

Alexander Potchinkov

Simulation von Röhrenverstärkern mit SPICE

Alexander Potchinkov

Simulation von Röhrenverstärkern mit SPICE

PC-Simulationen von Elektronenröhren
in Audioverstärkern

Mit 100 Abbildungen und 46 Tabellen

PRAXIS



**VIEWEG+
TEUBNER**

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

Das in diesem Werk enthaltene Programm-Material ist mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Die Autoren übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Höchste inhaltliche und technische Qualität unserer Produkte ist unser Ziel. Bei der Produktion und Auslieferung unserer Bücher wollen wir die Umwelt schonen: Dieses Buch ist auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt. Die Einschweißfolie besteht aus Polyäthylen und damit aus organischen Grundstoffen, die weder bei der Herstellung noch bei der Verbrennung Schadstoffe freisetzen.

1. Auflage 2009

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Lektorat: Reinhard Dapper | Walburga Himmel

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Krips b.v., Meppel

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in the Netherlands

ISBN 978-3-8348-0642-0

Vorwort

In vielen hochwertigen Musikwiedergabeanlagen setzen Audiophile Röhrenverstärker ein, die, nicht nur nach Meinung des Autors, entscheidend für den Wohlklang verantwortlich sind. Diese Röhrenverstärker müssen (dürfen) entwickelt werden, auch dann, wenn sie im Selbstbau entstehen.

Elektronikentwicklung mit Halbleitern und Schaltungssimulation bilden schon seit geraumer Zeit eine untrennbare Einheit. Dafür gibt es viele Gründe, von denen einige in diesem Buch und noch weitere in zahlreichen anderen Büchern genannt werden. Röhrenverstärker und Schaltungssimulation werden (noch) nicht als so innig miteinander verwoben angesehen. Dafür gibt es zwar verständliche, nicht aber berechtigte Gründe. Zum einen fehlt es an Röhrenmodellen. Das Simulationsprogramm SPICE enthält keine generischen Röhrenmodelle. Zum anderen fehlt es, vor allem im Amateurbereich, an Erfahrung im Umgang mit Simulationssoftware, einer Software, die fälschlicherweise als kompliziert angesehen wird. Und schließlich fehlt es an Literatur, die sich mit genau diesem Thema befasst. Dem ist entgegenzuhalten, dass Simulationssoftware auch kostenfrei erhältlich ist und die Einarbeitungszeit, nicht zuletzt auch wegen nunmehr verfügbarer graphischer Benutzerschnittstellen, überraschend gering ausfällt. Zudem zeigt die Erfahrung, dass, wenn man einmal erst eine solche Software nutzen kann, sie nach kurzer Zeit auch intensiv genutzt wird. Wie sonst kann man an einem Abend mehrere Schaltungsvarianten testen?

Der Autor hat schon als Schüler Röhrenverstärker nachgebaut und als Student der Elektrotechnik später dann auch entwickelt. Es folgten ungefähr zwanzig Jahre Pause, in denen der Autor Audiosignale zumeist digital verarbeitet hat, denn das ist sein Beruf. Frühe Leidenschaften können ruhen, sie müssen nicht vergehen. Vor noch nicht zwei Jahren hat der Autor sich wieder den Röhrenverstärkern zugewandt, doch mittlerweile mit den Kenntnissen und Erfahrungen aus zwei Jahrzehnten Tätigkeit als Ingenieur und Universitätsprofessor in der Elektrotechnik. Eine dieser Erfahrungen ist es, zeitgemäße Softwarewerkzeuge für die Elektronikentwicklung als unverzichtbar anzusehen. Die Entwicklung der Röhrenverstärker *in der zweiten Generation* erfolgte dann schon mit der Unterstützung durch SPICE, wodurch auf den ersten Blick das Schöne mit dem Nützlichen verbunden wird und auf den zweiten Blick das zunächst vielleicht nur Nützliche zum ebenfalls Schönen wird. Die Simulation von Röhrenschaltungen gelang so hervorragend, dass auch schnell der Wunsch aufkam, nicht alles angehäuften Wissen für sich selbst zu behalten, sondern es Interessenten zur Verfügung zu stellen. Das ist die Aufgabe dieses Buchs.

In den ersten Überlegungen zum Inhalt des Buchs stand die Praxis der Simulatorbenutzung noch an recht hoher Stelle. Während des Schreibens stellte sich dann schon nach kurzer Zeit heraus, dass es sinnvoll ist, Schaltungstechnik und Schaltungsberechnung höher zu gewichten. Schließlich sank also der Anteil an Beschreibung von SPICE, denn die Beschaffung von hierzu ein- und auch weiterführender Literatur ist nicht schwierig. Die Schaltungstechnik trat in den Vordergrund. Schaltungen werden stets auf der Grundlage von Berechnungen entworfen. Ergebnisse von Berechnungen findet man auch verstreut in der schon historischen Literatur, wobei der Weg zum Ergebnis manchmal recht

dürftig beschrieben ist und die Darstellungen in verwirrender Weise voneinander abweichen können. So wird mancher Leser schon beobachtet haben, dass unterschiedliche Texte unterschiedliche Schreibweisen benutzen, frühere Entwurfsmethoden auf die Verwendung von Nomogrammen und Rechenschiebern abgestimmt waren und viele Texte eher den vordergründigen Wunsch nach Faustformeln unterstützen statt dem Leser das Rüstzeug zur Verfügung zu stellen, das er benötigt, um Schaltungen systematisch zu verstehen und anzuwenden. Erfreulicherweise lassen sich NF-Verstärker mit Röhren wegen der möglichen stromlosen Steuerung der Röhren recht leicht berechnen. Die Berechnung von Transistorschaltungen ist bereits schon etwas aufwändiger. Aus diesen Gründen wird in diesem Buch ein einheitliches Schema dargelegt, nach dem Röhrenschaltungen systematisch mit einfachsten Mitteln berechnet werden können. Das mag an manchen Stellen etwas mühsam und ausufernd aussehen, doch wenn der Leser die Schritte selbst nachvollziehen möchte, wird er, etwas Geduld vorausgesetzt, alles dazu Notwendige auch finden. Im weiteren muß man sehen, dass ohne verlässliche Rechenergebnisse die Genauigkeit der Simulationsergebnisse nicht überprüft werden kann. Der große Schaltungskonzept-Anteil am Buch wird aber auch genutzt, um fortgeschrittene Themen für den Einsatz von SPICE zu diskutieren, wie z.B. die verlässliche simulierte Messung von Klirrfaktoren.

Der Autor meint, dass man nicht notwendigerweise die alten Schaltungskonzepte der fünfziger Jahre unverändert nachbauen muß. Mittlerweile haben sich auch viele Erkenntnisse im Verstärkerbau mit Transistoren ergeben und können vorteilhaft für den Entwurf moderner Röhrenverstärker genutzt werden. Auch ist die Spannungsversorgung von Röhrenverstärkern dank moderner Bauelemente schon längst nicht mehr kritisch. Zudem stehen heute Bauelemente in weit höherer Qualität zur Verfügung und auch die Beschaffung von Röhren, dem speziellen Zubehör und Ausgangsübertragern ist via Internet, bei mittlerweile zahlreichen Versandhändlern, ein unproblematischer Vorgang.

