
Grundlagen der Halbleiterphysik

Jürgen Smoliner

Grundlagen der Halbleiterphysik

Was Studierende der Physik und
Elektrotechnik wissen sollten

2. Auflage

 Springer Spektrum

Jürgen Smoliner
Institut für Festkörperelektronik
Technische Universität Wien
Wien, Österreich

ISBN 978-3-662-60653-7 ISBN 978-3-662-60654-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60654-4>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018, 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Copyright: deBlik, Berlin

Planung/Lektorat: Margit Maly

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur zweiten Auflage

Zuerst möchte ich die zweite Auflage dieses Buches den Ärzten und dem Pflegepersonal der Landeskrankenhäuser Mödling und Baden widmen. Ohne ihre Hilfe wäre die zweite Auflage wohl nicht mehr erschienen.

Zwei Jahre sind ins Land gegangen, und das Buch fand inzwischen offenbar einige Leser. Was sich inzwischen leider auch fand, waren so einige schlampe Fehler. Gefunden und beseitigt wurden diese Fehler von den Helden von Haegrula, also von den Studierenden der Elektrotechnik an der TU-Wien in der Vorlesung über Halbleiterelektronik Grundlagen. Details finden Sie im Dank. Fehlerfrei ist das Buch in der zweiten Auflage sicher auch noch nicht, aber für alle, die bei diesem Buchprojekt in Zukunft mitmachen wollen gilt: Wer Fehler findet, und sich mit dem Fehler, echtem Namen und nachvollziehbarer Adresse bei mir (juergen.smoliner@tuwien.ac.at) meldet, bekommt ein aktuelles Vorab-Exemplar der nächsten Auflage. Ihr Namen wird natürlich in der Liste der Helden von Haegrula verewigt und der Springer-Verlag hat auch nichts gegen diese Vorgangsweise.

Mein herzlicher Dank geht also an Alle, die bisher mitgemacht haben. Inhaltlich hat sich nichts geändert, nur dem Kapitel ‚Gruppentheorie‘ wurde ein teures, aber hoffentlich einleuchtendes Experiment hinzugefügt.

TU-Wien
(Oktober 2019)

Jürgen Smoliner

Vorwort zur ersten Auflage

Eine klassische Halbleiterphysik Vorlesung für Physiker und Elektrotechniker an der TU-Wien, auch Halbleiterelektronik Grundlagen („Haegrula“) genannt, wird typischerweise im sechsten Semester gehalten und geht davon aus, dass Sie Vorlesungen über Quantenmechanik, Elektrodynamik und Thermodynamik bereits absolviert haben. Normalerweise ist das kein Problem, denn gute Bücher über Halbleiterphysik gibt es inzwischen einige, und die sind auch alle wirklich, wirklich gut. Allerdings haben diese Bücher, bedingt durch das universitäre Umfeld, in dem sie geschrieben wurden, ihre eigene thematische Ausrichtung, die aber leider nicht mit den speziellen Bedürfnissen der Studierenden in den unteren Semestern an der TU Wien übereinstimmt.

Ein zusätzliches Problem haben dann noch die Studentinnen und Studenten der Elektrotechnik, welche die Vorlesung Halbleiterphysik im dritten Semester absolvieren müssen, und das, ohne vorher auch nur irgendwo etwas über Quantenmechanik etc. gehört zu haben. Damit wird die Vorlesung über Halbleiterphysik inklusive Übungen zu einer deutlichen Herausforderung.

Die Studierenden der Elektrotechnik, welche ich im Laufe der Jahre hier auf der TU Wien kennengelernt habe, waren alle wirklich fleißig, und durchaus in der Lage, sich die fehlenden Hintergrundinformationen aus diversen Büchern mit einem Gesamtumfang von mindestens 3000 Seiten selbst zu beschaffen. Diese Prozedur, so wurde mir aber mehrfach bestätigt, ist eher mühsam, da es schwer zu erkennen ist, was für einen Einsteiger in diesem Gebiet wirklich wichtig ist. Noch dazu gibt es das Problem, dass besonders den Studierenden der Elektrotechnik ein paar wichtige Grundlagen zum Verständnis der Materie fehlen, die eben nicht auf die Schnelle in Wikipedia nachgelesen werden können. Es gab somit einen gewissen Handlungsbedarf. Dieses Buch wurde also geschrieben, um den Studierenden der Physik und Elektrotechnik einen effizienten Einstieg in das Gebiet der Halbleiterphysik mit nur ca. 300 zu lesenden Seiten zu ermöglichen. Als Grundvoraussetzung zum Verständnis dieses Buches sollten Sie aber besser die Vorlesungen Algebra und Lineare Algebra bereits absolviert haben, anderenfalls werden Sie Probleme mit den ca. 2000 Formeln haben, welche sich in diesem Buch befinden.

