
Schaltungstechnik

Johann Siegl · Edgar Zocher

Schaltungstechnik

Analog und gemischt analog/digital

6., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Mit Download Möglichkeit von über 250 PSpice- und
VHDL-AMS-Beispielen

Johann Siegl
Altdorf bei Nürnberg, Deutschland

Edgar Zocher
Nürnberg, Deutschland

Ergänzendes Material zu diesem Buch finden Sie auf <http://extras.springer.com>

ISBN 978-3-662-56285-7 ISBN 978-3-662-56286-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-56286-4>

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004, 2005, 2009, 2010, 2014, 2018

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 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.

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur 6. Auflage

Analysen, Aussagen und Abschätzungen zur Schaltungstechnik soll der Leser in über 250 vorbereiteten Experimenten eigenständig per Simulation nachvollziehen und näher untersuchen können. Ein vielfältiges Angebot von praktisch verifizierbaren Beispielen ist die Grundlage für den erfolgreichen Einstieg in die Welt der analogen und gemischt analog/digitalen Schaltungstechnik. Die Entwurfsmethodik von Schaltkreisen wurde ergänzt um eine an praktischen Beispielen orientierte Einführung in VHDL-AMS. Das Kapitel Schaltungsintegration ermöglicht einen Einstieg in den Entwurf integrierter Schaltkreise (Full Custom IC-Design).

Nürnberg
im November 2017

Johann Siegl
Edgar Zocher

Extras Online: 1. Experiment_Workspaces, readme.html
2. VHDL-AMS_Beispiele, readme.html

finden Sie unter <http://extras.springer.com/2018/978-3-662-56286-4>

Vorwort zur 1. Auflage

Das Stoffgebiet der analogen und gemischt analog/digitalen Schaltungstechnik ist außerordentlich umfangreich. Die hier getroffene Stoffauswahl soll wichtige Grundlagen zum Verständnis analoger und gemischt analog/digitaler Schaltkreise vermitteln. Fundierte Kenntnisse der Schaltungstechnik auf Transistorebene bilden eine unverzichtbare Basis für die Entwicklung von Elektroniksystemen. Trotz fortschreitender Digitalisierung ist das Thema „Analoge Schaltungstechnik“ für Elektronikentwickler hoch aktuell.

Der Inhalt zu den Grundlagen der analogen und gemischt analog/digitalen Schaltungstechnik gliedert sich in die Hauptsäulen: Entwicklungsmethodik, Verstärkertechnik, Funktionsprimitive und Funktionsschaltungen von Schaltkreisen. Funktionsprimitive sind die Bausteine von Schaltungen. Erkennt man und kennt man die Eigenschaften der Funktionsprimitive einer komplexeren Schaltung, so erschließt man sich sehr viel leichter deren Funktionsweise. Die funktionsorientierte Vorgehensweise wird auch vielfach mit „Functional Design“ gekennzeichnet. Die Einführung in die Entwicklungsmethodik beinhaltet auch eine Einführung in rechnergestützte Entwurfsverfahren zur Designbeschreibung und zur Designverifikation. Mit Orcad-Lite/PSpice (http://www.flowcad.de/Free_Download.htm)¹ steht dem Anwender ein gängiges „Toolset“ für die Designbeschreibung und die Designverifikation zur Verfügung, mit dem alle wesentlichen Funktionen nach heutigem Stand der Technik dargestellt und verifiziert werden können. Für nahezu alle behandelten Schaltungen steht ein gebrauchsfertiges „Experiment“ zur Verfügung. Am Experiment lassen sich mit dem Simulator wie in einem virtuellen Labor die Eigenschaften einer Schaltung „messen“. Neben der Einführung in PSpice erfolgt eine Einführung in die Hardwarebeschreibungssprache VHDL-AMS. Beispiele von Modellbeschreibungen und Testbenchbeschreibungen wichtiger Funktionsprimitive und Funktionsschaltkreise erläutern die Anwendung von VHDL-AMS (siehe „Download“).

Nach einer Einführung in die Entwicklungsmethodik von Elektroniksystemen stehen im Vordergrund die Probleme der „inneren“ Schaltungstechnik von wichtigen

¹„Download“: <http://extras.springer.com/2018/978-3-662-56286-4>.

Funktionsbausteinen für Elektroniksysteme und deren Zusammenschaltung zu komplexeren Funktionseinheiten. Naturgemäß ist die Verstärkertechnik mit die wichtigste Analogfunktion, geht es doch darum, schwache und verrauschte Signale geeignet aufzubereiten, um sie dann der „digitalen Welt“ wieder zuführen zu können. Gefördert werden soll das „Denken“ in einfachen Modellen und Makromodellen, um sich ein Schaltungsverhalten durch eigenes Abschätzen mit vereinfachten Modellen erschließen zu können.

