} + \rho_0 \quad (4)$$

Somit berechnet sich  $E_g$  mit

$$E_g [J] = 2k_b a \quad (5)$$

beziehungsweise

$$E_g [eV] = \frac{2k_b a}{e} \quad (6)$$

wobei  $k_b$  die Boltzmannkonstante und  $e$  die Elementarladung darstellt.

Setzt man in Gleichung 6 ein, so erhält man

$$E_g [eV] = \frac{2 \cdot 1,38065 \cdot 10^{-23} \cdot 217,0}{1,60218 \cdot 10^{-19}} = \boxed{0,037 \text{ eV}} \quad (7)$$

## 5.4 Arrheniusplot

Logarithmiert man beide Seiten von Gleichung 3 und nimmt gleichzeitig an, dass  $\rho_0 = 0$  ist, so ergibt sich der Ausdruck:

$$\ln(\rho(T)) = \ln(Ae^{a/T}) \quad (8)$$

Daraus folgt:

$$\ln(\rho(T)) = \ln(A) + a \frac{1}{T} \quad (9)$$

Dies bedeutet: Skaliert man in einem Graph die Abszisse mit  $1/T$ , und die Ordinate mit  $\ln(\rho)$  ("Arrheniusplot"), dann ist zu erwarten, dass die Messpunkte einer Geraden

$$y = ax + d \quad (10)$$

folgen, mit  $x = 1/T$ ,  $y = \ln(\rho)$  und  $d = \ln(A)$ . Somit kann aus dieser Geradengleichung der Wert für  $a$  direkt abgelesen werden (woraus sich mit Gleichung 6 der Wert für  $E_g$  ergibt). Der Wert für  $A$  ergibt sich über den Zusammenhang

$$A = e^d \quad (11)$$

Abbildung 4 zeigt den Arrheniusplot für die Messpunkte aus Tabelle 2.

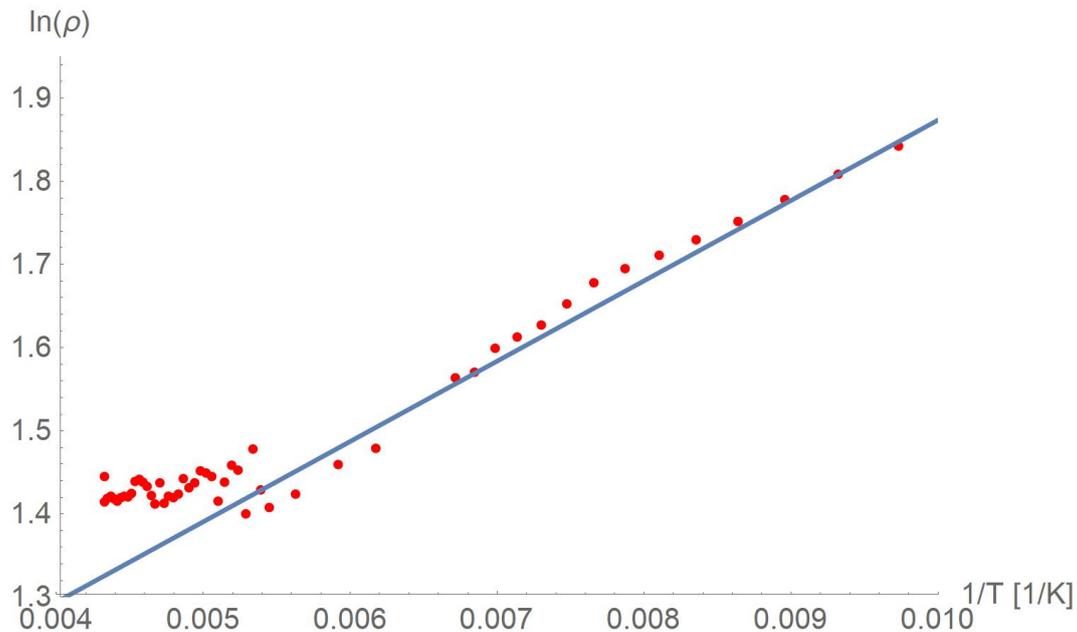


Abbildung 4: Arrheniusplot des FeSi-Halbleiters. Für die Interpolation  $y = ax + d$  (mit  $x := 1/T$ ) wurden Messwerte über  $T = 190$  K, die zu den links unten agglomerierten Messpunkten im Arrheniusplot führen, nicht berücksichtigt