Dem Vieweg+Teubner-Verlag und dort dem Cheflektor für die Elektrotechnik, Herrn Reinhard Dapper, spreche ich meinen Dank für den Mut aus, ein recht spezielles Buch herauszugeben, das sicher nie in den Bestsellerlisten aufgeführt werden wird. Ich danke der Firma NXP Semiconductors, gegründet von Philips, für die Erlaubnis, Diagramme aus den historischen Verstärkerröhrendatenblättern in diesem Buch abbilden zu dürfen. Diese Datenblätter sollten wegen ihrer Ausführlichkeit, wegen ihrer Darstellungsqualität und wegen ihrer Internet-Verfügbarkeit ständige Begleiter derjenigen sein, die sich mit Verstärkerröhren beschäftigen. Meiner Familie, Julia, Nikolas und Sophia, danke ich für das Ertragen eines Schreibens, das auch dem Familienleben Abstriche abverlangte.

Dem Leser wünsche ich, dass er Gewinn aus möglichst vielen Teilen dieses Buches ziehen möge, denn nur dann erhalte ich als Autor einen Lohn für meine Mühen.

Neustadt an der Weinstrasse, November 2008

Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Potchinkov

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	9
2.1.2	Bauelementebibliotheken	11
2.1.3	Elementangaben	11
2.1.4	Spezielle Anweisungen	15
2.2	Gleichstromanalysen	17
2.3	Zeitbereichs- oder Transientenanalyse	18
2.4	Frequenzbereichsanalyse	20
2.5	Ergebnisvariablen der Analysen	21
3	SPICE Implementierungen für PC	23
4	SPICE Analysen am Beispiel einfacher passiver Netzwerke	29
4.1	Gleichstromanalysen am Beispiel zweier resistiver Spannungsteiler	29
4.2	Zeitbereichsanalyse am Beispiel eines Spitzenwertgleichrichters	32
4.3	Frequenzbereichsanalyse am Beispiel eines Baxandall-Entzerrernetzwerks	35
5	Verstärkerröhren, Verstärker und SPICE-Modelle	39
5.1	Grundlegende Eigenschaften von Elektronenröhren	40
5.1.1	Eigenschaften der Röhrendioden	40
5.1.2	Eigenschaften der Verstärkerröhren	44
5.2	Verstärker	57
5.2.1	Verstärkerröhrenkapazitäten	58
5.2.2	Lineare Ersatzschaltungen für Verstärkerröhren und -Schaltungen	59
5.2.3	Verstärkergrundschaltungen mit einer Verstärkerröhre	62
5.2.4	Dimensionierung einer Verstärkerstufe	70
5.2.5	Kopplung zwischen zwei Verstärkerstufen	71
5.2.6	Rechenbeispiele: Verstärker mit Gegenkopplung über zwei Stufen	74
5.3	SPICE-Triodenmodelle	82
5.3.1	Raumladungsmodelle für Trioden	83
5.3.2	Heuristische Triodenmodelle	85
5.4	Test der Triodenmodelle	90
5.4.1	Test 1: Kennlinienfeldertest, Triode ECC82	91
5.4.2	Test 2: Arbeitspunktetest, Triode ECC82	91

5.4.3	Test 3: Differentielle-Kennwerte-Test, Triode ECC82	93
5.4.4	Test 4: Schaltungstest, Triode ECC82	98
5.5	SPICE-Pentodenmodelle	99
5.5.1	Raumladungsmodelle von Pentoden	100
5.5.2	Heuristische Pentodenmodelle	107
5.6	Test der Pentodenmodelle	110
5.6.1	Test 1: Kennlinienfeldertest, Pentode EL34	112
5.6.2	Test 2: Arbeitspunktetest, Pentode EL34	113
5.6.3	Test 3: Differentielle-Kennwerte-Test, Pentode EL34	114
5.6.4	Test 4: Schaltungstest, Pentode EL34	117
5.7	Auswertung der Tests der Verstärkerröhrenmodelle in 5.4 und 5.6	120
6	Spice-Simulationen von Röhrenschaltungen in Beispielen	127
6.1	Frequenzgänge und Frequenzgangabweichungen bei Entzerrerverstärkern	129
6.1.1	Vorverzerrung des Verstärkereingangssignals	131
6.1.2	Simulation von Bauelementetoleranzen	133
6.2	Phaseninverterschaltungen	136
6.2.1	Berechnung der Katodyne-Schaltung	138
6.2.2	Berechnung der Paraphase-Schaltung	146
6.2.3	Berechnung der Floating-Paraphase-Schaltung	150
6.2.4	Berechnung der See-Saw-Schaltung	153
6.2.5	Berechnung der Cathode-Coupled-Schaltung	157
6.2.6	Vergleich der Phaseninverterschaltungen mit SPICE-Simulationen	161
6.3	Moderne Doppeltriodenschaltungen für Audioverstärker	170
6.3.1	Kaskodenschaltung	172
6.3.2	SRPP-Verstärker	178
6.3.3	μ -Follower	185
6.3.4	White-Cathode-Follower	192
6.3.5	Anodenbasisschaltung mit aktiver Last	198
6.3.6	Treiberverstärker für hohe Ausgangsspannungen	203
6.3.7	Diskussion und Kombinationen der Doppeltriodenschaltungen	209
6.3.8	Kombinationen von Doppeltriodenschaltungen	214
6.4	Differenzverstärker mit Konstantstromsenken	217
6.5	Simulierte Messung von nichtlinearen Verzerrungen	226
6.5.1	Fouriertransformationen für periodische Signale	228
6.5.2	DFT-basierte Fouriertransformation mit SPICE	230
6.5.3	Testsignale der Messverfahren für nichtlineare Verzerrungen	233
6.5.4	Simulationen der Messungen von nichtlinearen Verzerrungen	237
6.6	Modellieren von Röhrenverstärkern mit Übertragern	242
6.6.1	Spice Simulation eines Ultra-Linear-Verstärkers	246
	Anhang	253
	Anhang Röhrenmodelle	255

Inhaltsverzeichnis	IX
Anhang Formelzeichen und Symbole	257
Literaturverzeichnis	261
Sachwortverzeichnis	263