Voraussetzung für erfolgreiches selbständiges Entwickeln ist das Abschätzen der statischen Eigenschaften und des dynamischen Verhaltens im Frequenz- und Zeitbereich, sowie der Schnittstelleneigenschaften von Schaltungen. Die Auswahl einer Schaltung zur Lösung einer praktischen Aufgabenstellung erfolgt immer auf Basis von geeigneten Funktionsprimitiven und Funktionsschaltkreisen, um bestimmte vorgegebene charakteristische Eigenschaften zu erfüllen. Können mit einer ausgewählten Schaltung vorgegebene Eigenschaften nicht realisiert werden, so muss auf alternative Schaltungskonzepte zurückgegriffen werden. An zahlreichen Praxisbeispielen wird die Zerlegung einer Schaltung in Funktionsprimitive und die Ermittlung der Eigenschaften einer Schaltung durch Abschätzanalyse auf der Basis vereinfachter Modelle geübt. Die Experimente und ein reichhaltiges Übungsprogramm zu allen Hauptkapiteln bieten die Möglichkeit zur Vertiefung des Lehrstoffs. Experiment-Workspaces und Übungen sind über „Download“ erhältlich. Sämtliche über „Download“ verfügbaren „Experimente“ sind unmittelbar mit der Demo-Version des Schaltkreissimulators Orcad-Lite/PSpice ausführbar. Damit kann der Anwender in über 250 vorbereiteten Experimenten eigene vertiefende Erfahrungen im Umgang mit einer genaueren Schaltungsanalyse zur Bestätigung der Abschätzungen für die Ermittlung von Schaltungseigenschaften sammeln. Um das selbständige Experimentieren auf Basis der vorbereiteten Beispiele zu erleichtern, wird in die Handhabung und Funktionalität der Schaltkreissimulation mit Orcad-Lite/PSpice eingeführt.

Wegen des umfangreichen Stoffgebietes werden bewusst textuelle Erläuterungen so knapp wie möglich gehalten, zugunsten der Darstellung von Sachverhalten anhand von Ergebnissen an begleitenden Experimenten. Dank gilt dem Verlag für die zuteilgewordene Unterstützung und Kooperationsbereitschaft.

Altdorf
im Sommer 2003

Johann Siegl

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation für die analoge Schaltungstechnik	1
1.2	Wichtige Grundbegriffe	3
2	Entwicklungsmethodik und Entwurfswerkzeuge	9
2.1	Methodik zur Elektroniksystementwicklung	9
2.1.1	Prozessablauf bei der Elektroniksystementwicklung	10
2.1.2	Beispiele für Anwendungen der analogen Schaltungstechnik	15
2.1.3	Technologien zur Realisierung von Schaltungen	18
2.1.4	Strukturierung der Schaltungstechnik	20
2.1.5	Prozessablauf bei der Schaltungsentwicklung	25
2.2	Schaltungsanalyse mit PSpice	28
2.2.1	Prozessablauf bei der Schaltkreissimulation	29
2.2.2	Beschreibung und Analyse einer Testanordnung	34
2.2.3	DC/AC/TR-Analyse dargestellt an einer Beispielschaltung	44
2.3	Abschätzanalyse	56
2.3.1	Zur Systematik bei der Abschätzanalyse	56
2.3.2	Frequenzbereichsanalyse – Bodediagramm	60
2.4	Wärmeflussanalyse	71
2.5	Die Hardwarebeschreibungssprache VHDL-AMS	76
2.5.1	Aufbau und Beschreibungsmöglichkeiten	76
2.5.2	Wichtige Sprachkonstrukte	80
2.5.3	Beispiel	85
3	Modelle von Halbleiterbauelementen	93
3.1	Modellbeschreibungen von Dioden	93
3.1.1	Modellbeschreibungen einer Diode für die Schaltkreissimulation	93

