

Springer-Lehrbuch

Holger Göbel • Henning Siemund

# Übungsaufgaben zur Halbleiter-Schaltungstechnik

2. Auflage



Springer

Professor Dr.-Ing. Holger Göbel  
Elektronik/Fakultät ET  
Helmut-Schmidt-Universität  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85  
22043 Hamburg  
holger.goebel@hsu-hh.de

Henning Siemund  
Elektronik/Fakultät ET  
Helmut-Schmidt-Universität  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85  
22043 Hamburg  
henning.siemund@hsu-hh.de

Ergänzendes Material zu diesem Buch finden Sie auf  
<http://extras.springer.com/2011/978-3-642-21010-5>

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-642-21010-5

e-ISBN 978-3-642-21011-2

DOI 10.1007/978-3-642-21011-2

Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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 Berlin Heidelberg 2007, 2011

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

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.

*Einbandentwurf:* WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media ([www.springer.com](http://www.springer.com))

---

# Vorwort

## Vorwort zur ersten Auflage

Das vorliegende Buch *Übungsaufgaben zur Halbleiter-Schaltungstechnik* wurde als Ergänzung zu dem Lehrbuch *Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik* konzipiert, welches ebenfalls im Springer-Verlag erschienen ist und mittlerweile in der zweiten Auflage vorliegt. Das Übungsbuch kommt damit dem berechtigten Wunsch vieler Studierender entgegen, zu einem Lehrbuch auch eine Sammlung von Übungsaufgaben zu erhalten, die der Vertiefung des Lehrstoffes und der Überprüfung des Gelernten dienen. Die Autoren haben sich dabei bewusst für eine Trennung zwischen Lehr- und Übungsbuch entschieden, statt die Aufgaben in das Lehrbuch zu integrieren. Der Grund dafür ist zum einen, dass nicht alle Leser eines Lehrbuches auch Übungsaufgaben benötigen und zum anderen, dass das Übungsbuch so auch unabhängig vom Lehrbuch erworben und genutzt werden kann.

Die enge Beziehung zwischen dem Lehr- und dem Übungsbuch spiegelt sich dabei auch im Aufbau des Übungsbuches wider. So wird nicht nur der gleiche Stoff – von der Halbleiterphysik über die wichtigsten Bauelemente bis hin zu analogen und digitalen Schaltungen sowie deren Herstellung – abgedeckt, sondern es wurden auch die Kapitelbezeichnungen aus dem Lehrbuch übernommen, um dem Leser die Orientierung zu erleichtern. Die einzelnen Kapitel sind so gestaltet, dass sie jeweils mit einer Zusammenstellung der wichtigsten Formeln beginnen, so dass die Aufgaben auch ohne das Lehrbuch gelöst werden können. Es folgen dann die einzelnen Aufgaben mit ausführlichen Lösungen, wobei die Aufgabenstellungen im Sinne der Übersichtlichkeit grau hinterlegt sind. Bei den Lösungen wird an geeigneten Stellen auf das Lehrbuch verwiesen, wenn dort weiterführende Erklärungen oder Herleitungen zu finden sind. Dazu ist an den entsprechenden Stellen im Übungsbuch ein Icon (siehe rechte Randspalte) angebracht, welches auf den entsprechenden Abschnitt im Lehrbuch (hier z.B. Abschn. 1.2.3) verweist. Ebenfalls verwendet das Übungsbuch die bereits aus dem Lehrbuch bekannten Icons für Verweise auf Simulationsdateien für das Schaltungssimulationsprogramm PSpice



sowie auf Applets des Lehr- und Lernprogrammes S.m.i.L.E. Beide Programme sind Bestandteil der beiliegenden CD-ROM. Auf ein Literaturverzeichnis wurde bei dem vorliegenden Übungsbuch bewusst verzichtet, da alle nötigen Herleitungen in dem Lehrbuch zu finden sind und dort auch weiterführende Literatur zu den einzelnen Kapiteln angegeben ist.

