

Konrad Kopitzki | Peter Herzog

Einführung in die Festkörperphysik

Konrad Kopitzki | Peter Herzog

Einführung in die Festkörperphysik

6., überarbeitete Auflage

Mit 275 Abbildungen

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Prof. Dr. rer. nat. Konrad Kopitzki

Geboren 1926 in Sterkrade. Studium an der Universität Bonn, Diplom und Promotion bei W. Riezler. Von 1952 bis 1958 Tätigkeit in einer Metallhütte. 1965 Habilitation an der Universität Bonn. Von 1965 bis 1969 Dozent an der Universität Kabul. Ab 1970 Professor am Institut für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn. 1991 verstorben.

Prof. Dr. rer. nat. Peter Herzog

Geboren 1942 in Prag. Studium der Physik an der Universität Bonn. Diplom und Promotion bei E. Bodenstedt. 1975 Postdoc am Clarendon Laboratory, Universität Oxford. 1981 Habilitation an der Universität Bonn. Seit 1987 Professor am Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn.

1. Auflage 1986
6. Auflage 2007
unveränderter Nachdruck 2009

Alle Rechte vorbehalten
© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007

Lektorat: Ulrich Sandten | Kerstin Hoffmann

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Druck und buchbinderische Verarbeitung: STRAUSS GMBH, Mörlenbach
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8351-0144-9

Vorwort

Eine Vorlesung über Festkörperphysik gehört heute an allen Universitäten und Technischen Hochschulen zu den Pflichtveranstaltungen für Physikstudenten nach Abschluß des Vordiploms. Der Umfang des Stoffangebots ist hierbei allerdings sehr unterschiedlich und hängt im allgemeinen von den Forschungsschwerpunkten an der jeweiligen Hochschule ab. Dieses Buch ist insbesondere für solche Studenten vorgesehen, die eine Beschäftigung mit der Festkörperphysik zwar nicht zum Schwerpunkt ihrer physikalischen Ausbildung machen wollen, jedoch mit den grundlegenden Gesetzmäßigkeiten und Betrachtungsweisen in der Festkörperphysik vertraut werden möchten. Die behandelten Themen werden in einer strengen und möglichst exakten Darstellungsweise angeboten.

Zum Verständnis des Buches werden neben einem physikalischen Grundwissen, wie es von einem Physikstudenten bis zum Vordiplom erworben wird, elementare Kenntnisse in der Atomphysik und der Quantenmechanik benötigt. Ergebnisse aus der Thermodynamik und Statistik, die in diesem Buch benutzt werden, werden kurz im Anhang erläutert. In allen Gleichungen wird grundsätzlich das internationale Maßsystem (SI) verwendet. Bei Längenangaben im atomaren Bereich mochte der Verfasser allerdings auf die praktische Einheit Ångström nicht verzichten.

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts und für viele wertvolle Hinweise danke ich recht herzlich meinen Institutskollegen Prof. Dr. P. Herzog und Dr. G. Mertler. Frau E. Bescy fertigte den größten Teil der Zeichnungen an, und Frau Chr. Weiss schrieb das Manuskript. Auch ihnen gilt mein Dank. Schließlich danke ich dem B. G. Teubner Verlag für die gute Zusammenarbeit.

Bonn, im Juli 1986

K.Kopitzki

Vorwort zur zweiten Auflage

Bei der vorliegenden zweiten Auflage des Buches wurde der Text der fünf Kapitel der ersten Auflage an mehreren Stellen ergänzt und erweitert. Dabei wurde dem Kapitel über die magnetischen Eigenschaften der Festkörper ein Abschnitt über Spingläser hinzugefügt. Außerdem wurden den einzelnen Kapiteln jeweils einige einfache Übungsaufgaben zugeordnet. Neu hinzugekommen sind Kapitel 6 über die Supraleitung und Kapitel 7 über Legierungen. Bei der Behandlung der mikroskopischen Theorie der Supraleitung wird ausführlich auf die Wechselwirkung zweier Leitungselektronen eingegangen. Die dort vorgenommenen Überlegungen ergänzen die Ausführungen in Kapitel 4 zur dielektrischen Funktion eines Festkörpers, indem hier auch die Wellenzahlabhängigkeit dieser Funktion erörtert wird. Im Abschnitt 7.3 über metastabile Legierungen wird u. a. die Struktur metallischer Gläser diskutiert.