Die Parameter  $a$  und  $d$  wurden in Mathematica 11.1.1 mittels des folgenden Befehls ermittelt:

```
FindFit[dataB, {a x + d}, {a, d}, x]
```

Damit erhält man:

$$\boxed{a = 96,6 \text{ K}} \quad \boxed{d = 0.90767}$$

Unter Verwendung von Gleichung 11 kann man den Parameter  $A$  berechnen:

$$A = e^{0.90767} = \boxed{2,48 \text{ m}\Omega \text{ cm}} \quad (12)$$

Einsetzen des Wertes von  $a$  in Gleichung 6 liefert schließlich eine Wert für die Energie der Energielücke:

$$E_g [\text{eV}] = \frac{2 \cdot 1,38065 \cdot 10^{-23} \cdot 96.6}{1,60218 \cdot 10^{-19}} = \boxed{0,017 \text{ eV}} \quad (13)$$

## 5.5 Interpretation

- Da in Halbleitern mit zunehmender Temperatur gemäß der Fermiverteilung mehr Elektronen mit der nötigen Energie zur Überwindung der Bandlücke existieren, wurde erwartet, dass der Widerstand mit steigender Temperatur in einem exponentiellen Zusammenhang abnimmt. Dies wurde bestätigt.
- Die ermittelten Werte der Bandlückenenergie sind ungefähr eine Zehnerpotenz kleiner als die erwarteten Werte.
- Die Unterschiede zwischen der durch direkte Kurvenanpassung ermittelten Bandlückenenergie und dem Wert aus dem Arrheniusgraphen dürfte damit zusammenhängen, dass in der Arrhenius-Methode  $\rho_0 = 0$  angenommen wurde.

## 6 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines “Bi-2223 multifilament tapes”-Supraleiters

### 6.1 Messverfahren

- Die Abmessungen eines flachbandförmigen  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ -Supraleiters wurden mit einer Mikrometerschraube auf 0,005 mm genau bestimmt (Dicke  $d$ , Breite  $b$ , und Gesamtprobenlänge  $l$ ).
- Die Probe wurde danach in den Messkopf eingespannt, so dass alle vier Messkontakte auflagen.
- Am Low Resistance Scanner [LS-3716L] wurde auf Kanal 1 eine “Current Excitation” von 31,6 mA und ein Widerstandsmessbereich (“Resistance Range”) von 20 m $\Omega$  eingestellt.
- Der Widerstand bei Raumtemperatur wurde gemessen und dokumentiert.
- Der Low Resistance Scanner [LS-3716L] wurde auf Kanal 2 umgestellt. Die aktuelle Probertemperatur wurde abgelesen und dokumentiert.
- In den entsprechenden Feldern der LabView-Software [LABVPRG] wurde als Messprobe “Bi2223”, als Kontaktabstand 2,75 mm, und als Querschnittsfläche der Wert  $A = a \cdot b$  eingetragen.