Bedanken möchten sich die Autoren an dieser Stelle bei allen, die zum Entstehen dieses Werkes beigetragen haben. Dies gilt vor allem für den Springer-Verlag sowie die Firma Le-TeX für die Unterstützung, die gute Zusammenarbeit und die Geduld bis zur Fertigstellung des Manuskripts.

Hamburg, im Sommer 2007

*H. Göbel, H. Siemund*

## **Vorwort zur zweiten Auflage**

Die zweite Auflage des vorliegenden Übungsbuches wurde um ein Kapitel über optoelektronische Bauelemente ergänzt und in einigen Bereichen überarbeitet. Als weitere Neuerung sind das interaktive Lernprogramm S.m.i.L.E sowie die Studentenversion des Schaltungssimulators PSpice inklusive der zu den einzelnen Übungsaufgaben gehörigen Simulationsdateien nun als Online-Materialien auf dem Extrasserver des Springer-Verlages verfügbar.

Die aus der ersten Auflage bekannten Icons für Verweise beziehen sich auf die inzwischen erschienene 4. Auflage des Lehrbuches *Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik* von Holger Göbel.

Dank gebührt an dieser Stelle wieder dem Springer-Verlag und der Firma Le-TeX für die gewohnt professionelle Unterstützung und die sehr gute Zusammenarbeit.

Hamburg, im Sommer 2011

*H. Göbel, H. Siemund*

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Liste der verwendeten Symbole</b> .....	XI
<b>1 Grundlagen der Halbleiterphysik</b> .....	1
1.1 Formelsammlung .....	1
1.2 Verständnisfragen zur Halbleiterphysik .....	3
1.3 Dotierter Halbleiter .....	7
1.4 Fermi-niveau und freie Ladungsträger .....	9
1.5 Störung des thermodynamischen Gleichgewichts .....	12
<b>2 Diode</b> .....	17
2.1 Formelsammlung .....	17
2.2 Verständnisfragen zur Diode .....	18
2.3 pn-Übergang .....	22
2.4 Diodenschaltungen .....	29
2.5 Schaltverhalten .....	34
<b>3 Bipolartransistor</b> .....	39
3.1 Formelsammlung (npn-Transistor) .....	39
3.2 Verständnisfragen zum Bipolartransistor .....	41
3.3 npn-Transistor .....	47
3.4 Transistorschaltung .....	53
3.5 Schaltverhalten .....	55
<b>4 Feldeffekttransistor</b> .....	61
4.1 Formelsammlung .....	61
4.2 Verständnisfragen zum Feldeffekttransistor .....	62
4.3 n-Kanal MOSFET .....	68
4.4 MOS-Inverter .....	72
4.5 CMOS-Inverter .....	77
4.6 Schaltungen mit MOS-Feldeffekttransistoren .....	81