Recht herzlich danke ich wiederum meinen Kollegen Prof. Dr. P. Herzog und Dr. G. Mertler

für die kritische Durchsicht des Manuskripts. Dem B.G. Teubner Verlag danke ich, daß er bei der Neuauflage bereitwillig sämtliche Änderungswünsche berücksichtigte.

Bonn, im August 1989

K. Kopitzki

Vorwort zur dritten Auflage

Nach dem viel zu frühen, im Juni 1991 plötzlich erfolgten Tod meines Kollegen Prof.Dr. Konrad Kopitzki, mit dem mich freundschaftliche Zusammenarbeit verband, habe ich die Betreuung seines Buches über Festkörperphysik übernommen. In der vorliegenden dritten Auflage wurden einige dem besseren Verständnis dienende Ergänzungen eingefügt sowie eine Reihe von kleinen Fehlern korrigiert.

Für kritische Diskussionen und Hinweise danke ich meinen Kollegen Prof.Dr. K. Maier, Bonn, und Prof.Dr. P. Seidel, Jena. Dem B.G. Teubner Verlag danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Bonn, im Dezember 1992

P. Herzog

Vorwort zur vierten Auflage

Die vierte Auflage des bewährten Buches von Konrad Kopitzki erscheint nun in \TeX gesetzt. Ich hoffe, daß sich bei dieser arbeitsaufwendigen Prozedur nicht zu viele Fehler eingeschlichen haben. Neben dem optisch veränderten Erscheinungsbild wurde der Text des Buches überarbeitet. Dabei wurden viele Korrekturen, Verbesserungen und Anpassungen an den heutigen Wissensstand vorgenommen. Dadurch hat sich der Umfang des Buches etwas erhöht.

Ich danke allen, die zur Fertigstellung dieser vierten Auflage beigetragen haben. Insbesondere gilt mein Dank den Kollegen Paul Seidel, Jena, Johann Kroha, Karl Maier und Bernard Metsch, Bonn, Günter Zech, Siegen und dem Studenten Carsten Volkmann, Ingolstadt. Sie alle haben durch Diskussionen, Kommentare und Verbesserungsvorschläge wichtige Beiträge zur neuen Auflage geleistet. Dem B.G. Teubner Verlag, insbesondere Herrn Dr. Peter Spuhler, danke ich für die gute Zusammenarbeit und die gezeigte Geduld.

Bonn, im März 2002

P. Herzog

Vorwort zur fünften Auflage

Nachdem die vierte Auflage eine freundliche Aufnahme im Studenten- und Kollegenkreis erfahren hat, erscheint die fünfte Auflage mit nur marginalen Korrekturen, für deren Vorschlag ich mich bei den Lesern bedanke.

Bonn, im Oktober 2004

P. Herzog

Vorwort zur sechsten Auflage

Für die neue Auflage sind auch die Bilder elektronisch eingebunden worden, was das Erscheinungsbild des Buches geringfügig verändert hat. Im Text sind eine große Zahl Korrekturen sowie einige Ergänzungen vorgenommen worden, für deren Anregung ich mich bei den Lesern herzlich bedanke. Ausdrücklich möchte ich mich bei den Studenten Ali Awada, Braunschweig, und Leonard Burtscher, Würzburg, und den Kollegen Helmut Wipf, Darmstadt, sowie ganz besonders Michael Hietschold, Chemnitz, für ihre Hilfe bedanken. Herrn Dr. Michael Lang danke ich für seine Hilfe beim Einbinden der Bilder, Herrn Ronan Nedelec für die guten Ratschläge bei der Arbeit. Dem B.G. Teubner Verlag, vertreten durch Frau Kerstin Hoffmann und Herrn Ulrich Sandten, gilt mein Dank für die fruchtbare Zusammenarbeit.