Es muss nochmals betont werden, dass dieses Buch nur für einen effizienten Einstieg in das Gebiet der Halbleiterphysik gedacht ist, und nicht die Welt der Halbleiterphysik als Ganzes erklären soll. Es beschränkt sich auf die allernötigsten

Grundlagen, und widmet sich nur den elektronischen Eigenschaften von Volumenhalbleitern und deren Einsatz in Halbleiterbauelementen. Viele typische Übungsaufgaben sind mit vielen Details als Beispiele in den Text eingearbeitet und sollten Ihnen damit die Durchführung Ihrer Übungen erleichtern. Zusätzlich gibt es im Text verstreute Hausaufgaben, die es sich zu lösen lohnt, falls Sie ein tieferes Verständnis der Materie suchen.

Der Inhalt dieses Buches wurde zu großen Teilen aus folgenden Quellen zusammengetragen: Aus den deutschsprachigen Büchern *Halbleiterphysik*, Sauer (2009), *Festkörperphysik*, Gross und Marx (2014) sowie aus den Klassikern *Halbleiterelektronik*, Müller (1995a), *Bauelemente der Halbleiter-Elektronik*, Müller (1995b), und *Werkstoffe für die Elektrotechnik*, Fasching (1984). Ein Buch, das ich für dieses Werk leider zu spät entdeckt habe, ist *Physik der Halbleiterbauelemente*, Thuselt (2018). Die Übungen und Zusammenfassungen sind in diesem Buch didaktisch wirklich sehr wertvoll. Ganz besonders schätze ich die Bemühungen des Kollegen Thuselt, numerische Übungen mittels ‚Matlab‘ einzubauen. Ebenfalls lohnt es sich, seinen Lebenslauf im Internet zu recherchieren. Er hatte es wirklich nicht leicht, das Stichwort ist DDR. Englischsprachige Quellen für dieses Skriptum waren die Bücher *Quantum Mechanics: Fundamentals and Applications to Technology*, Singh (2003) und *Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductors*, Mishra und Singh (2008) sowie *Physics of Semiconductor Devices*, von Sze und Ng (2007). Weitere Quellen sind im Literaturverzeichnis aufgelistet.

Der Dank zur zweiten Auflage

Es ist wohl das übliche Schicksal. Kaum ist die erste Auflage der Haegrula Saga im Druck erschienen, und sofort braucht es die MA48 und ihre fleißigen Mitarbeiter zur Entsorgung des Restmülls (MA48 bitte bei Wikipedia nachlesen).

- Die ersten heldenhaften Müllsammler von Haegrula in der zweiten Auflage sind: Manuel Reichenpader, Christian Schleich, Marin Soce, Maximilian Thier und Markus Pal.
- Martin Schneider ist aber wirklich der erste epische Müll-Entsorger der zweiten Auflage der Haegrula Saga. Das pn-Kapitel war wohl doch noch eher in einem Zustand wie der Stall des Augias im alten Griechenland. Der Stall wurde von Ihm aber effizient ausgemistet.
- Viele Korrekturen und Vorschläge zur Verbesserung des Skriptums und des Buches in der neuesten Version wurden beigetragen von den Studenten: Sebastian Glassner, Markus Kampl, Christian Hartl, Jürgen Meier, Dominic Waldhör, Gernot Fleckl, Marko Stübegger, Michael Stückler und Michael Hauser.
- Mein Doktorand Maximilian Bartmann machte einen Verbesserungsvorschlag über den Idealitätsfaktor von Dioden und trieb mich damit an den Rande des Wahnsinns.
- Kouros Sarbandi-Fard und Arno Frank fanden diverse Details und haben mich damit auch ganz gut beschäftigt.
- Wir schreiben den Oktober 2019, und der Springer Verlag meint, eine zweite, fehlerkorrigierte Auflage macht Sinn. Irgendjemand, der nicht betriebsblind ist, musste also das ganze Buch noch einmal durchlesen ehe es endgültig in den Druck geht. Der Dank geht hier an Sabine Krisam, sie besorgte die Endredaktion der zweiten Auflage des Buches.
- Ein ganz persönlicher Dank an dieser Stelle: Auch wenn Alles fertig ist, nutzt es einem nichts, wenn niemand davon weiß. Dann ist es gut, einen Freund zu haben, der sich ein wenig im Marketing auskennt und den richtigen Vorschlag macht. Danke Franky! Auch Fred und Josef gebührt ewiger Dank: Ihr wisst,