<b>5</b>	<b>Optoelektronische Bauelemente</b> . . . . .	85
5.1	Verständnisfragen zu optoelektronischen Bauelementen . . . . .	85
5.2	Radiometrische und fotometrische Größen . . . . .	87
5.3	Fotowiderstand . . . . .	89
5.4	Solarzelle . . . . .	92
5.5	Luminiszenzdiode . . . . .	100
<b>6</b>	<b>Der Transistor als Verstärker</b> . . . . .	107
6.1	Verstärker mit n-Kanal MOSFET . . . . .	107
6.2	Arbeitspunkteinstellung mit 4-Widerstandsnetzwerk . . . . .	116
6.3	Stromspiegel mit npn-Bipolartransistoren . . . . .	119
6.4	Verstärker mit npn-Bipolartransistor . . . . .	124
<b>7</b>	<b>Transistorgrundschaltungen</b> . . . . .	129
7.1	Einstufiger Verstärker mit MOSFET . . . . .	129
7.2	Zweistufiger Verstärker . . . . .	134
7.3	Gateschaltung . . . . .	142
7.4	Push-Pull Ausgangsstufe . . . . .	150
<b>8</b>	<b>Operationsverstärker</b> . . . . .	155
8.1	Übertragungsverhalten im Frequenzbereich . . . . .	155
8.2	Übertragungsverhalten im Zeitbereich . . . . .	156
8.3	Stromquelle, Großsignalverhalten . . . . .	158
8.4	Stromquelle, Kleinsignalverhalten . . . . .	160
8.5	Analogrechenschaltung . . . . .	161
8.6	Messverstärker . . . . .	165
8.7	Nichtlineare Verstärkerschaltung . . . . .	167
8.8	Schmitt-Trigger . . . . .	169
<b>9</b>	<b>Frequenzverhalten analoger Schaltungen</b> . . . . .	173
9.1	Formelsammlung . . . . .	173
9.2	Komplexe Übertragungsfunktion . . . . .	175
9.3	Übertragungsverhalten einer Verstärkerschaltung . . . . .	179
9.4	Sourceschaltung . . . . .	183
9.5	Gateschaltung . . . . .	188
<b>10</b>	<b>Rückkopplung in Verstärkern</b> . . . . .	195
10.1	Formelsammlung . . . . .	195
10.2	Serien-Parallel-Rückkopplung . . . . .	196
10.3	Spannungsverstärker . . . . .	197
10.4	Transimpedanzverstärker . . . . .	204
10.5	Stabilität . . . . .	211
10.6	Wien-Brücken-Oszillator . . . . .	213
10.7	Ring-Oszillator . . . . .	217

<b>11 Logikschaltungen</b> .....	221
11.1 Formelsammlung .....	221
11.2 Entwurf von CMOS-Gattern (I) .....	222
11.3 Entwurf von CMOS-Gattern (II) .....	226
11.4 C <sup>2</sup> MOS-Technologie .....	231
11.5 Treiberschaltung für große kapazitive Lasten .....	233
<b>12 Herstellung integrierter Schaltungen in CMOS-Technik</b> ....	239
12.1 Layout-Analyse .....	239
12.2 Layout-Synthese .....	241
<b>13 Anhang</b> .....	245
13.1 Normreihen für Bauteilnennwerte .....	245



---

## Liste der verwendeten Symbole

### Formelzeichen

Name	Bedeutung	Einheit
$a, A$	Übertragungsfunktion	
$A(s)$	komplexe Übertragungsfunktion	
$A(j\omega)$	Frequenzgang	
$ A(j\omega) $	Amplitudengang	
$a^*$	Übertragungsfunktion der erweiterten Schaltung	
$A$	Fläche	$\text{m}^2$
$A_u$	Spannungsverstärkung	1
$A_{u'}$	Spannungsverstärkung der vereinfachten Schaltung	1
$B_N$	Stromverstärkung im Normalbetrieb	1
$B_I$	Stromverstärkung im Inversbetrieb	1
$C$	Kapazität	F
$C_L$	Lastkapazität	F
$C_{ox}$	Oxidkapazität	F
$C'$	Kapazität pro Fläche	$\text{Fm}^{-2}$
$C_{BE}$	Basis-Emitterkapazität	F
$C_{BC}$	Basis-Kollektorkapazität	F
$C_d$	Diffusionskapazität	F
$C_j$	Sperrschichtkapazität	F
$C_{j0}$	Sperrschichtkapazität bei $U_{pn} = 0 \text{ V}$ Sperrspannung	F
$d_{ox}$	Oxiddicke	m
$D_n$	Diffusionskoeffizient der Elektronen	$\text{m}^2\text{s}^{-1}$
$D_p$	Diffusionskoeffizient der Löcher	$\text{m}^2\text{s}^{-1}$
$E$	Elektrische Feldstärke	$\text{Vm}^{-1}$
$E_e$	Bestrahlungsstärke	$\text{W m}^{-2}$
$E_{max}$	Maximalwert der elektrischen Feldstärke	$\text{Vm}^{-1}$
$E_v$	Beleuchtungsstärke	lx