Bonn, im Juni 2007

P. Herzog

Inhalt

1	Der kristalline Zustand	13
1.1	Struktur idealer Kristalle	14
1.1.1	Raumgitter	14
1.1.2	Kristallstrukturen	19
1.1.3	Millersche Indizes	21
1.1.4	Reziprokes Gitter	24
1.1.5	Erste Brillouin-Zone	25
1.2	Kristalle als natürliche Beugungsgitter	28
1.2.1	Lauesche Gleichungen	29
1.2.2	Braggsche Reflexionsbedingung	32
1.2.3	Strukturfaktor	34
1.2.4	Debye-Waller-Faktor	38
1.2.5	Beugung von Materiewellen	40
1.3	Bindungsarten im Kristall	42
1.3.1	Ionenbindung	42
1.3.2	Kovalente Bindung	50
1.3.3	Metallische Bindung	51
1.3.4	Van-der-Waals-Bindung	51
1.3.5	Bindung über Wasserstoffbrücken	52
1.4	Fehlorderungen im Kristall	53
1.4.1	Leerstellen und Zwischengitteratome	53
1.4.2	Fremdatome in Kristallen	62
1.4.3	Farbzentren	64
1.4.4	Versetzungen	65
1.4.5	Kleinwinkelkorngrenzen und Stapelfehler	73
1.5	Untersuchung von Kristallstrukturen mit Röntgenstrahlen	74
1.5.1	Laue-Verfahren	74
1.5.2	Drehkristallverfahren	75
1.5.3	Debye-Scherrer-Verfahren	76

2	Dynamik des Kristallgitters	78
2.1	Gitterschwingungen	79
2.1.1	Eigenschwingungen von Kristallgittern mit einatomiger Basis	79
2.1.2	Phononen	84
2.1.3	Eigenschwingungen von Kristallgittern mit zweiatomiger Basis	86
2.2	Spezifische Wärme von Kristallen	90
2.2.1	Zustandsdichte im Phononenspektrum	91
2.2.2	Debyesches Näherungsverfahren	92
2.3	Anharmonische Effekte	96
2.3.1	Thermische Ausdehnung	98
2.3.2	Wärmeleitung in Isolatoren	100
2.4	Phononenspektroskopie	102
2.4.1	Inelastische Neutronenstreuung	103
2.4.2	Raman-Streuung	106
2.5	Aufgaben zu Kapitel 1 und 2	109
3	Elektronen im Festkörper	111
3.1	Modell des freien Elektronengases	112
3.1.1	Spezifische Wärme von Metallen	113
3.1.2	Wärmeleitung in Metallen	116
3.1.3	Glühemission von Elektronen aus Metallen	117
3.1.4	Metallische Bindung	120
3.2	Bändertheorie des Festkörpers	121
3.2.1	Bloch-Funktion	122
3.2.2	Näherung für quasigebundene Elektronen	127
3.2.3	Näherung für quasifreie Elektronen	132
3.2.4	Metalle, Halbmetalle, Isolatoren und Halbleiter	137
3.2.5	Fermi-Flächen von Metallen	139
3.3	Kristallelektronen in äußeren Kraftfeldern	142
3.3.1	Effektive Masse eines Kristallelektrons	146
3.3.2	Bewegung eines Kristallelektrons in einem elektrischen Feld; Defektelektronen	148
3.3.3	Bewegung eines Kristallelektrons im magnetischen Feld; Zyklotronfrequenz	151
3.3.4	Elektrische Leitfähigkeit von Metallen	154
3.3.5	Elektrische Leitung in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern; Hall-Effekt	164
3.4	Halbleiter	167