1 NF-Röhrenverstärker in Zeiten digitaler Audiotechnik

In einem Zeitraum von einem guten Jahrzehnt, vor allem in den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts, wurden die Röhrenverstärker von den Transistorverstärkern abgelöst. Lediglich im Bereich der Musikelektronik ließen sich Röhrenverstärker als Gitarren- und Baßverstärker nicht verdrängen und werden nach wie vor wegen ihres *Sounds* als den Transistorverstärkern überlegen¹ angesehen. Unter technischen Gesichtspunkten war und ist die Ablösung der Röhrenverstärker zu begrüßen, brachte sie doch den Wegfall von Heizungen der Glühkathoden, die Integrierbarkeit, den Wegfall von Übertragern, vor allem der großen, schweren und teuren Ausgangsübertrager, die die niederohmigen Lautsprecher an die Verstärkerröhren anpassen, die Verkleinerung der Geräte, die Reduktion der Betriebsspannungen, die Erhöhung des Wirkungsgrades, die Erhöhung der Ausgangsleistung, die Reduktion linearer und vor allem nichtlinearer Verzerrungen und weitere Vorteile mehr. Auch digitale Audiotechnik ist nicht mit Röhren realisierbar. Warum aber sind Röhrenverstärker dann in den späten achtziger Jahren zurückgekommen? Warum erfreuen sie sich wachsender Beliebtheit als Hochpreis-Nischenprodukte? Warum sehen viele Nutzer von Röhrenverstärkern keinen Widerspruch zu digitalen Tonträgern als Signalquelle? Warum meinen Besitzer von Röhrenverstärkern, diese klingen einfach besser und schmücken diese Aussage mit blumigen Worten aus? Bevor Antworten, die keineswegs erschöpfend sind und es auch nicht sein können, versucht werden, wollen wir zunächst einige Beobachtungen und Fakten zusammenstellen:

- Mit den Röhrenverstärkern verschwanden auch die Röhrenhersteller in West-Europa und den USA. Manchmal sind Fabrikationsanlagen in einige der Länder verkauft worden, in denen heute Verstärkerröhren gefertigt werden.
- Die Renaissance der Röhrenverstärker wird im erheblichen Maß vom Internet gefördert, wo man Zugang zu unzähligen Bauvorschlägen, Diskussionsforen, Datenblättern, kopierten Lehrbüchern, Schaltplänen und persönlichen Berichten findet. In Deutschland ist z.B. *Jogis Röhrenbude*, www.jogis-roehrenbude.de, zu nennen, ein Forum, das sich vor allem an Selbstbauer wendet und Interessenten an dieser schönen Technik zusammenbringt.
- Röhren werden mittlerweile wieder in Stückzahlen hergestellt. Die Hersteller sind in Russland wie Svetlana in St. Petersburg und SOVTEK, das als Handelskonsortium auch Verstärkerröhren "labelt", der Slowakei, in China und weiteren Ländern des ehemaligen Ostblocks. Es werden auch wieder betagte Traditionsröhren

¹Diese Überlegenheit ist so stark, daß man sogar versucht, mit Verfahren der digitalen Signalverarbeitung den Röhrensound nachzubilden [Zoe02].

wie die Telefunken-Leistungspentode EL156 von Tungsol wiederaufgelegt und sogar neue Typen entwickelt wie die Doppeltriode ECC99 von JJ-Electronics in der Slowakischen Republik oder die Leistungspentode KT90 von EI-RC in Serbien. Darüber hinaus gibt es ein endliches Angebot an NOS-Röhren (new old stock). Es handelt sich um gelagerte, aber ungebrauchte Röhren der ehemaligen Traditionshersteller wie Telefunken, Valvo oder RCA. Aus gegenwärtiger Sicht ist die Beschaffung von Verstärkerröhren unproblematisch und auch bei akzeptablen Kosten gesichert.

- Röhrenverstärker gehören zu einem Nischenmarkt, der dadurch gekennzeichnet ist, dass die Konsumenten ein hohes bis sehr hohes Preisniveau akzeptieren und es oft vielleicht sogar fordern, um die Exklusivität der Produkte zu unterstreichen. Röhrenverstärker sind oft Prestigeprodukte.
- *Röhrenverstärker klingen besser als Transistorverstärker.* Dieses Argument ist das stärkste und das schwächste zugleich. Es ist stark, weil die Anwender von seiner Richtigkeit überzeugt sind, und es ist schwach, da es sich, wenigstens z.Zt., nicht objektiv, d.h. mit Messverfahren, belegen läßt. Vielmehr ist aus Sicht der Systemtheorie der Röhrenverstärker seinem Halbleiter-Nachfolger weit unterlegen.
- Zur Begründung der unterschiedlichen Klangeindrücke von Transistor- und Röhrenleistungsverstärkern gibt es viele esoterische Deutungsversuche auf der Grundlage mehr oder weniger plausibler Annahmen zur unterschiedlichen Charakteristik der nichtlinearen Verzerrungen von Transistoren und Röhren. Es sind aber auch schon wohlbegründete Aussagen formuliert worden. Eine wichtige Grundannahme ist es, Leistungsverstärker und Lautsprecher nicht getrennt, sondern als eine Einheit zu sehen. Eine solche Einheit ist ein elektroakustisches System mit einer elektrischen Eingangsschnittstelle und einer akustischen Luftschall-Ausgangsschnittstelle. In seinem Inneren treten Verstärker und Lautsprecher in Wechselwirkung. Leach [Lea05] führt aus, dass der größere Dämpfungsfaktor der Röhrenverstärker zu einer Frequenzgangverzerrung, einer linearen Verzerrung, führt. Er argumentiert, dass vor allem im Bereich der Tieftonlautsprecherresonanzfrequenz, also bei niedrigen Frequenzen, eine Betragsfrequenzgangserhöhung zu sehen ist, die für den "warmen" Klang der Röhrenverstärker verantwortlich ist. Aus dieser Perspektive müsste man einem Transistorverstärker zu einem Röhrenverstärkerklang verhelfen können, indem man einen 2Ω -Widerstand zwischen Verstärker und Lautsprecher einfügt.
- Hohe Klirrfaktoren und geringe Dämpfungsfaktoren als Folge hohen Innenwiderstands sind Ergebnisse der bei Röhrenverstärkern nur im begrenzten Maße anwendbaren linearisierenden Rückkopplung (Gegenkopplung).
- Röhrenverstärker sind sogar im und beim PC angekommen. So sind PC-Boards mit Trioden am Soundsystem-Ausgang erhältlich oder externe Soundsysteme mit Röhrenunterstützung.
- Seit einigen Jahren werden auch wieder hochwertige Studiomikrophone mit Röhrenverstärkern gebaut [Fey07]. Über viele Jahre hinweg wurden hierfür Feldeffekttran-

sistoren verwendet und nun kehrt man, vielleicht sogar reumütig, zum Röhrenverstärker zurück.