- An der Heizspule wurde mit dem Labornetzteil [DCCONST] eine Spannung von 5 V angelegt.
- Der Low Resistance Scanner [LS-3716L] wurde auf Kanal 2 umgestellt. Die aktuelle Proben­temperatur konnte so laufend abgelesen werden.
- Der Korkdeckel des Dewars wurde entfernt, und der Messstab [MSTAB] so weit abgesenkt, bis die Dornen des Messkopfs vollständig in das flüssige Helium eingetaucht waren.
- Der geschlitzte Styropordeckel wurde aufgesetzt.
- Das Absinken der Temperatur wurde beobachtet. Bei zu starker Verlangsamung der Temperaturänderung (Aufgrund von Verdampfungsverlusten sank der Stickstoffpegel langsam ab) wurde die Probe weiter abgesenkt.
- Bei Unterschreiten einer Proben­temperatur von ca. 85 K wurde der Messstab um ca. 20 cm angehoben, so dass sich der Messkopf nunmehr außerhalb des Stickstoffbads, aber noch innerhalb des Dewars befand.
- Mittels der LabView-Software [LABVPRG] wurde der automatische Messvorgang gestartet. Die sich ändernden Widerstandswerte bei langsam ansteigender Temperatur wurden automatisiert in eine Datei protokolliert.
- Bei ca. 205 K wurde die Messung beendet.
- Die Styroporabdeckung wurde entfernt, und der Messkopf mittels des Messstabes [MSTAB] zur Gänze aus dem Dewar herausgezogen.
- Die Heizspannung wurde am Labornetzteil [DCCONST] abgedreht, und der Messkopf vor Entfernen der Probe vorsichtig mit einem Heißluftföhn auf Raumtemperatur gebracht und mit Papiertüchern getrocknet.

## 6.2 Messergebnis

Tabelle 3 zeigt die ermittelten Messwerte.

Dicke:	$d = 0,182 \text{ mm}$
Breite:	$b = 3,000 \text{ mm}$
Querschnittsfläche:	$A = d \cdot b = 0,546 \text{ mm}^2$
Probenlänge:	$l = 8,457 \text{ mm}$
Widerstand bei Raumtemp.:	$R_{raum} = 0,2 \text{ m}\Omega$
Messtemperatur:	$T = 309 \text{ K}$

Temperatur	spez. Widerst.	Temperatur	spez. Widerst.	Temperatur	spez. Widerst.
$T [K]$	$\rho [\mu\Omega cm]$	$T [K]$	$\rho [\mu\Omega cm]$	$T [K]$	$\rho [\mu\Omega cm]$
90,5	0,10	148,6	1,94	181,0	2,30
93,8	0,11	149,7	1,82	181,8	2,32
96,7	0,04	150,8	1,97	182,6	2,37
99,5	0,02	151,9	1,94	183,4	2,40
102,1	0,00	152,9	1,87	184,2	2,42
104,6	0,08	154,0	1,96	184,9	2,37
106,9	0,03	155,0	2,05	185,7	2,36
109,1	0,05	156,0	2,04	186,5	2,44
111,1	0,26	157,0	1,98	187,3	2,42
113,1	1,31	158,0	1,97	188,1	2,46
114,9	1,49	159,0	2,00	188,9	2,40
116,7	1,47	160,0	2,01	189,6	2,46
118,5	1,45	161,0	2,07	190,4	2,39
120,1	1,39	161,9	2,08	191,1	2,59
121,7	1,41	162,9	2,11	191,9	2,45
123,2	1,41	163,8	2,09	192,8	2,44
124,7	1,57	164,8	2,16	193,6	2,44
126,2	1,60	165,7	2,16	194,5	2,47
127,7	1,58	166,6	2,14	195,3	2,56
129,1	1,69	167,5	2,13	196,2	2,62
130,4	1,66	168,4	2,14	197,0	2,63
131,7	1,63	169,3	2,19	197,8	2,62
133,1	1,59	170,2	2,25	198,6	2,63
134,4	1,69	171,1	2,21	199,4	2,58
135,6	1,70	172,0	2,24	200,2	2,61
136,9	1,69	172,9	2,17	201,0	2,57
138,1	1,76	173,7	2,34	201,7	2,61
139,4	1,80	174,6	2,21	202,5	2,73
140,5	1,81	175,4	2,21	203,2	2,74
141,7	1,78	176,2	2,33	204,0	2,68
142,9	1,71	177,1	2,28	204,7	2,66
144,1	1,74	177,9	2,26	205,5	2,72
145,2	1,81	178,7	2,28	206,2	2,67
146,3	1,76	179,4	2,32	207,0	2,70
147,5	1,87	180,2	2,35	207,7	2,74

Tabelle 3: Spezifischer Widerstand eines  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$  - Supraleiters in Abhängigkeit von der Temperatur.