3.4.1	Eigenleitung	168
3.4.2	Störstellenleitung	171
3.4.3	<i>p-n</i> -Übergang	178
3.5	Experimentelle Methoden zur Untersuchung von Halbleitern	182
3.5.1	Hall-Effekt bei Halbleitern	182
3.5.2	Zyklotron-Resonanz bei Halbleitern	185
3.6	Quanten-Hall-Effekt	189
3.7	Aufgaben zu Kapitel 3	199
4	Dielektrische Eigenschaften der Festkörper	201
4.1	Zusammenhang zwischen Dielektrizitätskonstante und Polarisierbarkeit	202
4.1.1	Lokales elektrisches Feld	203
4.1.2	Clausius-Mossottische Gleichung	206
4.2	Elektrische Polarisierung und optische Eigenschaften von Isolatoren	207
4.2.1	Lorentzsches Oszillatormodell	207
4.2.2	Eigenschwingungen von Ionenkristallen	211
4.2.3	Optisches Verhalten von Ionenkristallen	215
4.2.4	Polaritonen	219
4.2.5	Orientierungspolarisation	220
4.3	Optische Eigenschaften von Metallen und Halbleitern	223
4.3.1	Plasmaschwingungen	225
4.3.2	Interbandübergänge	228
4.3.3	Exzitonen	229
4.4	Ferroelektrizität	231
4.4.1	Polarisationskatastrophe	234
4.4.2	Antiferroelektrizität	236
4.5	Experimentelle Methoden zur Bestimmung der dielektrischen Funktion	237
4.5.1	Kramers-Kronig-Relationen	237
4.5.2	Auswertung von optischen Reflexionsspektren	239
4.5.3	Energieverlust schneller Elektronen in einem Festkörper	240
4.6	Aufgaben zu Kapitel 4	243
5	Magnetische Eigenschaften der Festkörper	244
5.1	Para- und Diamagnetismus von Isolatoren	245
5.1.1	Langevinscher Para- und Diamagnetismus	246

5.1.2	Salze der seltenen Erden und der 3d-Elemente	250
5.2	Para- und Diamagnetismus von Metallen	252
5.3	Ferromagnetismus	255
5.3.1	Molekularfeldnäherung	259
5.3.2	Spinwellentheorie	266
5.3.3	Domänenstruktur	271
5.4	Antiferromagnetismus	276
5.5	Spingläser	282
5.6	Aufgaben zu Kapitel 5	289
6	Supraleitung	290
6.1	Grundzüge der mikroskopischen Theorie der Supraleitung . . .	293
6.1.1	Effektive Elektron-Elektron-Wechselwirkung	294
6.1.2	Cooper-Paare	302
6.1.3	Grundzustand und angeregte Zustände eines Supraleiters bei $T = 0$ K	306
6.1.4	Supraleitende Zustände für $T > 0$ K	313
6.1.5	Isotopieeffekt	316
6.1.6	Halbleitermodell des Supraleiters	317
6.1.7	Giaeverische Tunnelexperimente	321
6.2	Elektrodynamik des supraleitenden Zustands	327
6.2.1	Londonsche Gleichungen	327
6.2.2	Dünne supraleitende Schicht im Magnetfeld	332
6.2.3	Flußquantisierung	334
6.3	Josephson-Effekte	336
6.3.1	Josephson-Gleichungen	336
6.3.2	Josephson-Kontakt im Magnetfeld	339
6.3.3	Josephson-Kontakt im Feld von Mikrowellenstrahlung	346
6.4	Thermodynamik des supraleitenden Zustands	350
6.4.1	Freie Enthalpie des supraleitenden Zustands	351
6.4.2	Entropie und spezifische Wärme	354
6.5	Phänomenologische Theorie von Ginzburg und Landau	357
6.5.1	Ginzburg-Landau-Gleichungen	358
6.5.2	Phasengrenzenergie	363
6.5.3	Supraleiter erster Art	367
6.5.4	Supraleiter zweiter Art	375
6.6	Hochtemperatur-Supraleiter	384

