

# Simulation von Röhrenverstärkern mit SPICE

PC-Simulationen von Elektronenröhren in Audioverstärkern

Bearbeitet von  
Alexander Potchinkov

2., bearbeitete und erweiterte Auflage 2015. Buch. XV, 594 S. Kartoniert

ISBN 978 3 8348 1472 2

Format (B x L): 16,7 x 23,8 cm

Gewicht: 1004 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Elektronik > Leistungselektronik](#)

Zu [Leseprobe](#)

schnell und portofrei erhältlich bei



Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>NF-Röhrenverstärker in Zeiten digitaler Audiotechnik . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Simulation elektronischer Schaltungen mit SPICE . . . . .</b>	<b>7</b>
2.1	Kurzeinführung in SPICE . . . . .	9
2.1.1	Die Syntax von SPICE . . . . .	10
2.1.2	Bauelementebibliotheken . . . . .	12
2.1.3	Elementangaben . . . . .	13
2.1.4	Spezielle Anweisungen . . . . .	17
2.2	Gleichstromanalysen . . . . .	18
2.3	Zeitbereichs- oder Transientenanalyse . . . . .	20
2.4	Frequenzbereichsanalyse . . . . .	22
2.5	Ergebnisvariablen der Analysen . . . . .	24
<b>3</b>	<b>SPICE Implementierungen für PC . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>SPICE Analysen am Beispiel einfacher passiver Netzwerke . . . . .</b>	<b>31</b>
4.1	Gleichstromanalysen am Beispiel zweier resistiver Spannungsteiler . . . . .	31
4.2	Zeitbereichsanalyse am Beispiel eines Spitzenvoltgleichrichters . . . . .	35
4.3	Frequenzbereichsanalyse am Beispiel eines Baxandall-Entzerrernetzwerks . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Verstärkerröhren, Verstärker und SPICE-Modelle . . . . .</b>	<b>43</b>
5.1	Grundlegende Eigenschaften von Elektronenröhren . . . . .	44
5.1.1	Eigenschaften der Röhrendioden . . . . .	45
5.1.2	Eigenschaften der Verstärkerröhren . . . . .	49
5.2	Verstärker . . . . .	62
5.2.1	Verstärkerröhrenkapazitäten . . . . .	63
5.2.2	Lineare Ersatzschaltungen für Verstärkerröhren und -Schaltungen . . . . .	63
5.2.3	Verstärkergrundschaltungen mit einer Verstärkerröhre . . . . .	67
5.2.4	Dimensionierung einer Verstärkerstufe . . . . .	75
5.2.5	Kopplung zwischen zwei Verstärkerstufen . . . . .	76
5.2.6	Rechenbeispiele: Verstärker mit Gegenkopplung über zwei Stufen . . . . .	79