Die folgende Abbildung 3 zeigt die Messpunkte aus Tabelle 3 und dazu eine passende in zwei Teilbereiche gestückelte lineare Interpolation (eine Interpolationsgerade für den Sprungbereich, und eine weitere für Messwerte oberhalb der Sprungtemperatur).

Die Interpolationsgerade oberhalb der Sprungtemperatur wurde an die Messwerte oberhalb 113 K angepasst. Die zweite Interpolationsgerade im Sprungbereich wurde an die Messwerte für 109,1 K, 111,1 K und dem Wert der ersten Interpolationsgeraden bei 113,1 K angepasst. Die Anpassung erfolgte dabei, wie in den Vorkapiteln bereits beschrieben, mittels des `FindFit[]`-Befehls von Mathematica 11.1.1.

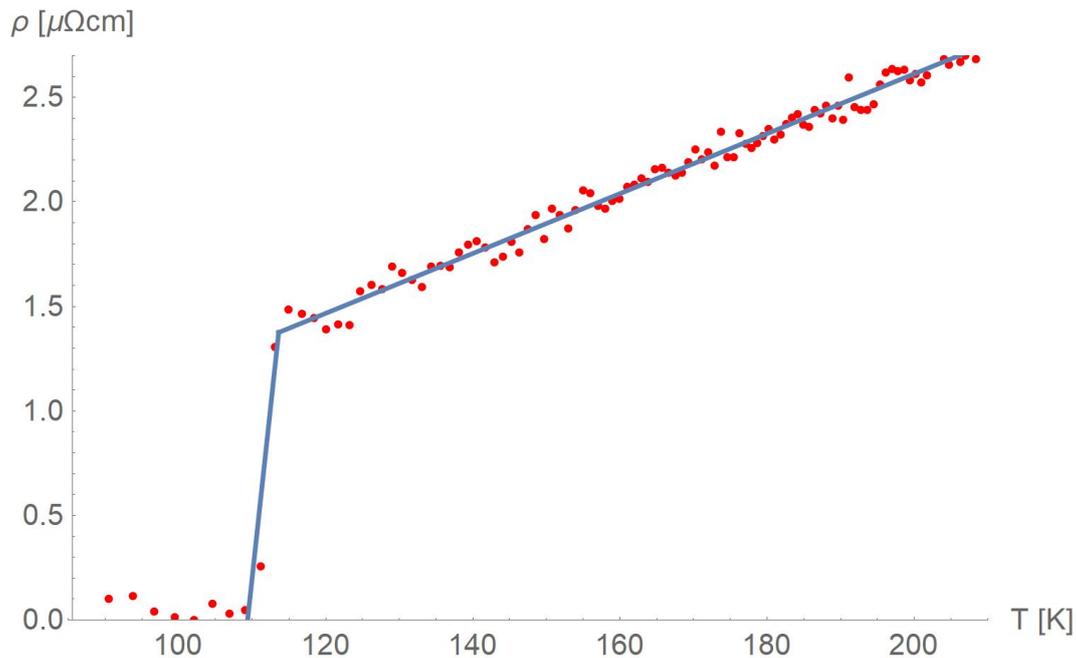


Abbildung 5: Spezifischer Widerstand eines  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$  - Supraleiters in Abhängigkeit von der Temperatur mit gestückelter linearer Interpolation im Sprungbereich und oberhalb der Sprungtemperatur.

Die Gleichung der Interpolationsgerade oberhalb der Sprungtemperatur lautet:

$$\rho [\mu\Omega cm] = 0.01432 \cdot T - 0.251 \quad (14)$$

Die Gleichung der Interpolationsgerade im Sprungbereich lautet:

$$\rho [\mu\Omega cm] = 0.325 \cdot T - 35.6 \quad (15)$$

Gerade (15) schneidet die Abszisse bei  $T_1 = 109,37 \text{ K}$  und schließt an die Interpolationsgerade (14) bei  $T_2 = 113,6 \text{ K}$  an. Die Sprungtemperatur  $T_c$  wird genau zwischen diesen Werten angenommen:

$$T_c = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{2} = 109,37 + \frac{113,6 - 109,37}{2} = \boxed{111,49 \text{ K}} \quad (16)$$