- Röhrenverstärker sind teuer. Sie sind teuer, weil viel Handarbeit zu ihrer Herstellung nötig ist und weil viele teure Komponenten verbaut werden müssen, die wegen der notwendigen hohen Spannungsfestigkeit und der unvermeidlichen Wärmeentwicklung groß sind. Die bereits angesprochenen notwendigen Übertrager sind sehr teuer und auch die Röhren selbst verursachen Kosten und unterliegen, vor allem die Leistungsröhren, einer Alterung, die von ungünstigen Betriebsbedingungen, z.B. Betrieb mit hoher Verlustleistung, beschleunigt wird.
- Man kann Röhrenverstärker nur mit Schwierigkeiten ohne Abgleichelemente aufbauen. Wegen der relativ hohen Kosten der Röhren und wegen notwendiger Röhrenheizungen unterscheiden sich Röhrenschaltungen von Transistorschaltungen erheblich. Betrachtet man sich Schaltpläne von Transistorverstärkern, so erkennt man den oft erheblichen Schaltungsaufwand mit Konstantstromquellen, Stromspiegeln etc. zur Festlegung und Stabilisierung der Arbeitspunkte. Röhrenverstärker hingegen werden mit einem Minimalaufwand an Röhren konstruiert und dies verlangt dann die Anwendung von Trimmern für die Einstellung der Arbeitspunkte.
- Von Vorteil ist, dass die Schaltungskonzepte von Röhrenverstärkern vergleichsweise einfach sind, was vor allem den Selbstbau vereinfacht. Dies ist ein nicht zu unterschätzender Aspekt, denn das traditionelle Elektronikbasteln ist in den Zeiten von Billiggeräten, FPGA, VHDL, μC , Prozessoren, SMD etc. in den Hintergrund getreten.
- Die in Europa weitverbreitete Hobbyelektronikzeitschrift *Elektor* hat in den zurückliegenden Jahren mehrere Röhrenverstärkerschaltungen für den Selbstbau veröffentlicht. Darüber hinaus wurden vier Sonderhefte und mehrere Bücher zum Thema herausgegeben.

Zusammenfassend läßt sich anführen, dass Röhrenverstärker zwar im steigenden Umfang hergestellt und verkauft werden, aber nie wieder einen Massenmarkt finden werden. Sie werden nicht die Halbleitertechnik im Audibereich ablösen, so wie sie einst von der Halbleitertechnik abgelöst worden sind. Röhrenverstärker sind exklusive Prestigeprodukte und werden als "Hingucker" im Zentrum der Heimstereoeinrichtungen stehen und in dieser Rolle auch die Funktion von Einrichtungsgegenständen mit übernehmen.

Die gegenwärtige Entwicklung in der Audiotechnik von mehr- bis vielkanaliger Wiedergabe (Dolby Surround, DTS usw.) bis hin zur komplexen virtuellen Akustik mit Wellenfeldsynthese verbietet die Anwendung von Röhrentechnik aus wirtschaftlichen Gründen und auch aus Gründen des Platzbedarfs. Mit dieser Perspektive könnte man meinen, dass in naher Zukunft Röhrenverstärker auch wieder verschwinden werden, d.h. zeitgleich mit dem Verschwinden der stereophonen Musikkwiedergabe. Aber, wer wie der Autor gerne Lieder hört, z.B. Schumann-Lieder mit dem 1966 verstorbenen Tenor Fritz Wunderlich, will das sicher nicht mit Dolby-Surround oder IOSONO-Soundsystemen zur

Klangfeldsynthese für ein dreidimensionales Klangerlebnis tun, mit denen man Fritz Wunderlich quasi als aufgescheuchte singende Biene durch sein Wohnzimmer fliegen lassen könnte.

Wenn man einräumt, dass Röhrenverstärker heutzutage hergestellt werden und das Geschäft mit Ihnen sich ausweitete, dann sollten sich vor allem die Entwickler mit der Frage auseinandersetzen, ob sich nicht nur der Nachbau alter und bewährter Technik lohnt, sondern ob auch eine Weiterentwicklung sinnvoll ist. Kann man vielleicht sogar von den Schaltungskonzepten lernen, die sich in mehreren Jahrzehnten Transistorverstärkerbaus als vorteilhaft herausgestellt haben? Ein einfaches Beispiel ist der Differenzverstärker, die zentrale Komponente nahezu aller NF-Transistorverstärker (vor allem der Operationsverstärker). Differenzverstärker, einschließlich der gerne verwendeten Konstantstromquellen zur Erhöhung der Gleichtaktsignalunterdrückung und Vereinfachung der Arbeitspunkteinstellung, lassen sich natürlich auch mit Verstärkerröhren aufbauen. Davon hat man früher im Bereich der NF-Röhrenverstärker wenig Gebrauch gemacht, abgesehen von einer recht bekannten Phaseninverterschaltung, der sog. *long tailed pair* Schaltung [Lan53]. Die Vorteile der Differenzverstärker, wie Reduktion nichtlinearer Verzerrungen und konsequente symmetrische Signalverarbeitung vom Verstärkereingang bis zur Gegentaktendstufe, lassen sich aber auch bei Röhrenverstärkern nutzen. Wir wollen darauf hinaus, festzustellen, dass sich auch die Neuentwicklung von Röhrenverstärkern lohnt, in die nun verfügbare Kenntnisse einfließen. In diesem Zusammenhang möchten wir auf zahlreiche aktuelle Vorschläge zu übertragerlosen Röhrenleistungsverstärkern, Arbeiten zur Verwendung von Ringkernausgangsübertragern mit unterschiedlichen Schaltungstopologien [Vee99] und auch auf einige Patente der letzten 20 Jahre hinweisen, die Schaltungskonzepte mit Röhren zum Gegenstand haben. Ein solches Konzept wird in diesem Buch noch besprochen und simuliert werden. Und eben diese Entwicklung von Röhrenverstärkern kann von Computersimulationen gewinnbringend unterstützt werden. An dieser Stelle möchte das vorliegende Buch helfen, moderne Entwicklungswerkzeuge für die Entwicklung von Röhrenverstärkern zu nutzen. Es sollen auch nicht die zahlreichen Interessierten an dieser Technologie vergessen werden, die einige Fragen zu den Vorteilen bestimmter Schaltungskonzepte, deren Versuche einer Beantwortung bislang oft in Glaubenskriegen ausarteten, auf der Grundlage von Simulationen und der Interpretation von Simulationsergebnissen beantworten wollen. Jetzt sind wir an dem Punkt angekommen, der Anlass für das Schreiben dieses Buches war. Welchen vielfältigen Nutzen bringt ein Schaltungssimulator wie SPICE für die Analyse und Entwicklung von Röhrenschaltungen?

- Experimentieraufbauten sind bei Röhrenverstärkern vergleichsweise teuer. Sie sind wegen der notwendigen hohen Spannungen gefährlich und sie erfordern bei Leistungsverstärkern den Einsatz von Übertragern, die teuer sind und für Experimente auch nur mit erheblichem Zeit- und Kostenaufwand geändert werden können. Hier ist auch anzumerken, dass die Hersteller der Verstärker oft nicht die Hersteller der Übertrager sind, was die Herstellung von Experimentieraufbauten erschwert.
- Vieles von dem Wissen über Praxis und Theorie der Röhrenverstärkerentwicklung

aus der Zeit der früheren Röhrenverstärker ist schon verloren gegangen. Experimente mit Simulationen können helfen, dieses nunmehr fehlende Wissen in konzentrierter Form und in kurzer Zeit zu gewinnen.