5.3	SPICE-Triodenmodelle . . . . .	88
5.3.1	Raumladungsmodelle für Trioden . . . . .	88
5.3.2	Heuristische Triodenmodelle . . . . .	91
5.4	Test der Triodenmodelle . . . . .	96
5.4.1	Test 1: Kennlinienfeldertest, Triode ECC82 . . . . .	97
5.4.2	Test 2: Arbeitspunktetest, Triode ECC82 . . . . .	98
5.4.3	Differentielle-Kennwerte-Test, Triode ECC82 . . . . .	100
5.4.4	Test 4: Schaltungstest, Triode ECC82 . . . . .	104
5.5	SPICE-Pentodenmodelle . . . . .	105
5.5.1	Raumladungsmodelle von Pentoden . . . . .	106
5.5.2	Heuristische Pentodenmodelle . . . . .	113
5.6	Test der Pentodenmodelle . . . . .	116
5.6.1	Test 1: Kennlinienfeldertest, Pentode EL34 . . . . .	117
5.6.2	Test 2: Arbeitspunktetest, Pentode EL34 . . . . .	118
5.6.3	Differentielle-Kennwerte-Test, Pentode EL34 . . . . .	120
5.6.4	Test 4: Schaltungstest, Pentode EL34 . . . . .	123
5.7	Auswertung der Tests der Verstärkerröhrenmodelle in 5.4 und 5.6 . . . . .	125
6	<b>Spice-Simulationen von Röhrenschaltungen in Beispielen</b> . . . . .	131
6.1	Frequenzgänge und Frequenzgangabweichungen bei Entzerrerverstärkern	134
6.1.1	Vorverzerrung des Verstärkereingangssignals . . . . .	135
6.1.2	Simulation von Bauelementetoleranzen . . . . .	137
6.2	Phaseninverterschaltungen . . . . .	140
6.2.1	Berechnung der Katodyne-Schaltung . . . . .	142
6.2.2	Berechnung der Paraphase-Schaltung . . . . .	150
6.2.3	Berechnung der Floating-Paraphase-Schaltung . . . . .	154
6.2.4	Berechnung der See-Saw-Schaltung . . . . .	157
6.2.5	Berechnung der Cathode-Coupled-Schaltung . . . . .	161
6.2.6	Vergleich der Phaseninverterschaltungen mit SPICE-Simulationen	165
6.3	Moderne Doppeltriodeschaltungen für Audioverstärker . . . . .	174
6.3.1	Kaskodenschaltung . . . . .	175
6.3.2	SRPP-Verstärker . . . . .	181
6.3.3	$\mu$ -Follower . . . . .	189
6.3.4	White-Cathode-Follower . . . . .	195
6.3.5	Anodenbasisschaltung mit aktiver Last . . . . .	201
6.3.6	Treiberverstärker für hohe Ausgangsspannungen . . . . .	206
6.3.7	Diskussion und Kombinationen der Doppeltriodeschaltungen . . . . .	211
6.3.8	Kombinationen von Doppeltriodeschaltungen . . . . .	217
6.4	Differenzverstärker mit Konstantstromsenken . . . . .	220
6.5	Simulierte Messung von nichtlinearen Verzerrungen . . . . .	229
6.5.1	Fouriertransformationen für periodische Signale . . . . .	231
6.5.2	DFT-basierte Fouriertransformation mit SPICE . . . . .	233

6.5.3	Testsignale der Messverfahren für nichtlineare Verzerrungen . . . . .	236
6.5.4	Simulationen der Messungen von nichtlinearen Verzerrungen . . . . .	241
6.6	Modellieren von Röhrenverstärkern mit Übertragern . . . . .	245
6.6.1	Spice Simulation eines Ultra-Linear-Verstärkers . . . . .	250
6.7	Der Anodenfolger als Grundschaltung . . . . .	254
6.7.1	Berechnung und Simulation von Anodenfolgerschaltungen . . . . .	257
6.7.2	Der Anodenfolger als „Konzeptverstärker“ . . . . .	261
6.8	Aktivlautsprecher-Frequenzweichen mit Röhren . . . . .	269
6.8.1	Sallen&Key-Filter mit Einheitsverstärkern, Berechnungen und Simulation . . . . .	272
6.8.2	Simulationen der Tief- und Hochpassfilter mit nichtidealen Verstärkern . . . . .	278
6.8.3	Modifizierte Sallen&Key-Filter . . . . .	283
6.8.4	Röhrenschaltungen für Einverstärker-Filter zweiten Grades . . . . .	287
6.8.5	Eine Dreiwege-Lautsprecherfrequenzweiche . . . . .	295
7	<b>SPICE-Simulationstechniken für „Fortgeschrittene“ . . . . .</b>	299
7.1	Anwenderdefinierte SPICE-Analysen mit der .meas-Anweisung am Beispiel der Spannungsversorgung von Röhrenverstärkern . . . . .	299
7.1.1	Zur .meas-Anweisung in SPICE . . . . .	300
7.1.2	Spannungsversorgung von Röhrenverstärkern . . . . .	302
7.1.3	Gleichrichter und Ladekondensator . . . . .	303
7.1.4	Passive und elektronische Siebstufen in der Spannungsversorgung der Endröhren (Leistungsfilter) . . . . .	317
7.2	Die Funktionsquellen am Beispiel von Audiotests in der Transientenanalyse . . . . .	326
7.2.1	Drei einfache Übungen zur Verwendung der Funktionsspannungsquelle . . . . .	327
7.2.2	Sweep-Signale . . . . .	331
7.2.3	Burstsignale . . . . .	335
7.2.4	Rauschsignale . . . . .	341
7.2.5	(THD+N)-Monitor mit SPICE . . . . .	345
7.3	Rauschanalyse mit SPICE . . . . .	354
7.3.1	Einleitung . . . . .	356
7.3.2	Spektralfunktionen zur Beschreibung von Verstärkerrauschsignalen . . . . .	357
7.3.3	Thermisches Widerstandsrauschen . . . . .	362
7.3.4	Grundlegendes zur Schaltungssimulation mit Rauschgrößen . . . . .	365
7.3.5	SPICE und Widerstandsrauschen . . . . .	379
7.3.6	„Rauschfreie Widerstände“ für die SPICE-Rauschanalyse . . . . .	387
7.3.7	Stromrauschen bei Widerständen . . . . .	387
7.3.8	Bewertete und unbewertete Rauschmessungen . . . . .	392