3.1.2	Vereinfachte Modelle für die Abschätzanalyse	102
3.1.3	Modellbeschreibung einer Diode in VHDL-AMS	104
3.2	Grundlagen des Rauschens	105
3.2.1	Zur Beschreibung von Rauschgrößen	105
3.2.2	Modellierung von Rauschquellen	108
3.3	Modellbeschreibungen für Bipolartransistoren	112
3.3.1	Wichtige Kennlinien eines Bipolartransistors	112
3.3.2	Physikalischer Aufbau und Grundmodell	117
3.3.3	DC-Modellvarianten für die Abschätzanalyse	125
3.3.4	AC-Modellvarianten für die Abschätzanalyse	127
3.3.5	Rauschen eines BJT-Verstärkers	129
3.3.6	Gummel-Poon Modell	132
3.3.7	Verhaltensmodell in VHDL-AMS	137
3.4	Modellbeschreibungen von Feldeffekttransistoren	140
3.4.1	Aufbau, Eigenschaften und Kennlinien von Sperrschicht-FETs	140
3.4.2	AC-Modell und Rauschen von Sperrschicht-FETs	145
3.4.3	Aufbau, Eigenschaften und Kennlinien von Isolierschicht-FETs	147
3.4.4	Grundmodell eines Isolierschicht-FETs	151
3.4.5	AC-Modell und Rauschen von Isolierschicht-FETs	152
3.4.6	MOSFET-Level-i Modelle	153
3.4.7	Verhaltensmodell in VHDL-AMS	155
4	Grundlegende Funktionsprimitive	159
4.1	Passive Funktionsgrundsaltungen	159
4.1.1	Funktionsgrundsaltungen mit Spannungsteilern	159
4.1.2	Übertrager	163
4.1.3	RC-Resonator	165
4.1.4	LC-Resonatoren	166
4.1.5	Angepasster Tiefpass/Hochpass	172
4.2	Funktionsgrundsaltungen mit Dioden	173
4.2.1	Gleichrichterschaltungen und Spannungsvervielfacher	174
4.2.2	Anwendungen der Diode als Spannungsquelle	181
4.2.3	Signaldetektorschaltungen	182
4.2.4	Begrenzer-, Klemm- und Schutzschaltungen	190
4.2.5	Wirkprinzip von Schaltnetzteilen	194
5	Linearverstärker und Operationsverstärker	199
5.1	Eigenschaften von Linearverstärkern – Makromodelle	199
5.1.1	Grundmodell eines Linearverstärkers	199
5.1.2	Schnittstellenverhalten	205
5.1.3	Aussteuergrenzen eines Linearverstärkers	207
5.1.4	Rauschen von Verstärkern	210

5.2	Rückgekoppelte Linearverstärker	216
5.2.1	Rückkopplung allgemein und Schwingbedingung	216
5.2.2	Frequenzgang des rückgekoppelten Systems.	221
5.2.3	Seriengegekoppelte LV mit gesteuerter Spannungsquelle	224
5.2.4	Seriengegekoppelte LV mit gesteuerter Stromquelle	226
5.2.5	Parallelgegekoppelte LV mit gesteuerter Spannungsquelle	228
5.2.6	Parallelgegekoppelte LV mit gesteuerter Stromquelle	232
5.3	Stabilität und Frequenzgangkorrektur von LV.	234
5.3.1	Analyse der Schleifenverstärkung	234
5.3.2	Frequenzgangkorrektur des Geradeausverstärkers	236
5.3.3	Frequenzgangkorrektur am Rückkopplungsnetzwerk	240
5.4	Operationsverstärker	246
5.4.1	Erweiterung des Makromodells	246
5.4.2	Gleichtaktunterdrückung und Aussteuergrenzen von OPs	253
5.4.3	Einflüsse der DC-Parameter auf die Ausgangsoffsetspannung	257
5.4.4	Rauschen von OP-Verstärkern	260
5.4.5	Slew-Rate Verhalten eines OP-Verstärkers	261
5.5	OP-Verstärkeranwendungen	265
5.5.1	Instrumentenverstärker	265
5.5.2	Sensorverstärker	266
5.5.3	Treppengenerator	267
5.5.4	Kompressor/Expander-Verstärker	268
5.5.5	Aktive Signaldetektoren.	269
5.5.6	Tachometerschaltung zur analogen Frequenzbestimmung.	271
5.5.7	Analoge Filterschaltungen	272
5.5.8	Virtuelle Induktivität	274
5.5.9	Schmitt-Trigger	276
5.5.10	Astabiler Multivibrator.	278
5.5.11	Negative-Impedance-Converter	279
6	Funktionsgrundschaltungen mit BJTs	281
6.1	Vorgehensweise bei der Abschätzanalyse	281
6.1.1	Vorgehensweise bei der DC-Analyse.	281
6.1.2	Vorgehensweise bei der AC-Analyse	282
6.1.3	Seriengegekoppelter Transistor	284
6.1.4	Parallelgegekoppelter Transistor	286