- Mit dem Internet hat man kostenfreien Zugriff auf Schaltpläne, Schaltungsbeschreibungen und SPICE-Röhrenmodelle. Man kann beispielsweise moderne Schaltungskomponenten, die die Anwendung teurer Zwischenübertrager vermeiden helfen, mit dem Simulator verstehen und beurteilen lernen.

Im Anschluß an dieses Kapitel enthält dieses Buch noch fünf weitere Kapitel. Davon sind die ersten drei sehr kurz gehalten und stellen das Schaltungssimulationsprogramm SPICE vor. Im einzelnen enthält das zweite Kapitel eine Kurzbeschreibung der SPICE-Bauelemente und Anweisungen, das dritte Kapitel eine Übersicht über die PC-Software und das vierte Kapitel Anwendungen der wichtigsten SPICE-Analysen am Beispiel passiver Netzwerke. Den Verstärkerröhren und ihrer Simulation sind die umfangreichen Kapitel 5 und 6 gewidmet, die eng aufeinander abgestimmt sind. Das Kapitel 5 stellt die Röhren- und Verstärkereigenschaften zusammen und die Modellierung der Verstärkerröhren. Man kann nach der Lektüre in der Lage sein, jede beliebige Verstärkerröhre zu modellieren, sofern nicht auf die zahlreichen über das Internet erhältlichen Röhrenmodelle zurückgegriffen werden kann. Das sechste Kapitel enthält in sechs Abschnitten Diskussionen, Berechnungen und Simulationen von repräsentativen Röhrenschaltungen, die Teilschaltungen von NF-Verstärkern sind. Berechnung und Simulation werden in diesem Buch als gleich wichtig angesehen, zumal die Simulationsergebnisse mit den Rechenergebnissen verglichen werden müssen. Der Leser lernt in diesem Kapitel einiges über Schaltungstechnik, Berechnung von Schaltungen und manche fortgeschrittene Simulationstechnik.

2 Simulation elektronischer Schaltungen mit SPICE

Simulationen mit SPICE sind in vielerlei Hinsicht nützlich und in vielen Fällen unentbehrlich. In diesem Abschnitt sollen zwei Verwendungsbereiche hervorgehoben werden:

- Eine Simulationssoftware unterstützt ihren Anwender beim Erarbeiten von Schaltungskonzepten, was auch heißt, die bestgeeignete Schaltung aus einer Auswahl mehrerer möglicher Schaltungen zu finden. Sie ergänzt die fundamentalen Überlegungen mit der experimentellen Arbeit. Ihr besonderes Verdienst ist die hohe zeitliche Effizienz gegenüber realen Experimentieraufbauten, den Laboraufbauten.
- Im Zeitraum der Entwicklung einer konkreten Schaltung ersetzt die Simulation mit dem Rechner die Laboraufbauten wenigstens in der frühen Phase. Nach intensiver Anwendung von Simulationssoftware wird nicht nur die frühe Phase ersetzt, sondern man wird in vielen Fällen gar keine realen Aufbauten mehr vornehmen müssen. Dieser Zustand ist bei der Entwicklung komplexer Digitaltechnik schon seit geraumer Zeit üblich, denn hier sind Laboraufbauten oft nicht einmal mehr möglich.

Aus dieser Perspektive soll eine Simulationssoftware wie SPICE als simuliertes Elektroniklabor betrachtet werden. Man kann die SPICE-Analysen dann als Durchführung von Messungen betrachten, für die dem Anwender eine vorzügliche Ausstattung an Labormessinstrumenten zur Verfügung steht, unabhängig von Ort und Zeit.

Nach einem Beginn dieses Abschnitts mit einer Positivdarstellung von Simulationssoftware sollte auch eine übergeordnete Einschränkung nicht unerwähnt bleiben. Ein Simulator kann nur dann erfolgreich genutzt werden, wenn man prinzipiell selbst in der Lage ist, das gewünschte Ergebnis zu berechnen. Der Simulator vermag nichts anderes, als die zeitliche Effizienz zu steigern. Man kann aber mit Hilfe von Simulationen durchaus dazulernen, so wie es auch mit realen Experimenten im Labor möglich ist.

SPICE ist ein universelles Simulationsprogramm zur Analyse elektronischer Schaltungen [Hoe85]. Es dient, soweit es in diesem Buch benutzt wird, der Gleichstromanalyse sowie der Analyse des Schaltungsverhaltens im Zeit- und im Frequenzbereich. Die Bauelemente, aus denen die Schaltung "aufgebaut" ist, können lineare und nichtlineare Bauelemente sein. Darüber hinaus erlaubt SPICE Rauschanalysen, Sensitivitätsanalysen, Analysen von Digitalschaltungen, Temperaturverhaltensanalysen und weitere Analysen. Diese Analysen werden in diesem Buch nicht durchgeführt.

SPICE wird als abgeschlossene Simulationssoftware angeboten oder als Bestandteil von integrierter Entwurfssoftware, die den Entwickler vom Schaltplan über Simulation

bis hin zum Leiterplattenentwurf begleitet. SPICE ist das bekannteste und wichtigste Simulationsprogramm:

- Die wissenschaftlichen Grundlagen von SPICE stehen außer Zweifel.
- Die Wahl der (modifizierten) Knotenpotentialanalyse ist für die Rechner-Implementierung sicher die günstigste Wahl aus den bekannten Netzwerkanalyseverfahren.
- Die Software, entwickelt an der Universität Berkeley in Kalifornien, USA, wurde intensiv gepflegt und kostenfrei an die Interessenten zur Verfügung gestellt. So konnte die aus heutiger Sicht unkomfortable und auch schon nicht mehr akzeptable Benutzerschnittstelle schon vor einiger Zeit durch benutzerausgerichtete Implementierungen, meist graphisch orientiert, ersetzt werden und dennoch die SPICE-Numerik mit ihren Verfahren integriert werden.
- Die in SPICE verwendete Technik der adaptiven numerischen Integration ist numerisch besonders stabil und günstig. Für ihre Entwicklung wurden ausführliche Tests von mehreren Integrationsverfahren auf ihre Anwendungstauglichkeit durchgeführt und dokumentiert.
- Das Programm verfügt nur über vergleichsweise wenige und leicht erlernbare Kommandos, die die Einarbeitungszeit überraschend kurz halten. Die Einarbeitungszeit ist deswegen überraschend kurz, da man es mit einem Programm auf einem sehr hohen Niveau zu tun hat, das ein außerordentlich leistungsfähiges und schon längst unverzichtbares Entwicklungswerkzeug darstellt.
- Die Syntax der SPICE-Kommandos lehnt sich stark an die Sprech- und Denkweise von Ingenieuren an. Dieser Aspekt sollte nicht unterschätzt werden. Man erhält auch für Numerik-Software zusätzliche Softwarekomponenten für typische Berechnungen in der Elektrotechnik. Solche Softwarekomponenten sind manchmal nicht im ausreichenden Maße auf Ingenieure zugeschnitten und der Ingenieur muß eine ihm fremde und manchmal auch befremdliche Ausdrucksweise erlernen.
- Einige kommerzielle und auch nichtkommerzielle SPICE-Softwarerealisierungen verfügen über graphische Schaltplaneditoren, die die Fehleranfälligkeit der ursprünglich benutzten textbasierten Netzlisteneingabe reduzieren.
- Ein raffiniertes System von Defaultparametern der in SPICE enthaltenen Modelle und der Analysemethoden ermöglicht für viele Simulationen zufriedenstellende Ergebnisse, auch wenn der Anwender nur sehr wenige Bauelementeinformationen zur Verfügung stellen kann. Jeder Ingenieur weiß, dass dieser Zustand der Normalzustand ist. Wenn Ergebnisse nicht zufriedenstellend ausfallen und/oder mehr und mehr Informationen zur Verfügung stehen, muß man sich mit den Details von SPICE auseinandersetzen. Zumeist ist man dann aber schon soweit eingearbeitet, dass man in diesem Stadium die weitere Auseinandersetzung als Gewinn ansieht und den Wunsch verspürt, das Einsatzspektrum stetig auszuweiten.

- Die meisten Halbleiterhersteller bieten über ihre jeweilige Internetpräsenz die Möglichkeit, die SPICE-Modelle ihrer Produkte kostenfrei herunterzuladen. Vielleicht wird es in Zukunft auch einen solchen Service bei den Herstellern der Verstärkerröhren geben?

2.1 Kurzeinführung in SPICE

Ausgangspunkt einer jeden Simulation mit SPICE ist die *Netzliste* oder der Schaltplan, wenn die SPICE-Implementierung über einen graphischen Schaltplaneditor zur vereinfachten und vor allem übersichtlichen Erstellung der Netzliste verfügt. Eine Netzliste ist, kurz gesagt, ein Schaltplan in Textform. Die Netzliste definiert die Knoten des Netzwerks (der Schaltung) und die Zweigelemente, d.h. konzentrierte lineare und nichtlineare Bauelemente, Leitungen, Spannungs- und Stromquellen. Jedes Netzwerk hat einen Bezugsknoten, den Knoten 0 oder GND, auf deutsch, die (Schaltungs-)Masse. Die Begriffe Knoten, Bezugsknoten, Zweig und Masse sind dem Ingenieur und auch dem Amateurelektroniker vertraut. Wenn die Netzliste erstellt ist und es für jeden Knoten einen Gleichspannungspfad zum Bezugsknoten 0 gibt und keine Masche einen Gleichstromlaufwiderstand von Null oder unendlich aufweist und keine Syntaxfehler enthalten sind, sich die Netzliste also in ein lösbares Gleichungssystem übersetzen läßt, kann das Netzwerk in der Simulation mit einigen mächtigen Analysemethoden analysiert werden. Die Analyseergebnisse werden entweder als Textdatei oder aber mit Graphiken aufbereitet.

Die nun folgende Kurzeinführung in SPICE stellt die Bezeichnungskonventionen und die SPICE-Anweisungen zusammen. Sie ist nicht vollständig und auch nicht ausführlich, da in diesem Buch auch nicht alle Möglichkeiten von SPICE ausgenutzt werden und neben den Handbüchern zur Software im großem Umfang Literatur zu SPICE erhältlich ist. So sind wir beispielsweise nicht an den Halbleitermodellen interessiert, die ja gerade zusammen mit den professionellen numerischen Methoden das Interessanteste an SPICE bei seiner Entwicklung ausgemacht haben.

Es gibt viele Bücher zu SPICE und auch über das Internet zahlreiche Universitätsskripten, die das Arbeiten mit SPICE zum Inhalt haben. Die Kurzeinführung hier ist nicht an eine bestimmte SPICE-Implementierung gebunden. Gleichwohl werden wir im nächsten Kapitel eine bestimmte SPICE-Implementierung, das kostenfreie LtSpice des Halbleiterherstellers *Linear Technology* vorstellen, das man sich als graphische Benutzeroberfläche mit eingebettetem SPICE-Standard-Programmkern vorstellen kann.

2.1.1 Die Syntax von SPICE

Die Syntax von SPICE ist einfach. Sie kennt nur zwei Arten von Elementen, nämlich Angaben zu Schalt- oder Bauelementen und Anweisungen. Mit den Angaben zu den Bauelementen werden ihre Art und ihre Verbindungen im Netzwerk oder der Schaltung erklärt. Mit Parametern werden die Bauelementeeigenschaften festgelegt. Anweisungen, kenntlich gemacht mit einem führenden Punkt, legen fest, wie die Schaltung analysiert werden soll und wie die Analyseergebnisse aufbereitet werden sollen.

Zeichen	Bedeutung	Zeichen	Bedeutung
*	Kommentar	M	MOSFET-Transistor
A	spez. Funktionsblöcke	O	verlustbehaftete Leitung
B	Arb. Behavioral Source	Q	Bipolartransistor
C	Kapazität	R	Widerstand
D	Diode	S	spannungsgest. Schalter
E	spannungsabh. Spannungsquelle	T	verlustlose Leitung
F	stromabh. Stromquelle	U	RC-Kettenschaltung
G	spannungsabh. Stromquelle	V	unabh. Spannungsquelle
H	stromabh. Spannungsquelle	W	stromgest. Schalter
I	unabh. Stromquelle	X	Subcircuit
J	JFET-Transistor	Z	MESFET-Transistor
K	Kopplungsinduktivität	.	Anweisungskennzeichnung
L	Induktivität	+	Zeilenfortsetzung

Tabelle 2.1: Kennbuchstaben und Zeichen in SPICE

Faktor	Wert	Bezeichnung	Faktor	Wert	Bezeichnung
T	E12	10^{12} , Tera, T	U	E-6	10^{-6} , mikro, μ
G	E9	10^9 , Giga, G	N	E-9	10^{-9} , nano, n
MEG	E6	10^6 , Mega, M	P	E-12	10^{-12} , piko, p
K	E3	10^3 , kilo, k	F	E-15	10^{-15} , femto, f
M	E-3	10^{-3} , milli, m	MIL	25.4E-6	$25,4 \times 10^{-6}$, mil