7.3.9 Röhrenrauschen . . . . .	400
7.3.10 Modellierung und Simulation von Röhrenrauschen . . . . .	406
7.3.11 SPICE Röhrenmodelle und Röhrenrauschen . . . . .	413
7.3.12 Rauschen bei Audio-Röhrenverstärkern . . . . .	414
7.3.13 Ein Beispiel zur SPICE-Rauschanalyse . . . . .	416
<b>8 Rückkopplungen, Stabilität und Frequenzgangskorrekturen bei Röhrenverstärkern . . . . .</b>	<b>425</b>
8.1 Einleitung mit Gliederung und Glossar . . . . .	426
8.2 Das einführende Beispiel: Die Kathodenbasisschaltung ohne und mit einer Stromgegenkopplung . . . . .	433
8.2.1 Spannungsverstärkung und Innenwiderstand . . . . .	433
8.2.2 Abhängigkeit der Spannungsverstärkung von den Röhrenparametern . . . . .	436
8.2.3 Innenwiderstand und Schaltungsausgangswiderstand . . . . .	439
8.2.4 Reduktion von der Ausgangsspannung überlagerten Störspannungen durch die Gegenkopplung . . . . .	440
8.2.5 SPICE-Simulationen an Kathodenbasisschaltungen mit und ohne Stromgegenkopplung . . . . .	441
8.2.6 Ergebnisse der Betrachtungen am einführenden Beispiel . . . . .	444
8.2.7 Übergang vom einführenden Beispiel zur allgemeinen Betrachtung . . . . .	444
8.3 Die Arten der Gegenkopplung . . . . .	445
8.3.1 Strom- und Spannungsgegenkopplung als Oberbegriffe . . . . .	445
8.3.2 Die drei bei Röhrenverstärkern gebräuchlichen Gegenkopplungsarten . . . . .	449
8.4 Rückkopplungen, Gegen- und Mitkopplung bei Audioverstärkern . . . . .	455
8.4.1 Gegenkopplung, die negative Rückkopplung (negative feedback) . . . . .	456
8.4.2 Rückkopplungstechniken in Verstärkern . . . . .	458
8.5 Die Schleifenverstärkung . . . . .	459
8.5.1 Die Schleifenverstärkung der Kathodenbasisschaltung mit Stromgegenkopplung . . . . .	460
8.5.2 Die Schleifenverstärkung der Anodenfolgerschaltung . . . . .	461
8.5.3 Die Schleifenverstärkung der Kathodenfolgerschaltung . . . . .	461
8.5.4 Messtechnische und simulationstechnische Erfassung der offenen Verstärkung bei globaler Gegenkopplung . . . . .	461
8.6 Die globale Gegenkopplung in Audio-Röhrenverstärkern . . . . .	463
8.6.1 Verbesserte Unempfindlichkeit gegen Systemparametertoleranzen beim Verstärker mit globaler Gegenkopplung . . . . .	464
8.6.2 Rückkopplung und lineare Verzerrungen beim Verstärker mit globaler Gegenkopplung . . . . .	465