warum. Mit alten Freunden, die sich nach langer Zeit zurück melden, kann man ebenfalls viel erreichen. Danke Tobias, danke Ferry!

- Zum Schluss gilt mein wirklich ganz besonderer Dank Prof. Dr. Emmerich Bertagnoli. Ohne seine endlose Toleranz gegenüber vielen und oftmals lästigen Interessenkonflikten wäre dieses Buch niemals entstanden.
- TUgether we stand, wie mir scheint. Das hat nicht Jeder.

Dank

Dieses Buch wäre nie entstanden, hätte meine Frau Cilja im Frühjahr 2016 nicht gesagt: Du hast gerade kein Forschungsprojekt, also eh nichts zu tun. Du hängst nur demotiviert herum, langweilst Dich, also warum schreibst Du nicht ein Skriptum oder besser noch ein Buch?

Das war, wie sich herausstellte, eine ausgezeichnete Idee, denn die Arbeit an diesem Buch machte dank des grandiosen Feedbacks von studentischer Seite wirklich Spaß. Natürlich brauchte die ganze Angelegenheit einen Arbeitstitel, und da ich ein Fan von epischen Heldensagen bin, wurde dieser Text schließlich intern als *Haegrula Saga*, *Haegrula* steht für Halbleiterelektronik Grundlagen, bekannt.

Hier ist also die Liste der Studierenden der Elektrotechnik der TU Wien, die als Helden von *Haegrula* einen wesentlichen Teil ihrer Lebenszeit geopfert haben, um das ursprüngliche Skriptum so zu verbessern, dass es schließlich in Buchform erscheinen konnte. Ihnen gehört daher unsterblicher Ruhm und auch mein ewiger Dank:

Zuerst geht mein Dank an die Dinosaurier dieses Projekts, die in den Jahren 2009 bis 2015 die Grundsteine für den Inhalt legten.

- Michael Eberhardt, Sebastian Kral, Martin Kriz und Paul Marko waren meine *LATEX* Ghostwriter der ersten Stunden und entzifferten im Jahre 2010 mit endloser Geduld mein handgeschmirtes Originalskriptum zur Vorlesung Halbleiterelektronik. Sie legten wirklich das Fundament für das jetzige Buch. Hilfe hatten Sie dabei von Thomas Hartmann bekommen, der sich schon 2009 bemüht hatte, das Originalskriptum in ein *MS-Word 2007* Dokument zu verwandeln. Leider war dieses Dokument nicht sehr kompatibel mit anderen Plattformen, und so dauerte es bis zum Jahr 2010, ehe die darin enthaltenen Formeln mittels *Mathtype* und *LATEX* recycelt werden konnten.
- Weitere Unterkapitel und Korrekturen aus den frühen Anfangszeiten dieses Skriptums wurden beigesteuert von Clemens Novak und Andreas Worliczek, Tobias Flöry, Martin Janits, Gerhard Rzepa, und Stefan Wagesreither.
- Um die nächsten Versionen des Skriptums bemühten sich: Manuel Messner, Christian Hölzel, Peter Gruber, Thomas Kadziela, Günther Mader, Elisabeth Wistrela, Rüdiger Sonderfeld, Lukas Dobusch und Nikolaus Lehner.

- Ein Abschnitt zum Thema Wellenpakete entstand aus den Anregungen von David Feilacher. Diskussionen mit Sana Zunic, Theresia Knobloch und meinem Kollegen Hans Kosina führten zu wichtigen Ergänzungen und Korrekturen zum Thema Unschärferelation.