Tabelle 2.2: Maßstabsfaktoren in SPICE

Für die Bauelemente verwendet SPICE bestimmte Buchstaben, die nicht beliebig verwendet werden dürfen. Auch wenn wir im deutschen Sprachgebrauch eine Spannungsquelle z.B. gerne als U1 bezeichnen würden, müssen wir ihr bei SPICE die Bezeichnung V1, entsprechend *voltage source*, geben. Die Tabelle 2.1 listet die Schaltelemente, Kennbuchstaben und speziellen Zeichen auf. Der Wert eines Bauelementeparameters wird als Dezimalzahl mit Exponenten oder als Dezimalzahl mit Maßstabsfaktor angegeben. Die Maßstabsfaktoren werden direkt (ohne Leerzeichen) angehängt und sind in der Tabelle 2.2 aufgelistet. Gültige Angaben sind beispielsweise -3.45k oder -3.45E3 und 12.9p oder 12.9E-12. Ein einfaches SPICE-Programm, zu erstellen mit einem beliebigen Texteditor, für einen Spannungsteiler mit Gleichspannungsquelle könnte lauten:

```
* Spannungsteiler
V1 in 0 10V
R2 out 0 10k
R1 out in 1k
.op
```

```
.tf V(out) V1
.end
```

Die nicht notwendige Zeile `* Spannungsteiler` erklärt einen Namen für die Schaltung. Die drei Zeilen `V1 in 0 10V`, `R2 out 0 10k` und `R1 out in 1k` stellen die Netzliste dar. Die beiden Zeilen `.op` und `.tf V(out) V1` legen mit zwei Anweisungen die beiden Schaltungsanalysen fest. Die Zeile `.end` beendet das Programm. Darauf folgende Zeilen werden vom SPICE-Interpreter ignoriert. Die Schaltung enthält drei Knoten, den Bezugsknoten 0, den Knoten `in` und den Knoten `out`. Zwischen den Knoten `in` und 0 liegt eine Gleichspannungsquelle `V1`, Pluspol am Knoten `in`, mit einer Spannung von 10V. Zwei Widerstände, `R2` mit 10k Ω und `R1` mit 1k Ω bilden den Spannungsteiler. Die beiden Anweisungen `.op` und `.tf` legen die SPICE-Analysen fest. Das Schlüsselwort `.end` beendet das SPICE-Programm.

2.1.2 Bauelementebibliotheken

Für die in SPICE vordefinierten Bauelemente, das sind die, deren Kürzel in der Tabelle 2.1 aufgeführt werden, enthält SPICE zum Teil sehr aufwändige *Modelle*. Diese Modelle benötigen Parameter, in manchen Fällen eine große Anzahl, mit denen diejenigen Bauelemente mit Werten versehen werden, aus denen das Modell zusammengesetzt ist. Diese Modelle sind übrigens ein wichtiges Qualitätsmerkmal eines Schaltungssimulators. Mit Bauelementebibliotheken werden die Parameter individueller Bauelemente zusammengefasst. Viele Halbleiterhersteller bieten solche Bibliotheken für ihre Produkte an. Für die Parameter, die nicht auf diese Weise festgelegt werden, verwendet SPICE sog. *Defaultwerte*. Das ist auch sehr sinnvoll, da man beispielsweise für spezielle Transistoren, für die der Hersteller kein Modell zur Verfügung stellt, erhebliche Schwierigkeiten hat, die Parameterwerte zu bestimmen. Kommerzielle SPICE-Produkte bieten für diesen Vorgang manchmal Hilfsprogramme an. Leider enthält SPICE keine Röhrenmodelle, so dass wir die später benötigten Modelle in der Form von Teilschaltungen selbst erstellen müssen.

2.1.3 Elementangaben

In diesem Teilabschnitt folgt eine kurze Auflistung der von SPICE verwendeten Elementangaben, mit denen Bau- oder Schaltungselemente beschrieben werden. Mit den spitzen Klammern `<.>` markieren wir die notwendigen Benutzerangaben, mit den vertikalen Strichen `|.` die Knotennummern oder Knotennamen und mit den eckigen Klammern `[.]` optionale Benutzerangaben. Für die optionalen Benutzerangaben sieht SPICE sinnvolle Defaultangaben vor, die optional "überschrieben" werden können.

Widerstand

```
R<name> |+node| |-node| <value> [TC= <TC1> [, <TC2>]]
```

Es bezeichnen `TC1` einen linearen und `TC2` einen quadratischen Temperaturkoeffizienten. Die Bezeichnungen `+node` und `-node` beziehen sich nicht auf

die Polarität des Widerstands, sondern auf die Zählfeilrichtung des Stromes durch den Widerstand bei einer SPICE-Analyse.

Beispiel R1 1 0 4.7E3 TC=0.02

Ein $4,7\text{k}\Omega$ -Widerstand zwischen den Knoten 1 und 0 mit einem linearen Temperaturkoeffizienten von $0,02/\text{K}$ oder $R=4,7\text{k}\Omega \times (1 + 0,02 \times 4,7\text{k}\Omega \times (T-T_0))$ (T: Temperatur T_0 : Bezugstemperatur)

Kondensator

C<name> |+node| -node| <value> [IC=<value>]

Es bezeichnet IC (*initial conditions*) den Wert der Kondensatorspannung zum Zeitpunkt $t=0$. Die Bezeichnungen +node und -node beziehen sich nicht auf die Polarität des Kondensators, sondern auf die Polarität der Kondensatorspannung zum Zeitpunkt $t=0$.

Beispiel C1 2 0 56n IC=5V

Ein 56nF -Kondensator zwischen den Knoten 2 und 0, der zum Zeitpunkt $t=0$ auf die Spannung 5V aufgeladen ist

Induktivität

L<name> |+node| -node| <value> [IC=<value>]

Es bezeichnet IC (*initial conditions*) den Wert des Spulenstroms zum Zeitpunkt $t=0$. Die Bezeichnungen +node und -node beziehen sich nicht auf die Polarität der Induktivität, sondern auf die Polarität des Spulenstroms zum Zeitpunkt $t=0$.

Beispiel LS 4 3 20u

Eine $20\mu\text{H}$ -Spule zwischen den Knoten 4 und 3, die zum Zeitpunkt $t=0$ stromlos ist (Defaultwert).

Kopplungsanweisung

K<name> L<name> L<name> [L<name> [L<name>...]] <value>

Die Kopplungsanweisung stellt die "magnetische" Kopplung zwischen wenigstens zwei Induktivitäten her. Der Kopplungsfaktor definiert das Verhältnis zwischen Haupt- und Streuinduktivität. Eine genaue Definition und Anwendung der Kopplungsanweisung befindet sich im Abschnitt 6.7.

Beispiel K12 L1 L2 k

Zwei zuvor definierte Induktivitäten L1 und L2 werden miteinander gekoppelt. Die Induktivitäten setzen sich aus Streu- und Hauptinduktivität zusammen. Es gilt $L_1 = L_{1h} + L_{1\sigma}$, $L_{1h} = L_1 k^2$, $L_{1\sigma} = L_1(1 - k^2)$ und $L_2 = L_{2h} + L_{2\sigma}$, $L_{2h} = L_2 k^2$, $L_{2\sigma} = L_2(1 - k^2)$.