---

8.6.3 Rückkopplung und nichtlineare Verzerrungen beim Verstärker mit globaler Gegenkopplung . . . . .	474
8.7 Subsidiär-Rückkopplungen in Audio-Röhrenverstärkern . . . . .	483
8.7.1 Einfluß von Verstärkungsfaktor-Toleranzen beim Verstärker mit Subsidiär-Rückkopplung . . . . .	486
8.7.2 Lineare Verzerrungen beim Verstärker mit Subsidiär-Rückkopplung . . . . .	487
8.7.3 Nichtlineare Verzerrungen beim Verstärker mit Subsidiär-Rückkopplung . . . . .	491
8.7.4 Der Subsidiär-Rückkopplungsüberlagerer als Grundschaltung . .	493
8.7.5 Ein Beispiel für eine Subsidiär-Mitkopplung . . . . .	495
8.7.6 Messtechnische Erfassung der Schleifenverstärkungen beim Verstärker mit einer Subsidiär-Rückkopplung . . . . .	499
8.7.7 Berechnung eines Verstärkers mit Subsidiär-Rückkopplung . .	501
8.7.8 Simulationsbeispiel für einen Verstärker mit Subsidiär-Rückkopplung . . . . .	502
8.7.9 Ein besonderer Verstärker mit Subsidiär-Rückkopplung . . .	506
8.7.10 Der Phono-Entzerrverstärker in Aktiv-Topologie als Beispiel für eine frequenzabhängige Gegenkopplung . . . . .	509
8.8 Eine allgemeine Überlegung zum Gegenkoppeln . . . . .	513
8.9 Röhrenleistungsverstärker, Rückkopplungen, Stabilität und SPICE . .	515
8.9.1 Röhrenleistungsverstärker und Transistorleistungsverstärker .	516
8.9.2 Elektroniklabor und SPICE-Simulation . . . . .	518
8.10 Grundlagen linearer rückgekoppelter Röhrenverstärker im Hinblick auf Verstärkerstabilität . . . . .	519
8.10.1 Verstärkerstabilität über den Frequenzgang $V_S(\omega)$ . . . . .	521
8.10.2 Messung des Frequenzgangs der Schleifenverstärkung von typischen Röhrenleistungsverstärkern mit SPICE . . . . .	526
8.10.3 Frequenzgangskorrektur zur Erzielung stabiler rückgekoppelter Röhrenleistungsverstärker . . . . .	535
8.10.4 Verstärkereigenschaften in Abhängigkeit des Phasenrands .	537
8.10.5 Frequenzgangskorrektur mit Stufen-Gliedern . . . . .	542
8.10.6 Frequenzgangskorrekturen am Röhrenleistungsverstärker und ihre praktischen Ausführungen . . . . .	559
<b>Anhang Röhrenmodelle</b> . . . . .	573
<b>Anhang Formelzeichen und Symbole</b> . . . . .	575
<b>Literatur</b> . . . . .	581
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	587



<http://www.springer.com/978-3-8348-1472-2>

Simulation von Röhrenverstärkern mit SPICE  
PC-Simulationen von Elektronenröhren in Audioverstärkern  
Potchinkov, A.  
2015, XV, 594 S. 283 Abb., Softcover  
ISBN: 978-3-8348-1472-2