XII Liste der verwendeten Symbole

$E_{ph}$	Photonenbestrahlungsstärke	$s^{-1}m^{-2}$
$F(W)$	Fermiverteilung	1
$g_D$	Diodenleitwert	$AV^{-1}$
$g_m$	Steilheit	$AV^{-1}$
$g_\pi$	Transistoreingangsleitwert	$AV^{-1}$
$g_0$	Transistorausgangsleitwert	$AV^{-1}$
$G$	Generationsrate	$m^{-3}s^{-1}$
$G$	Gleichtaktunterdrückung	1
$G_{ph}$	Fotogenerationsrate	$m^{-3}s^{-1}$
$i$	Impuls	$kgms^{-1}$
$i$	Kleinsignalstrom	A
$I$	Strom, allgemein	A
$I]$	Quellenvektor	A
$I_B$	Basisstrom	A
$I_C$	Kollektorstrom	A
$I_{DS}$	Drain-Source-Strom	A
$I_e$	Strahlstärke	$W sr^{-1}$
$I_E$	Emitterstrom	A
$I_G$	Gatestrom	A
$I_{ph}$	Fotostrom	A
$I_{pp}$	primärer Fotostrom	A
$I_v$	Lichtstärke	cd
$I_S$	Sperrstrom der Diode	A
$I_S$	Transfersättigungsstrom des Bipolartransistors	A
$I_T$	Transferstrom des Bipolartransistors	A
$j$	Stromdichte	$Am^{-2}$
$j$	imaginäre Einheit	
$j_{Diff}$	Diffusionsstromdichte	$Am^{-2}$
$j_{Drift}$	Driftstromdichte	$Am^{-2}$
$j_{ges}$	Gesamtstromdichte	$Am^{-2}$
$j_n$	Elektronenstromdichte	$Am^{-2}$
$j_p$	Löcherstromdichte	$Am^{-2}$
$k$	Rückkopplungsfaktor	
$k_n$	Verstärkungsfaktor des Prozesses (n-MOS)	$AV^{-2}$
$k_p$	Verstärkungsfaktor des Prozesses (p-MOS)	$AV^{-2}$
$l$	Länge, allgemein	m
$l$	Kanallänge des Feldeffekttransistors	m
$L_e$	Strahldichte	$W sr^{-1}m^{-2}$
$L_n$	Diffusionslänge der Elektronen	m
$L_p$	Diffusionslänge der Löcher	m
$L_v$	Leuchtdichte	$cdm^{-2}$
$M$	Kapazitätskoeffizient	1
$n$	Elektronendichte	$m^{-3}$
$n$	Nullstelle der Übertragungsfunktion	$rad s^{-1}$

$n_B$	Elektronendichteverteilung in der Basis	$m^{-3}$
$n_i$	Intrinsicdichte	$m^{-3}$
$n_n$	Elektronendichte im n-Gebiet	$m^{-3}$
$n_p$	Elektronendichte im p-Gebiet	$m^{-3}$
$n_0$	Elektronendichte im thermodynamischen Gleichgewicht	$m^{-3}$
$n'$	Überschusselektronendichte	$m^{-3}$
$N$	Emissionskoeffizient	1
$N(W)$	Zustandsdichte	$m^{-3}$
$N_A$	Akzeptordichte	$m^{-3}$
$N_C$	Äquivalente Zustandsdichte an der Leitungsbandkante	$m^{-3}$
$N_D$	Donatordichte	$m^{-3}$
$N_V$	Äquivalente Zustandsdichte an der Valenzbandkante	$m^{-3}$
$p$	Löcherdichte	$m^{-3}$
$p$	Polstelle der Übertragungsfunktion	$\text{rad s}^{-1}$
$p'$	Überschusslöcherdichte	$m^{-3}$
$p_n$	Löcherdichte im n-Gebiet	$m^{-3}$
$p_p$	Löcherdichte im p-Gebiet	$m^{-3}$
$p_0$	Löcherdichte im thermodynamischen Gleichgewicht	$m^{-3}$
$Q$	Ladung, allgemein	As
$Q_d$	Diffusionsladung	As
$Q_j$	Sperrschichtladung	As
$r_\pi$	Transistoreingangswiderstand	$\text{VA}^{-1}$
$r_0$	Transistorausgangswiderstand	$\text{VA}^{-1}$
$R$	Rekombinationsrate	$\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$
$R$	Widerstand, allgemein	$\text{VA}^{-1}$
$R_a$	Lastwiderstand	$\text{VA}^{-1}$
$R_{aus}$	Ausgangswiderstand	$\text{VA}^{-1}$
$R_{aus}'$	Ausgangswiderstand der vereinfachten Schaltung	$\text{VA}^{-1}$
$R_{aus}^*$	Ausgangswiderstand der erweiterten Schaltung	$\text{VA}^{-1}$
$R_e$	Quellwiderstand	$\text{VA}^{-1}$
$R_{ein}$	Eingangswiderstand	$\text{VA}^{-1}$
$R_{ein}'$	Eingangswiderstand der vereinfachten Schaltung	$\text{VA}^{-1}$
$R_{ein}^*$	Eingangswiderstand der erweiterten Schaltung	$\text{VA}^{-1}$
$R_k$	Rückkopplungswiderstand	$\text{VA}^{-1}$
$R_\square$	Flächenwiderstand	$\text{VA}^{-1}$
$t_f$	Abfallzeit	s
$t_r$	Anstiegszeit	s
$t_S$	Speicherzeit	s
$T$	Temperatur	K
$u$	Kleinsignalspannung	V
$U$	Spannung, allgemein	V
$U]$	Knotenpotentialvektor	V
$U_a$	Ausgangsspannung	V
$u_a$	Kleinsignalausgangsspannung	V