6.2	Arbeitspunkteinstellung und Stabilität.	288
6.2.1	Schaltungsvarianten zur Arbeitspunkteinstellung	288
6.2.2	Arbeitspunktbestimmung und Arbeitspunktstabilität.	293
6.3	Wichtige Funktionsprimitive mit BJTs	302
6.3.1	RC-Verstärker in Emittergrundsaltung.	302
6.3.2	RC-Verstärker in Basisgrundsaltung	310
6.3.3	Emitterfolger	315
6.3.4	Der Bipolartransistor als Spannungsquelle	320
6.3.5	Der Bipolartransistor als Stromquelle	322
6.3.6	Darlingtonstufen.	324
6.3.7	Kaskode-Schaltung	328
6.3.8	Verstärker mit Stromquelle als Last.	331
6.4	Differenzstufen mit BJTs.	334
6.4.1	Emittergekoppelte Differenzstufen	334
6.4.2	Basisgekoppelte Differenzstufen	347
6.4.3	Differenzstufen in Kaskodeschaltung	356
6.5	Schalteranwendungen des Bipolartransistors	359
6.5.1	Spannungsgesteuerter Schalter	359
6.5.2	Gegentaktschalter.	363
6.6	Weitere Funktionsprimitive mit BJTs	366
6.6.1	Logarithmischer Verstärker	366
6.6.2	Konstantstromquellen	368
6.6.3	Konstantspannungsquellen.	375
6.6.4	Schaltungsbeispiele zur Potenzialverschiebung.	378
7	Funktionsgrundsaltungen mit FETs.	383
7.1	Vorgehensweise bei der Abschätzanalyse	383
7.1.1	Vorgehensweise bei der DC-Analyse.	383
7.1.2	Vorgehensweise bei der AC-Analyse	385
7.2	Arbeitspunkteinstellung und Arbeitspunktstabilität.	385
7.3	Grundsaltungen mit Feldeffekttransistoren	393
7.3.1	Verstärkerschaltungen mit Feldeffekttransistoren	393
7.3.2	Anwendung des Linearbetriebs von Feldeffekttransistoren.	404
7.3.3	Differenzstufen mit Feldeffekttransistoren	408
7.4	Digitale Anwendungsschaltungen mit MOSFETs.	412
7.4.1	NMOS-Inverter	412
7.4.2	CMOS-Inverter.	419
7.4.3	Schalter-Kondensator-Technik.	427

8	Funktionsschaltungen für Systemanwendungen	433
8.1	Treiberstufen	433
8.1.1	Treiberstufen im A-Betrieb	434
8.1.2	Komplementäre Emitterfolger im AB-Betrieb	440
8.1.3	Klasse D Verstärker	446
8.2	Linearverstärker auf Transistorebene	447
8.2.1	OP-Verstärker $\mu A741$ – Abschätzanalyse	447
8.2.2	Zweistufiger Linearverstärker mit BJTs	451
8.2.3	Regelverstärker mit BJTs	458
8.3	Beispielschaltungen der Kommunikationselektronik	460
8.3.1	Oszillatorschaltung – AM/FM modulierbar	461
8.3.2	Spannungsgesteuerter Oszillator – VCO	467
8.3.3	Phasenvergleich	469
8.3.4	Doppelgegentakt-Mischer	472
8.3.5	Schaltungen zur digitalen Modulation	474
8.3.6	Bestandteile eines Funkempfängers	483
8.4	PLL-Schaltkreise	486
8.4.1	Aufbau und Wirkungsprinzip	487
8.4.2	Funktionsbausteine einer PLL	489
8.4.3	Systemverhalten	502
8.4.4	Anwendungen	511
8.5	Beispiele von Sensorschaltungen	514
8.5.1	Optischer Empfänger als Photodetektor	514
8.5.2	Induktiver Abstandssensor	516
8.6	Sekundär getaktetes Schaltnetzteil	519
9	Analog/Digitale Schnittstelle	523
9.1	Zur Charakterisierung einer Logikfunktion	523
9.1.1	Modellbeschreibung einer Logikfunktion	524
9.1.2	Ereignissteuerung	531
9.1.3	Entsprechungen zwischen Schematic- und VHDL-Beschreibung	534
9.2	Digital/Analog Wandlung	535
9.3	Abtastung analoger Signale	539
9.3.1	Abtasttheorem	540
9.3.2	Quantisierungsrauschen	541
9.3.3	Abtasthalteschaltungen	542
9.4	Analog/Digital Wandlung	545
9.4.1	Zählverfahren	545
9.4.2	Sukzessive Approximationsverfahren	548
9.4.3	Parallelverfahren	552

