

Inhaltsverzeichnis

1	NF-Röhrenverstärker in Zeiten digitaler Audiotechnik	1
2	Simulation elektronischer Schaltungen mit SPICE	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
3	SPICE Implementierungen für PC	25
4	SPICE Analysen am Beispiel einfacher passiver Netzwerke	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
5	Verstärkerröhren, Verstärker und SPICE-Modelle	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: Arbeitspunkttest, 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: Arbeitspunkttest, 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 Verstärkerröhrenmodelle in 5.4 und 5.6	125
6	Spice-Simulationen von Röhrenschaltungen in Beispielen	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	μ -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 Grundsaltung	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	SPICE-Simulationstechniken für „Fortgeschrittene“	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
8	Rückkopplungen, Stabilität und Frequenzgangskorrekturen 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
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 Grundsaltung	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
	Anhang Röhrenmodelle	573
	Anhang Formelzeichen und Symbole	575
	Literatur	581
	Sachverzeichnis	587