6.7	Aufgaben zu Kapitel 6	389
7	Legierungen	392
7.1	Thermodynamik binärer Legierungen	393
7.1.1	Ideale Lösungen	400
7.1.2	Eutektische und peritektische Zustandsdiagramme	403
7.1.3	Intermetallische Verbindungen	408
7.1.4	Thermische Analyse	413
7.1.5	Überstrukturen	416
7.2	Kinetik der Phasenreaktionen	420
7.2.1	Darken-Gleichungen	424
7.2.2	Erstarrungsvorgänge	429
7.2.3	Ausscheidungsvorgänge	436
7.2.4	Martensitische Umwandlungen	438
7.3	Metastabile Legierungen	443
7.3.1	Struktur metallischer Gläser	446
7.3.2	Beugungsdiagramme amorpher Substanzen	450
7.3.3	Feinstrukturanalyse von Röntgenabsorptionskanten	455
7.4	Aufgaben zu Kapitel 7	456
A	Thermodynamische Gleichgewichtsbedingungen	457
B	Verteilungsfunktionen in der Boltzmann-, Bose- und Fermi-Statistik	459
	Literaturverzeichnis	469
	Sachverzeichnis	475

Symbolverzeichnis

a, b, c	Gitterkonstanten
$\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$	Primitive Translationen des Kristallgitters
A	Austauschkonstante
\vec{A}	Vektorpotential der magnetischen Flußdichte
\vec{b}	Burgers-Vektor
$\vec{b}_1, \vec{b}_2, \vec{b}_3$	Primitive Translationen des reziproken Gitters
\vec{B}	Magnetische Flußdichte, magnetische Induktion ($\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$) (Siehe auch Fußnote S.151.)
bcc	kubisch raumzentriert
c	Lichtgeschwindigkeit ($2,997925 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$); spezifische Wärme
C	Curie-Konstante; Molwärme
d_{hkl}	Abstand zweier Netzebenen mit den Millerschen Indizes (hkl)
D	Diffusionskoeffizient
D_{hkl}	Debye-Waller-Faktor
\vec{D}	Elektrische Flußdichte ($\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$)
e	Elementarladung ($1,60219 \cdot 10^{-19} \text{C}$)
E	Teilchenenergie
E_a, E_d	Ionisationsenergie der Akzeptoren bzw. Donatoren
E_g	Energielücke zwischen Leitungs- und Valenzband
E_F	Fermi-Energie
E_s	Energieparameter eines Zweistoffsystems
\vec{E}	Elektrische Feldstärke
f	Atomarer Streufaktor
f_0	Fermi-Funktion
F	Freie Energie
F_{hkl}	Strukturfaktor
fcc	kubisch flächenzentriert
g	Landé-Faktor; molare freie Enthalpie
\vec{g}	Vektor des reziproken Gitters ($\vec{g} = h\vec{b}_1 + k\vec{b}_2 + l\vec{b}_3$)
G	Freie Enthalpie
\vec{G}	Translationsvektor des reziproken Gitters ($\vec{G} = h_1\vec{b}_1 + h_2\vec{b}_2 + h_3\vec{b}_3$)

