

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>NF-Röhrenverstärker in Zeiten digitaler Audiotechnik</b>	1
<b>2</b>	<b>Simulation elektronischer Schaltungen mit SPICE</b>	7
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>	25
<b>4</b>	<b>SPICE Analysen am Beispiel einfacher passiver Netzwerke</b>	31
4.1	Gleichstromanalysen am Beispiel zweier resistiver Spannungsteiler	31
4.2	Zeitbereichsanalyse am Beispiel eines Spitzenwertgleichrichters	35
4.3	Frequenzbereichsanalyse am Beispiel eines Baxandall-Entzerrernetzwerks	38
<b>5</b>	<b>Verstärkerröhren, Verstärker und SPICE-Modelle</b>	43
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	Test 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	Test 3: Differentielle-Kennwerte-Test, Pentode EL34 . . . . .	120
5.6.4	Test 4: Schaltungstest, Pentode EL34 . . . . .	123
5.7	Auswertung der Tests der Verstärkeröhrenmodelle 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 Doppeltriodenschaltungen 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 Doppeltriodenschaltungen . . . . .	211
6.3.8	Kombinationen von Doppeltriodenschaltungen . . . . .	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 Widerstandsräuschen . . . . .	362
7.3.4	Grundlegendes zur Schaltungssimulation mit Rauschgrößen . . . . .	365
7.3.5	SPICE und Widerstandsräuschen . . . . .	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</b>	
bei Röhrenverstärkern . . . . .	425
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
<b>8.7 Subsidiär-Rückkopplungen in Audio-Röhrenverstärkern . . . . .</b>	<b>483</b>
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
<b>8.8 Eine allgemeine Überlegung zum Gegenkoppeln . . . . .</b>	<b>513</b>
<b>8.9 Röhrenleistungsverstärker, Rückkopplungen, Stabilität und SPICE . .</b>	<b>515</b>
8.9.1 Röhrenleistungsverstärker und Transistorleistungsverstärker .	516
8.9.2 Elektroniklabor und SPICE-Simulation . . . . .	518
<b>8.10 Grundlagen linearer rückgekoppelter Röhrenverstärker im Hinblick auf Verstärkerstabilität . . . . .</b>	<b>519</b>
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>	<b>573</b>
<b>Anhang Formelzeichen und Symbole . . . . .</b>	<b>575</b>
<b>Literatur . . . . .</b>	<b>581</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>587</b>