9.5	Delta-Sigma Wandler	557
9.5.1	Zum Aufbau von Delta-Sigma Wandlern	557
9.5.2	Rauschverhalten und Rauschformung	564
10	Schaltungsintegration	567
10.1	Mikroelektronische Prozesstechnologie	568
10.1.1	Planartechnik	570
10.1.2	Prinzipieller Herstellungsablauf	572
10.1.3	Strukturierung mit Lithografie	572
10.1.4	CMOS-Prozessfolge	573
10.1.5	Realisierung von Dielektrika, Oxid-Schichten	581
10.1.6	Dotierverfahren, Diffusion, Ionenimplantation	583
10.1.7	Abtragen von Schichten, Ätzen, Polieren	584
10.1.8	Polykristallines Silizium (Poly-Si)	584
10.1.9	Metallisierung	585
10.2	CMOS-Varianten	586
10.2.1	Latchup-Effekt	589
10.2.2	Wirkelemente im CMOS-Querschnitt	591
10.2.3	CMOS-Standardprozess	592
10.3	Layout	593
10.3.1	Layout-Regeln	593
10.4	Integrierte Widerstände	597
10.4.1	Widerstände, Elektrische Eigenschaften	597
10.4.2	Ausführungsvarianten, Widerstandstypen	599
10.4.3	Zusammenfassung	601
10.4.4	Kontaktwiderstände	602
10.5	Entwurfszentrierung, Toleranzverhalten, Matching	602
10.5.1	Entwurfszentrierung	602
10.5.2	Toleranzverhalten, Matching	604
10.5.3	Common-Centroid-Layout	605
10.5.4	Layout-Strukturen	608
10.5.5	Design-Empfehlungen	608
10.6	Kapazitäten	610
10.6.1	POLY-POLY Kondensator	613
10.6.2	Multi Metall Kondensator	615
10.6.3	Zusammenfassung	617
10.7	Integrierte Induktivitäten	618
10.8	Integrierte Leitungen	618
10.8.1	Allgemeines Leitungsmodell	618
10.8.2	Modell der integrierten Leitung	619
10.8.3	Beispiel einer typischen Signalleitung	621
10.8.4	Leitungskopplung	623
10.8.5	Zusammenfassung	624

10.9	Signal-Übertragung, „Elmore-Delay“	624
10.9.1	Konventionelle Definitionen	624
10.9.2	„Elmore-Delay“	625
10.10	Integrierte MOS-Feldeffekttransistoren.	631
10.10.1	NMOS-FET Aufbau und Modell (DC)	632
10.10.2	Zusammenfassung: NMOS-Modell Level 1	637
10.10.3	PMOS-FET Aufbau und Modell (DC).	637
10.10.4	Zusammenfassung: PMOS-Modell Level 1	639
10.11	Modellerweiterungen für integrierte MOSFETs	639
10.11.1	Body Effekt (Substratsteuereffekt).	639
10.11.2	Temperaturverhalten	640
10.11.3	Subthreshold (Unterschwellstrom) Verhalten	640
10.11.4	Kurzkanal Effekte	641
10.11.5	SPICE DC-Modell	644
10.11.6	Vergleich Lang-, Kurzkanal-Transistoren und MOS-Modelle	645
10.11.7	Kapazitätsmodell	647
10.11.8	Kapazitäts-Parameter im SPICE Modell	650
10.11.9	Dynamisches SPICE-Großsignalmodell	650
10.11.10	Kleinsignal- (AC-) Modell.	651
10.11.11	MOS-FET Layout	652
10.12	Digitale Basiszellen	653
10.12.1	Allgemeines Schaltermodell des MOS-FET (switch model)	653
10.12.2	Logik-Schaltermodell des MOS-FET (logic switch model), (Tab. 10.11).	654
10.12.3	Komplementäre Schaltungsstruktur bei CMOS Logikgattern.	654
10.12.4	Beispiele von CMOS Logikgattern	656
10.12.5	Dimensionierung von CMOS Logikgattern	659
10.12.6	Dimensionierung beliebiger Logikgatter	663
10.12.7	Ein-, Ausgangs-, Lastkapazitäten.	664
10.12.8	Verlustleistung	665
10.12.9	Transmission-Gate (CMOS-Signalschalter)	666
10.12.10	Transfer-Gate (MOS-Signalschalter)	668
10.12.11	Multiplexer.	669
10.12.12	D-Flip-Flop	669
10.13	Design einer digitalen Zellbibliothek.	672
10.13.1	Konzept, Vorüberlegungen zur Zell-Geometrie	673
10.13.2	Standard-Inverter <i>inv1</i>	674
10.13.3	Ringoszillator <i>ringo5</i>	683
10.13.4	NAND-Standardzelle <i>nand2</i>	685

10.13.5	NOR-Standardzelle <i>nor2</i>	689
10.13.6	D-Flip-Flop Standard-, Makro-Zelle (Kompaktdesign) <i>dff1</i>	692
10.13.7	Zusammenfassung, Datenblätter	698
Literaturverzeichnis		701
Sachverzeichnis		703