Der spezifische Sprungwiderstand  $\rho_c$  ergibt sich damit gem. Gleichung (15) mit

$$\rho_c [\mu\Omega\text{cm}] = 0.325 \cdot 111,49 - 35.6 = 0,634 \mu\Omega \text{ cm} \quad (17)$$

Der spezifische Widerstand bei  $T = 300 \text{ K}$  ermittelt sich durch Einsetzen in Gleichung (14):

$$\rho_{300} [\mu\Omega\text{cm}] = 0.01432 \cdot 300 - 0.251 = 4,045 \mu\Omega \text{ cm} \quad (18)$$

Daraus lässt sich die Residual-Resistivity-Ratio  $RRR$  bestimmen:

$$RRR = \frac{\rho_{300}}{\rho_c} = \frac{4,045}{0,634} = \boxed{6,4} \quad (19)$$

### 6.3 Interpretation

- Die Sprungtemperatur konnte im erwarteten Bereich festgestellt werden.
- Die Größe der Residual-Resistivity-Ratio  $RRR$  ist ein Hinweis auf die Leitfähigkeit bei tiefen Temperaturen. Für Supraleiter sind Werte in der Größenordnung von über 200 üblich. Der ermittelte Wert ist daher ungewöhnlich und müsste überprüft werden.

## 7 Anhang

### Verwendetes Equipment

[AGIL2]	Air Liquide 2 Liter ES-Dewar "AGIL 2", gefüllt mit mit flüssigem Stickstoff
[MSTAB]	Messtab aus nichtrostendem Stahl samt Messkopf mit PT100 Fühler und Heizspule
[DCCONST]	Siemens Labornetzteil "DC-Constanter"
[LS-370AC]	Lake Shore 370 AC Resistance Bridge
[LS-3716L]	Lake Shore 3716L Low Resistance Scanner
[WINPC]	Standard Industrie-PC; OS: Windows XP
[LABVPRG]	Individualsoftware zur Messdatenerfassung, geschrieben in LabView

### Tabellenverzeichnis

1	Spezifischer Widerstand von NBS-Stahl in Abhängigkeit von der Temperatur. Der eingeklammerte Messpunkt wurde als "Ausreißer" ausgeschieden.	6
2	Spezifischer Widerstand eines FeSi-Halbleiters in Abhängigkeit von der Temperatur. Die eingeklammerte Messpunkte sind Fehlmessungen und wurden als "Ausreißer" ausgeschieden. . . . .	11
3	Spezifischer Widerstand eines $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ - Supraleiters in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	16

### Abbildungsverzeichnis

1	Spezifischer Widerstand von NBS-Stahl in Abhängigkeit von der Temperatur. Linearer Interpolation mit $\rho = \rho_0 + \alpha T$ . . . . .	5
2	Spezifischer Widerstand von NBS-Stahl in Abhängigkeit von der Temperatur. Interpolation mit $\rho(T) = \rho_0 + \alpha T + \kappa T^3$ . . . . .	7
3	Spezifischer Widerstand eines FeSi-Halbleiters in Abhängigkeit von der Temperatur. Interpolation mit $\rho(T) = Ae^{a/T} + \rho_0$ . . . . .	10
4	Arrheniusplot des FeSi-Halbleiters. Für die Interpolation $y = ax + d$ (mit $x := 1/T$ ) wurden Messwerte über $T = 190$ K, die zu den links unten agglomerierten Messpunkten im Arrheniusplot führen, nicht berücksichtigt	13
5	Spezifischer Widerstand eines $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ - Supraleiters in Abhängigkeit von der Temperatur mit gestückelter linearer Interpolation im Sprungbereich und oberhalb der Sprungtemperatur. . . . .	17

## Literatur

- [Hust, Lankford 1984] J. G. Hust und A. B. Lankford: National Bureau of Standards Certificate. Standard Reference Materials 1460, 1461, and 1462: Austenitic Stainless Steel Thermal Conductivity and Electrical Resistivity as a Function of Temperature from 2 to 1200K. Office of Standard Reference Materials, Washington, 1984.