Ein Skriptum wird zum Buch: Keine einfache Aufgabe ...

- Matthias Riesinger war der Lektor der allerersten Version des ursprünglichen Buchprojekts und holte es aus dem Beta-Stadium.
- Armin Lochmann, Samuel Gaspar, Benedikt Limbacher, David Graf und Martin Wolff fanden weitere Tipp- und Formelfehler, wo niemand welche vermutet hätte.
- Die wirklich epischen Helden des Buchprojekts sind Georg Mühl und Gerd Fuchs. Sie fanden Fehler ohne Zahl und machten zusätzlich Unmengen an inhaltlichen Verbesserungsvorschlägen.
- Von Peter Nemeth, David Pirker und Gernot Schweighofer lernte ich, dass mein Deutsch nicht gerade das Beste ist. Der Literaturpreis des Instituts für Festkörperelektronik (2016) geht jedenfalls an sie.
- Martin Baumann entdeckte bei der Prüfungsvorbereitung die hoffentlich letzten heimtückischen Tippfehler im Kronig-Penney-Modell. Michael Lackner und Ioan-Daniel Dobie halfen beim ‚picture pipping‘ zum Thema Fourier Transformationen im Anhang.
- Diverse weitere Fehler wurden entdeckt von: Erik Kornfellner, Niklas Brückelmayer, Kevin Niederwanger, Matthias Kratzmann und Patrick Fleischanderl.
- Marie Christine Ertl fand Fehler, die sogar vom Lektorat übersehen wurden, und kümmerte sich bereits um die Kapitel, die im zweiten Teil dieses Buches inzwischen erschienen sind. Verneigung, Mylady!
- Wilfried Wiedner stellte seine Musterlösung für das Kronig-Penney-Modell mit Deltafunktionen zur Verfügung. Sie findet sich jetzt im Anhang. Einige unentdeckte Fehler wurden von Matthias Laimer, Simon Howind und Christoph Gastecker gefunden.
- Einer meiner Lieblingsprüche ist: Ich weiß nicht Alles und der Papst bin ich auch nicht, weil ich nicht unfehlbar bin. Der Spruch ist gut, hilft aber nichts, wenn man niemanden hat, der einem sagt, wo die Fehler liegen. Hier kommt nochmal der Herr Mühl ins Spiel. Der hat zwar schon einen Haegrula Orden, wegen seiner unermüdlichen Beiträge zur Endredaktion werde ich aber wohl noch ein Freixemplar des Buches drauflegen müssen.
- Matthias Laimer, Simon Howind, Christoph Gastecker, Benjamin Friedl und Edwin Willeger fanden in letzter Sekunde noch einige Fehler, die aber auf den Druckfahnen korrigiert werden konnten.
- Wir schreiben den 19.06.2018: Es gibt die Saga tatsächlich jetzt in Papierform bei Amazon oder Springer. Das Buch schaut wirklich cool aus. Allerdings: Da gab es schon noch ein paar Kleinigkeiten in der ersten Auflage des Buches, die leider zu spät gefunden wurden.

Inhaltsverzeichnis

1	Quantenmechanik	1
1.1	Märchenstunde – es war einmal	1
1.2	Quantenmechanik: Einige formale Grundlagen	7
1.2.1	Die Unschärferelation	8
1.2.2	Schrödinger-Gleichung und Operatoren	16
1.2.3	Die Bracket-Schreibweise	22
1.2.4	Die Unschärferelation aus statistischer Sicht	22
1.3	Lösungen der Schrödinger-Gleichung für einfachste Fälle	23
1.3.1	Transmission einer Potentialstufe	24
1.3.2	Transmissionskoeffizient der einfachen Barriere	27
1.3.3	Die WKB-Näherung für Transmissionskoeffizienten	29
1.3.4	Tunnelströme	30
1.3.5	Der unendlich tiefe Potentialtopf	33
1.3.6	Der harmonische Oszillator	35
1.3.7	Das Coulomb-Potential (Wasserstoff)	36
1.4	Periodische Potentiale: 1-D Modellkristalle	38
1.4.1	Gekoppelte Potentialtöpfe	38
1.4.2	Das Kronig-Penney-Modell	41
1.4.3	Bloch-Oszillationen	48
1.4.4	Temperaturabhängige Bandlücken	51
1.5	Isolatoren, Halbleiter und Metalle	52
1.6	Zeitabhängige Prozesse: Fermi's goldene Regel	53
2	Kristalle	55
2.1	Diamonds are a girl's best friend, aber nicht nur das	55
2.2	Gittertypen	57
2.2.1	Einige Definitionen	57
2.2.2	fcc- und bcc-Gitter	58
2.2.3	Das Wasserstoffatom, Orbitale und Kristalle	60
2.2.4	Das Periodensystem der Elemente	62
2.2.5	Miller-Indizes	64
2.2.6	Flats'n Notches	67
2.3	Gruppentheorie, nein danke	68