\hbar	Plancksches Wirkungsquantum geteilt durch 2π ($1,05459 \cdot 10^{-34}$ Js)
\vec{H}	Magnetische Feldstärke
hcp	hexagonal dichteste Kugelpackung
j	Diffusionsstromdichte; Elektrische Stromdichte; Wärmestromdichte
J	Gesamtdrehimpulsquantenzahl; Radiale Verteilungsfunktion
$k; \vec{k}$	Wellenzahl; Wellenzahlvektor
k_B	Boltzmann-Konstante ($1,380662 \cdot 10^{-23}$ JK ⁻¹)
K	Absorptionskante; Anisotropie-Konstante
L	Avogadro'sche Zahl ($6,022045 \cdot 10^{23}$ mol ⁻¹); Bahndrehimpulsquantenzahl
m	Ruhemasse des Elektrons ($9,109534 \cdot 10^{-31}$ kg)
m_e^*, m_p^*	Effektive Masse eines Kristallelektrons bzw. Lochs
m_c	Zyklotronmasse eines Kristallelektrons
M	Masse eines Gitteratoms; Masse eines Festkörpers
\vec{M}	Magnetisierung ($\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$)
n	Elektronenzahldichte; Brechungsindex; Ordnung eines gebeugten Strahls; Hauptquantenzahl; Stoffmenge
n_e	Elektronen- bzw. Ionenahldichte
N	Gesamtteilchenzahl
N_V	Teilchenzahldichte
p	Druck; Lochzahldichte; Effektive Magnetonenzahl; Teilchenimpuls
\vec{p}	Elektrisches Dipolmoment
\vec{P}	Elektrische Polarisierung ($\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P}$)
\vec{q}	Wellenzahlvektor von Phononen
\vec{r}	Ortsvektor
R	Reflexionsvermögen
R_H	Hall-Konstante
\vec{R}	Translationsvektor des Kristallgitters ($\vec{R} = n_1\vec{a}_1 + n_2\vec{a}_2 + n_3\vec{a}_3$)
\vec{s}_0, \vec{s}	Einheitsvektor in Richtung eines einfallenden bzw. gestreuten Strahls
S	Entropie; Spinquantenzahl
\vec{S}	Spinvektor
t	Zeit
T	Absolute Temperatur
T_C	Ferromagnetische Curie-Temperatur
T_f	Spinglastemperatur
T_F	Fermi-Temperatur
T_N	Antiferromagnetische Néel-Temperatur
\vec{u}	Auslenkung eines Gitteratoms aus der Gleichgewichtslage
U	Innere Energie eines Systems; Potentielle Energie eines Kristallelektrons

V	Kristallvolumen; Wechselwirkungspotential
W	Am System geleistete Arbeit
x_A, x_B	Stoffmengengehalt der A- bzw. B-Komponente in einem Zweistoffsystem
Z	Zustandsdichte; Ordnungszahl
α	Feinstrukturkonstante ($7,29735 \cdot 10^{-3}$); Madelung-Konstante; Polarisierbarkeit
γ	Molekularfeld-Konstante
δ	Phasengrenzenergie-Parameter
2Δ	Energielücke zwischen Grundzustand und angeregten Zuständen eines Supraleiters
ϵ	Dielektrizitätskonstante ($\epsilon = 1 + \chi$)
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante ($8,85419 \cdot 10^{-12} \text{AsV}^{-1} \text{m}^{-1}$)
ϑ	Glanzwinkel bei der Braggschen Reflexion
Θ	Paramagnetische Curie-Temperatur; Paramagnetische Néel-Temperatur
Θ_D	Debye-Temperatur
κ	Absorptionskoeffizient; Ginzburg-Landau-Parameter
λ	Londonsche Eindringtiefe; Wärmeleitfähigkeit; Wellenlänge
Λ	Freie Weglänge
μ	Chemisches Potential; Permeabilität ($\mu = 1 + \chi$)
μ_B	Bohrsches Magneton ($9,2741 \cdot 10^{-24} \text{JT}^{-1}$)
μ_0	Magnetische Feldkonstante ($1,256637 \cdot 10^{-6} \text{VsA}^{-1} \text{m}^{-1}$)
ν	Frequenz
ξ	Ginzburg-Landau-Kohärenzlänge
ρ	Spezifischer elektrischer Widerstand
σ	Elektrische Leitfähigkeit
τ	Relaxationszeit
Φ	Magnetischer Fluß
Φ_0	Magnetisches Flußquant ($2,0678 \cdot 10^{-15} \text{Tesla m}^2$)
χ	Elektrische Suszeptibilität; Magnetische Suszeptibilität
ψ	Eigenfunktion der Schrödinger Gleichung
ω	Kreisfrequenz
ω_c	Zyklotronfrequenz
ω_D	Debyesche Grenzfrequenz