Formelzeichen

a	Schalttransistor: Ausräumfaktor
A	Parameter: Stromverstärkungsfaktor beim Transistor $A = I_C/I_E$
A_F	Parameter: „Flicker“ Rauschen, Exponent
A_L	Induktivität pro Windungsquadrat
B	Parameter: Stromverstärkungsfaktor beim Transistor $B = I_B/I_C$
B	Bandbreite
B_r	Äquivalente Rauschbandbreite; z. B. Bandbreite der Leistungsverstärkung
$BETA$	PSpice-Parameter: Transkonduktanzkoeffizient, $BETA = \beta/2$
BF	Parameter: Maximale Stromverstärkung im Normalbetrieb eines BJT
BR	Parameter: Maximale Stromverstärkung im Inversbetrieb eines BJT
b_i	Binärer Wert
BV	Parameter: Durchbruchspannung eines pn-Übergangs
C	Verhältniszahl
$CMRR$	Parameter: Gleichtaktunterdrückung
$C1$	Kapazität: Referenzbezeichner
C_{oo}	Koppelkapazität: Kurzschluss im Betriebsfrequenzbereich
C_D	Kapazität: Diffusionskapazität eines pn-Übergangs
C_j	Kapazität: Sperrschichtkapazität eines pn-Übergangs
$CJ0$	Parameter: Sperrschichtkapazität eines pn-Übergangs bei 0 V
CJC	Parameter: Sperrschichtkapazität der CB-Diode eines BJT bei 0 V
CJE	Parameter: Sperrschichtkapazität der EB-Diode eines BJT bei 0 V
CJS	Parameter: Substratkapazität eines pn-Übergangs bei 0 V
CGD	Parameter: Gate-Drain Kapazität eines FET
CGS	Parameter: Gate-Source Kapazität eines FET
CDS	Parameter: Drain-Source Kapazität eines FET
c_0	Lichtgeschwindigkeit $c_0 = 2.997925$ m/s
D	Digitalwort
$D1$	Diode: Referenzbezeichner
dB	Logarithmisches Maß einer Verhältniszahl a in dB: $20\log(a)$
dBm	Logarithmisches Maß einer Leistung a bezogen auf 1 mW: $10\log(a/1 \text{ mW})$

$E1$	Spannungsgesteuerte Spannungsquelle: Referenzbezeichner
e	Konstante: $e = 2.7182818$
e	Elementarladung $1,602 \text{ E} - 19 \text{ As}$
EG	Parameter: Bandabstand (bei Si ist $EG = 1,11 \text{ eV}$)
F	Rauschzahl
$F1$	Stromgesteuerte Stromquelle: Referenzbezeichner
FC	Parameter: Koeffizient zur Beschreibung der Spannungsabhängigkeit der Sperrschichtkapazität C_j eines pn-Übergangs
f	Frequenz (allgemein)
f_g, f_1, f_2	Eckfrequenzen
f_T	Parameter: Transitfrequenz
$G1$	Spannungsgesteuerte Stromquelle: Referenzbezeichner
\underline{g}	Komplexe Schleifenverstärkung
g_m	Kleinsignalsteilheit im Arbeitspunkt
$H1$	Stromgesteuerte Spannungsquelle: Referenzbezeichner
I	Strom; DC-Wert bzw. statischer Wert, Amplitude
$I^{(A)}$	Strom im Arbeitspunkt
$\underline{I}, \underline{I}_1$	Strom; komplexer Zeiger: AC-Wert
i, i_1	Strom; zeitlicher Momentanwert: TR-Wert
i	Zweigströme in Vektorform; zeitlicher Momentanwert
\hat{I}, \hat{I}_1	Strom, Scheitelwert des zeitlichen Momentanwerts
I_{CB0}	Parameter: Transistor-Sperrstrom von Kollektor zu Basis bei offenem Emitter
$I_{CÜ}$	Schalttransistor: maximaler Strom bei Übersteuerung
I_{J0}	Parameter: DC-Offsetstrom
I_{IB}	Parameter: DC-Eingangsruestrom
\underline{I}_r^2/df	Rauschstromquadrat, spektrale Größe
IBV	Parameter: Knickstrom beim Übergang eines pn-Übergangs in den Durchbruchbereich
IKF	Parameter: Knickstrom eines pn-Übergangs in Flussrichtung, oberhalb dessen gilt der „Hochstrombereich“
IKR	Parameter: Knickstrom der Rückwärts-Stromverstärkung eines BJT
IS	Parameter: Sättigungssperrstrom eines pn-Übergangs (bei Si ist in etwa $IS = 10^{-15} \text{ A}$)
ISC	Parameter: Sättigungssperrstrom der CB-Diode beim BJT
ISE	Parameter: Sättigungssperrstrom der EB-Diode beim BJT
ISR	Parameter: Rekombinationssperrstrom, bei Si beträgt ISR bei Normaltemperatur ca. 1 nA , sehr stark exemplarstreuungsabhängig
ISS	Parameter: Sättigungssperrstrom der Substrat-Diode
$I1$	Stromquelle: Referenzbezeichner
$J1$	Sperrschicht-Feldeffekttransistor: Referenzbezeichner
k	Boltzmannkonstante; $k = 1.38 \text{ E} - 23 \text{ Ws/K}$
\underline{k}	Rückkopplungsfaktor