2.4	Röntgenbeugung und das reziproke Gitter	69
2.4.1	Definition des reziproken Gitters	70
2.4.2	Gegenüberstellung von direkten und reziproken Gittern	73
2.4.3	Bragg-Reflexion im reziproken Gitter	74
2.5	Defekte	77
2.6	Das Wasserstoffmodell flacher Störstellen	78
3	Das Konzept der effektiven Masse	83
3.1	Effektive Massen? – Was soll das denn sein?	83
3.2	Das Bloch-Theorem	84
3.3	Die Definition der effektiven Masse	88
3.4	Elektronen und Löcher	92
3.5	Zyklotronresonanz	94
3.6	kp-Theorie, nein danke	96
4	Halbleiterstatistik und Dotierung	97
4.1	Wie viele Elektronen gibt es eigentlich im Halbleiter?	97
4.2	Die Zustandsdichte des freien Teilchens	98
4.3	Die Zustandsdichte im realen Halbleiter	102
4.4	Intrinsische und dotierte Halbleiter	105
4.4.1	Berechnung der Elektronendichte	105
4.4.2	Das Massenwirkungsgesetz	111
4.5	Besetzungsstatistik von Donatoren und Akzeptoren	112
4.6	Höher dotierte Halbleiter	118
5	Der pn-Übergang und seine Freunde	121
5.1	pn-Übergänge – wozu sind die gut?	121
5.2	Der pn-Übergang und die eingebaute Spannung	122
5.2.1	Die eingebaute Spannung und die Halbleiterstatistik	124
5.2.2	Berechnung der Raumladungszone mit Hilfe der Poisson-Gleichung	125
5.3	Dotierungsbestimmungen auf Schottky-Dioden	129
5.3.1	CV-Kurven und Dotierungsbestimmungen	129
5.3.2	C(V)-Tiefenprofile	133
5.4	JFETs und MESFETs	135
6	Streuprozesse	141
6.1	Elektronen im Kneipenviertel	141
6.2	Elastische Streuprozesse	142
6.2.1	Störstellenstreuung	142
6.2.2	Weitere elastische Streuprozesse	145
6.3	Nichtelastische Streuprozesse: Phononen	147
6.3.1	Atome im Kristall: Ein Feder-Masse-System	149
6.3.2	Akustische Phononen: Die einatomige Kette	150