XIV Liste der verwendeten Symbole

$u_{a'}$	Kleinsignalausgangsspng. der vereinfachten Schaltung	V
$U_{AN}$	Early-Spannung	V
$U_{br}$	Durchbruchspannung	V
$U_B$	Versorgungsspannung	V
$U_{B+}$	Positive Versorgungsspannung	V
$U_{B-}$	Negative Versorgungsspannung	V
$U_{BC}$	Basis-Kollektor-Spannung	V
$U_{BE}$	Basis-Emitter-Spannung	V
$U_{CEsat}$	Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung	V
$U_{CE}$	Kollektor-Emitter-Spannung	V
$U_{DS}$	Drain-Source-Spannung	V
$U_{DS,sat}$	Drain-Source-Sättigungsspannung	V
$U_e$	Eingangsspannung	V
$u_e$	Kleinsignaleingangsspannung	V
$u_{e'}$	Kleinsignaleingangsspng. der vereinfachten Schaltung	V
$U_{GS}$	Gate-Source-Spannung	V
$U_K$	Kanalpotenzial	V
$U_{ox}$	Spannung über dem Gateoxid	V
$U_{pn}$	Spannung über dem pn-Übergang	V
$U_{SB}$	Source-Bulk-Spannung	V
$U_{Th}$	Einsatzspannung	V
$v_n$	Driftgeschwindigkeit der Elektronen	$\text{m s}^{-1}$
$v_p$	Driftgeschwindigkeit der Löcher	$\text{m s}^{-1}$
$w$	Weite, allgemein	m
$w_E$	Emitterweite	m
$W$	Energie, allgemein	eV
$w_n$	Länge des neutralen n-Gebietes	m
$w_p$	Länge des neutralen p-Gebietes	m
$W_A$	Akzeptorniveau	eV
$W_D$	Donatorniveau	eV
$W_C$	Energieniveau der Leitungsbandkante	eV
$W_D$	Donatorniveau	eV
$W_{em}$	Energie eines emittierten Photons	eV
$W_{Ex}$	Austrittsarbeit	eV
$W_F$	Ferminiveau	eV
$W_g$	Bandabstand	eV
$W_i$	Intrinsicniveau	eV
$W_{kin,n}$	Kinetische Energie der Elektronen	eV
$W_{ph}$	Photonenenergie	eV
$W_V$	Energieniveau der Valenzbandkante	eV
$W_X$	Elektronenaffinität	eV
$x_B$	Basisweite	m
$x_n$	Ausdehnung der Raumladungszone im n-Gebiet	m
$x_p$	Ausdehnung der Raumladungszone im p-Gebiet	m
$[Y]$	Leitwertmatrix	$\text{AV}^{-1}$