K_0	VCO-Konstante
KF	Parameter: „Flicker“ Rauschen, Koeffizient
K_d	Phasendetektor-Konstante
KP	Parameter: Übertragungsleitwertparameter eines MOS-Transistors
L	Kanallänge eines MOS-Transistors
$L1$	Induktivität: Referenzbezeichner
$LAMBDA$	Kanalängenmodulation, $LAMBDA = \lambda$
M	Parameter: Gradationskoeffizient eines pn-Übergangs
MJC	Parameter: Gradationskoeffizient der CB-Diode eines BJT
MJC	Parameter: Gradationskoeffizient der EB-Diode eines BJT
MJS	Parameter: Gradationskoeffizient der Substrat-Diode
$M^{(\dots)}$	Modellparametersatz
M	Übertrager: Gegeninduktivität
M	Modulationsindex
$M1$	Isolierschicht-Feldeffekttransistor: Referenzbezeichner
N	Parameter: Emissionskoeffizient eines pn-Übergangs (idealtyp. Diode)
NR	Parameter: Emissionskoeffizient eines pn-Übergangs (Korrektur-Diode)
NC	Parameter: Emissionskoeffizient der CB-Diode eines BJT
NE	Parameter: Emissionskoeffizient der EB-Diode eines BJT
NS	Parameter: Emissionskoeffizient der Substrat-Diode
\underline{p}_i	komplexe Nullstellen
\underline{P}	komplexer Zählerausdruck in der Frequenzbereichsdarstellung
P	Leistung; Mittelwert
P_I	Impulsverlustleistung
P_N	Nennverlustleistung
P_V	Verlustleistung
P_{Vmax}	Maximal zulässige Gesamtverlustleistung
p	Leistung; zeitlicher Momentanwert
dP_r/df	Rauschleistung
dP_f/df	Spektrale Rauschleistungsdichte
PER	Parameter: Pulsperiode
PW	Parameter: Pulsweite
$1/\underline{Q}$	komplexer Nennerausdruck in der Frequenzbereichsdarstellung
\underline{q}_i	komplexe Polstellen
Q, Q_0	Güte eines Resonators
$Q1$	Bipolartransistor: Referenzbezeichner
Q_{DE}	Diffusionsladung eines BJT
q	Elementarladung eines Elektrons: $e = 1,6 \text{ E} - 19 \text{ As}$
r_b, RB	Basisbahnwiderstand eines BJT
RBM	Parameter: Minimaler Bahnwiderstand eines BJT
r_D	Differenzieller Widerstand einer Diode im Arbeitspunkt
r_e	Differenzieller Widerstand der Emitter-Basis Diode im Arbeitspunkt

r_0	Early-Widerstand eines BJT
$R1$	Ohmscher Widerstand: Referenzbezeichner
R_L^*	Wirksamer Lastwiderstand; Zusammenfassung wirksamer Widerstände
RS	Parameter: Bahnwiderstand einer Diode
R_{th}	Wärmewiderstand
$R_{th,jG}$	Wärmewiderstand zwischen „Junction“ und Gehäuse
$R_{th,jU}$	Wärmewiderstand zwischen „Junction“ und Umgebung
$R_{th,GK}$	Wärmewiderstand zwischen Kühlkörper und Gehäuse
$r_{th,jG}$	Dynamischer Wärmewiderstand zwischen „Junction“ und Gehäuse
$r_{th,jU}$	Dynamischer Wärmewiderstand zwischen „Junction“ und Umgebung
\underline{s}	komplexe Frequenz $\underline{s} = j\omega$ (ohne Realteil)
s	„free“ Quantity
$S1$	Spannungsgesteuerter Schalter: Referenzbezeichner
T	Temperatur in °C bzw. absolut in K
T_j	Sperrschichttemperatur eines Halbleiters
T_{jmax}	Maximal zulässige Sperrschichttemperatur eines Halbleiters
T_G	Gehäusetemperatur
TF	Parameter: ideale Vorwärts-Transitzeit eines BJT
TR	Parameter: ideale Rückwärts-Transitzeit eines BJT
TT	Parameter: ideale Transitzeit einer Diode
T_U	Umgebungstemperatur
t	Zeit
t_d	Verzögerungszeit
t_f	Schaltzeit: Abschaltzeit
t_p	Pulsdauer
t_r	Schaltzeit: Einschaltzeit
T	Periodendauer
U	Spannung; DC-Wert bzw. statischer Wert, Amplitude
$U^{(A)}$	Spannung im Arbeitspunkt
$\underline{U}, \underline{U}_1$	Spannung; komplexer Zeiger: AC-Wert
$\underline{U}_{11'}$	Spannung; komplexer Zeiger: AC-Wert zwischen Knoten 1 und 1'
u, u_1	Spannung; zeitlicher Momentanwert: TR-Wert
u	Knotenspannung bzw. Zweigspannung in Vektorform; zeit. Momentanwert
$U_{B,E}$	Spannung von der inneren Basis B' zum Emitter E
\ddot{u}	Übertrager: Übersetzungsverhältnis
\ddot{u}	Schalttransistor: Übersteuerungsfaktor
U_{I0}	Parameter: DC-Offsetspannung
U_{id}	Eingangsdifferenzspannung
\underline{U}_{id}	Eingangsdifferenzspannung; komplexer Zeiger
\underline{U}_r^2/df	Spektrales Rauschspannungsquadrat
\overline{U}_r	Rauschspannung (quadratischer Mittelwert)
U_p	Schwellspannung eines FET ($U_p = V_{TO}$)