6.3.3	Die Phononenzustandsdichte und der schwarze Strahler	154
6.3.4	Die Zustandsdichte im Debye-Modell	157
6.3.5	Die Zustandsdichte im Modell der linearen Kette	158
6.3.6	LO-Phononen: Die zweiatomige Kette	160
6.3.7	LO-Phononen: Die Molekülkette mit zwei Kraftkonstanten	163
6.4	Gesamtleitfähigkeit und Streuprozesse	167
6.5	Sättigungsdriftgeschwindigkeit und Beweglichkeit	168
6.6	Optische Übergänge und Streuprozesse	172
7	Klassischer Elektronentransport	175
7.1	Strom! Endlich gibt es Strom!	175
7.2	Das Drude-Modell	176
7.3	Der klassische Hall-Effekt	178
7.3.1	Hall-Effekt und Leitfähigkeitstensor	181
7.3.2	Hall-Messungen in Van-der-Pauw-Geometrie	183
7.3.3	Hall-Messungen in Hall-Geometrie	185
8	Die Boltzmann-Gleichung	187
8.1	Stromtransport im mikroskopischen Weltbild	187
8.2	Die Boltzmann-Transportgleichung	188
8.3	Relaxationszeitnäherung für Streuprozesse	190
8.4	Elastische Streuprozesse im elektrischen Feld	191
8.5	Inelastische Streuung im elektrischen Feld	194
8.6	Mittelungsprozeduren für die Streuzeit τ	196
8.7	Berechnung von τ für diverse Streuprozesse	197
8.7.1	Streuung an ionisierten Störstellen	197
8.8	Der Hall-Effekt und die Boltzmann-Gleichung	200
9	Optische Übergänge in Halbleitern	207
9.1	Halbleiteroptik ist wichtiger, als man meint	207
9.2	Optische Übergänge in indirekten Halbleitern	208
9.2.1	Absorption	208
9.2.2	Emission (strahlende Rekombination)	210
9.3	Optische Übergänge in direkten Halbleitern	212
9.3.1	Die kombinierte Zustandsdichte	213
9.3.2	Absorption und Emission in direkten Halbleitern	216
9.3.3	Berechnung der Dielektrizitätskonstante im Drude-Modell	216
10	Diffusion & Co.	223
10.1	Diffusion im Alltag	223
10.2	Diffusionsströme	224
10.3	Simultaner Drift- und Diffusionstransport	226
10.4	Kontinuitätsgleichungen	227

10.5	Rekombination	229
10.5.1	Rekombination über tiefe Störstellen	229
10.5.2	Strahlende Rekombination	234
10.5.3	Rekombination über Auger-Prozesse	236
10.6	Die Halbleiter-Grundgleichungen	238
10.7	Diffusion injizierter Ladungsträger	240
10.7.1	Zeitliches Abklingverhalten	240
10.7.2	Stationäre Injektion	241
10.7.3	Stationäre Injektion bei einer Probe endlicher Länge	243
10.7.4	Shockley-Haynes Experiment	246
10.8	Stromfluss in Dioden	248
10.8.1	Stromfluss in pn-Dioden	248
10.8.2	Reale pn-Dioden	251
10.8.3	Stromfluss in Schottky-Dioden	255
10.8.4	Ohmsche Kontakte	256
10.9	Der pnp-Transistor	257
10.9.1	Stromverstärkung	261
10.10	Der npn-Transistor	264
11	MOS Strukturen	265
11.1	Was sind MOSFETs und wo braucht man die?	265
11.2	Das Bandprofil der MOS-Struktur	267
11.2.1	C(V)-Kurven von MOS-Strukturen	270
11.2.2	Hochfrequenz-C(V) Kurven von MOS-Strukturen	274
11.3	Dotierungen, Oxidladungen, und Austrittsarbeiten	275
11.3.1	Oxidladungen	275
11.3.2	Austrittsarbeiten	276
11.3.3	Dotierung	276
11.3.4	Flachbandspannung, wo?	277
11.4	MOSFET-Kennlinien	280
12	Heterostrukturen	285
12.1	Herstellung und typische Anwendungen	285
12.2	Typ-I- und Typ-II-Heterostrukturen	286
12.3	Der High-Electron-Mobility-Transistor	288
12.3.1	Aufbau	288
12.3.2	Schwellspannung und Elektronendichte	289
12.4	Der GaN-AlGaN-HEMT	290
13	Anhang	293
13.1	Schwingungen, Wellen und ihre Differentialgleichungen	293
13.1.1	Die Schwingungsgleichung	294
13.1.2	Die Wellengleichung	296
13.1.3	Die Schrödinger-Gleichung	299

13.2	δ -Funktionen	300
13.2.1	Zustände im δ -Topf	303
13.2.2	Streuung am δ -Topf	304
13.2.3	Das Kronig-Penney-Modell mit δ -Funktionen	305
13.3	Fourier-Transformationen	308
13.3.1	Fourier für Dummies	308
13.3.2	Wellenpakete	309
13.3.3	Herr Fourier im Auto	311
13.3.4	Herr Fourier im Filter	311
13.3.5	Herr Fourier in Differentialgleichungen	312
13.4	Wie zeichne ich ein Bandschema?	313
13.4.1	Schottky-Diode	313
13.4.2	pn-Übergang	315
13.4.3	Heterostruktur	318
	Literatur	319
	Stichwortverzeichnis	323