$\beta_n$	Verstärkungsfaktor des n-Kanal MOSFET	$AV^{-2}$
$\beta_p$	Verstärkungsfaktor des p-Kanal MOSFET	$AV^{-2}$
$\beta_N$	Kleinsignalstromverstärkung des Bipolartransistors	1
$\varepsilon_r$	Relative Dielektrizitätszahl	1
$\eta$	Wirkungsgrad, allgemein	1
$\eta_{inj}$	Injektionswirkungsgrad	1
$\eta_{opt}$	optischer Wirkungsgrad	1
$\eta_q$	Quantenwirkungsgrad	1
$\eta_P$	Leistungswirkungsgrad	1
$\eta_{q,ext}$	externer Quantenwirkungsgrad	1
$\eta_{q,int}$	interner Quantenwirkungsgrad	1
$\mu_n$	Beweglichkeit der Elektronen	$m^2V^{-1}s^{-1}$
$\mu_p$	Beweglichkeit der Löcher	$m^2V^{-1}s^{-1}$
$\varphi$	Phase	°
$\varphi(j\omega)$	Phasengang	°
$\varphi_R$	Phasenrand	°
$\Phi_e$	Strahlungsleistung	W
$\Phi_i$	Diffusionspotenzial	V
$\Phi_K$	Kontaktpotenzial	V
$\Phi_{ph}$	Photonenstrom	$s^{-1}$
$\Phi_v$	Lichtstrom	lm
$\rho$	Ladungsdichte	$Asm^{-3}$
$\sigma$	Elektrische Leitfähigkeit	$AV^{-1}m^{-1}$
$\sigma_n$	Flächenladungsdichte	$Asm^{-2}$
$\tau_n$	Lebensdauer der Elektronen	s
$\tau_N$	Transitzeit im Normalbetrieb	s
$\tau_I$	Transitzeit im Inversbetrieb	s
$\tau_p$	Lebensdauer der Löcher	s
$\tau_T$	Transitzeit	s
$\omega$	Kreisfrequenz, allgemein	$rad s^{-1}$
$\omega_\beta$	Beta-Grenzfrequenz	$rad s^{-1}$
$\omega_H$	obere Grenzfrequenz	$rad s^{-1}$
$\omega_L$	untere Grenzfrequenz	$rad s^{-1}$
$\omega_T$	Transitfrequenz	$rad s^{-1}$

## Sonstige Symbole

Name	Bedeutung
//	Parallelschaltung
·	logische UND-Verknüpfung
+	logische ODER-Verknüpfung

**Physikalische Konstanten**

<b>Name</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Wert</b>
$c$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$2,997 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$
$h$	Planck'sches Wirkungsquantum	$4,135 \times 10^{-15} \text{eVs}$
$q$	Elementarladung	$1,6 \times 10^{-19} \text{As}$
$k$	Boltzmann-Konstante	$1,38 \times 10^{-23} \text{J K}^{-1}$
$\varepsilon_0$	Dielektrizitätszahl des Vakuums	$8,854 \times 10^{-12} \text{AsV}^{-1} \text{m}^{-1}$

**Materialeigenschaften von Silizium**

<b>Name</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Wert bei <math>T = 300 \text{K}</math></b>
$W_G$	Bandabstand	1,1 eV
$\varepsilon_r$	relative Dielektrizitätszahl von Si	11,9
$\varepsilon_{ox}$	relative Dielektrizitätszahl von $\text{SiO}_2$	3,9
$n_i$	Intrinsicdichte	$1,5 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$
$N_C$	Äquivalente Zustandsdichte	$2,8 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$
$N_V$	Äquivalente Zustandsdichte	$1,04 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$
$\mu_n$	Beweglichkeit der Elektronen	$0,135 \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$
$\mu_p$	Beweglichkeit der Löcher	$0,048 \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$