U_S	Schwellspannung einer Diode
U_T	Parameter: Temperaturspannung $kT/e = 26$ mV bei Normaltemperatur
$U1$	Referenzbezeichner einer Logikfunktion
v	Verstärkung
\underline{v}	Komplexer Wert der Verstärkung
v_{ud0}	Differenz-Spannungsverstärkung bei tiefen Frequenzen
\underline{v}_{ud}	Komplexe Differenz-Spannungsverstärkung
v_{ug}	Gleichtakt-Spannungsverstärkung
\underline{v}_{21}	Komplexe Verstärkung von Knoten 1 nach Knoten 2
V_A	Parameter: Early-Spannung eines BJT
V_{AF}	Parameter: Early-Spannung eines BJT im Normalbetrieb
V_{AR}	Parameter: Early-Spannung eines BJT im Inversbetrieb
$V1$	Spannungsquelle: Referenzbezeichner
V_i	Knotenpotenzial: Spannung von Knoten i zum Bezugsknoten
V	Spannungen von Knoten i zum Bezugsknoten in Vektorform
VJ	Parameter: Diffusionsspannung eines pn-Übergangs
V_{JC}	Parameter: Diffusionsspannung der CB-Diode eines BJT
V_{JE}	Parameter: Diffusionsspannung der EB-Diode eines BJT
V_{JS}	Parameter: Diffusionsspannung der Substrat-Diode
V_{TO}	Parameter: Abschnürspannung eines FET
W	Kanalbreite eines MOS-Transistors
X_{TI}	Parameter: Temperaturexponent des Sättigungssperrstroms I_S
X_{TB}	Parameter: Temperaturkoeffizient der Stromverstärkung eines BJT
Z	Impedanz
Z	Zählerstand
$\underline{Z}, \underline{Z}_1$	Impedanz; AC-Wert
\underline{Z}_{id}	Impedanz; AC-Wert: Differenz-Eingangswiderstand
\underline{Z}_a	Impedanz; AC-Wert: Ausgangswiderstand
$\underline{Z}_{11'}$	Impedanz: AC-Wert zwischen Knoten 1 und 1'
α_0	Kleinsignal-Stromverstärkungsfaktor $\alpha_0 = \Delta I_C / \Delta I_E$ bei tiefen Frequenzen
β_0	Kleinsignal-Stromverstärkungsfaktor $\beta_0 = \Delta I_C / \Delta I_B$ bei tiefen Frequenzen
β	Transkonduktanzwert beim Feldeffekttransistor
Δ	Änderung einer Größe
ε_r	Permittivitätszahl
ε_0	Elektrische Feldkonstante $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ As/Vm
η	Wirkungsgrad bei Treiberstufen
λ	Kanallängenmodulation
μ_n	Ladungsträgerbeweglichkeit der Elektronen
μ_r	Permeabilitätszahl
μ_0	Magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 1,256 \times 10^{-6}$ Vs/Am
v	Tastverhältnis $v = t_p / T$

ξ	Dämpfungskonstante
π	Konstante $\pi = 3,1415926$
ϕ	Phasenwinkel
$\varphi_{1/\underline{Q}}$	Phasenwinkel des komplexen Ausdrucks $1/\underline{Q}$
$\varphi_{\underline{U}_2/\underline{U}_1}$	Phasenwinkel des komplexen Ausdrucks $\underline{U}_2/\underline{U}_1$
Θ	Laplacetransformierte eines Phasenwinkels
ω	Kreisfrequenz $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$
ω_n	Eigenkreisfrequenz