Spannungsquelle (Gleichspannung)

V<name> |+node| -node| [DC] <value>

Beispiel VB 1 0 380

Eine Gleichspannung zwischen 1 (Pluspol) und 0 (Minuspol) mit einem Wert von 380V. Die beiden Angaben VB 0 1 380 und VB 1 0 -380 würden eine entsprechende "negative" Gleichspannung ergeben.

Stromquelle (Gleichstrom)

I<name> |+node| |-node| [DC] <value>

Beispiel I4 0 1 20u

Ein Gleichstrom von $20\mu\text{A}$ vom Knoten 0 zum Knoten 1.

Spannungsgesteuerte Spannungsquelle

E<name> |+node| |-node| |+cnode| |-cnode| <voltage gain>

Eine spannungsgesteuerte Spannungsquelle ist ein aktiver Vierpol. An den Eingangsklemmen, bezeichnet mit |+cnode| und |-cnode|, wird eine Steuerspannung angelegt. An den beiden Ausgangsklemmen |+node| und |-node| läßt sich die mit dem Faktor <voltage gain> verstärkte Eingangsspannung abgreifen. Die Steuerung erfolgt leistungslos. Mit einem solchen Konstrukt ließe sich z.B. eine Verstärkerröhre darstellen, die dann noch ausgangsseitig um den Quellinnenwiderstand ergänzt werden muß.

Beispiel E1 2 0 1 0 60

Zwischen den Ausgangsklemmen 2 und 1 liegt das 60-fache der Spannung zwischen den Klemmen 1 und 0 an.

Spannungsgesteuerte Stromquelle

G<name> |+node| |-node| |+cnode| |-cnode| <transconductance value>

Eine spannungsgesteuerte Stromquelle ist ein aktiver Vierpol. An den Eingangsklemmen, bezeichnet mit |+cnode| und |-cnode|, wird eine Steuerspannung angelegt. An den beiden Ausgangsklemmen |+node| und |-node| läßt sich die mit dem Faktor <transconductance value> (Steilheit) abgebildete Eingangsspannung als Strom abgreifen. Die Steuerung erfolgt leistungslos. Mit einem solchen Konstrukt ließe sich z.B. ein Bipolartransistor darstellen, der dann noch ausgangsseitig um den Quellinnenleitwert und eingangsseitig um den Eingangswiderstand ergänzt werden muß.

Beispiel G1 2 0 1 0 2e-3 Zwischen den Ausgangsklemmen 2 und 1 fließt der Strom, der sich als Produkt der Steilheit von $S=2\text{mA/V}$ und der Spannung zwischen den Klemmen 1 und 0 ergibt.

Stromgesteuerte Spannungsquelle

H<name> |+node| |-node| |+cnode| |-cnode| <transresistance value>

Eine stromgesteuerte Spannungsquelle ist ein aktiver Vierpol. Zwischen den Eingangsklemmen, bezeichnet mit `|+cnode|` und `|-cnode|`, wird ein Steuerstrom eingespeist. An den beiden Ausgangsklemmen `|+node|` und `|-node|` läßt sich der mit dem Faktor `<transresistance value>` (Transferwiderstand) abgebildete Eingangsstrom als Spannung abgreifen. Die Steuerung erfolgt leistungslos. Mit einem solchen Konstrukt ließe sich z.B. ein rückgekoppelter Operationsverstärker mit einem Steuerstrom am Eingangsknoten darstellen, wobei der Transferwiderstand dem Rückkopplungswiderstand entspricht. Die Spannungsquelle ist dann noch ausgangsseitig um den Quellinnenwiderstand zu ergänzen.

Beispiel H1 2 0 1 0 1k Zwischen den Ausgangsklemmen 2 und 1 liegt die Spannung an, die dem 1000Ω -fachen des Stroms zwischen den Klemmen 1 und 0 entspricht.

Stromgesteuerte Stromquelle

`F<name> |+node| |-node| |+cnode| |-cnode| <current gain>`

Eine stromgesteuerte Stromquelle ist ein aktiver Vierpol. Zwischen den Eingangsklemmen, bezeichnet mit `|+cnode|` und `|-cnode|`, wird ein Steuerstrom eingespeist. An den beiden Ausgangsklemmen `|+node|` und `|-node|` läßt sich der mit dem Faktor `<current gain>` verstärkte Eingangsstrom als Strom abgreifen. Die Steuerung erfolgt leistungslos. Mit einem solchen Konstrukt ließe sich z.B. ein Bipolartransistor darstellen, dessen Kollektorstrom dem verstärkten Basisstrom entspricht. Ausgangsseitig ist der Quellinnenleitwert zu ergänzen.

Beispiel F1 2 0 1 0 200

Zwischen den Ausgangsklemmen 2 und 1 fließt der Strom, der sich als Produkt der Stromverstärkungsfaktors 200 und dem Strom zwischen den Klemmen 1 und 0 ergibt.

Analogue behavioural modelling Mit dem Betriebsmodus *analogue behavioural modelling* wird SPICE um mathematisch definierbare Schaltungsteile ergänzt. Mit Hilfe von allgemein steuerbaren Spannungs- und Stromquellen können so vielfältige Funktionalzusammenhänge modelliert werden. Die allgemein steuerbaren Quellen sind eine Erweiterung von SPICE in vielen Implementierungen, so auch bei dem in diesem Buch vorgestellten LtSpice. Man kann mit diesen Quellen

- Funktionsblöcke durch ihre mathematische Beschreibung und nicht durch ihren physikalischen Aufbau aus Bauelementen definieren und
- Bauteile simulieren, für die es keine Modelle bzw. Makromodelle in der Bibliothek gibt und die durch ihre U-I-Kennlinie definiert sind. Das ist der Weg, mit dem die Verstärkerröhren modelliert werden.

Steuernde Größen sind

- Spannungen und Ströme,
- tabellierte Kennlinien, wobei zwischen den Tabellenwerten linear interpoliert wird und
- Laplacetransformierte.

Zwei Beispiele aus den später beschriebenen Simulationen verdeutlichen die Anwendung.

In einem Triodenmodell finden wir eine SPICE-Anweisung

```
E1 2 0 VALUE={V(A,K)+25*V(G,K)}.
```

Zwischen den Klemmen 2 und 0 liegt eine Spannungsquelle, deren Spannung sich aus der Linearkombination zweier Netzwerkspannungen zwischen A und K (Spannung zwischen Anode und Kathode) und G und K (Spannung zwischen Gitter und Kathode), die mit dem Verstärkungsfaktor 25 multipliziert wird, ergibt.

In einer Simulation verwenden wir eine spannungsgesteuerte Spannungsquelle, mit der wir ein inverses RIAA-Filter (Schneidekennlinie der Langspielplatten) nachbilden, dessen Systemfunktion als rationale Laplace-Transformierte definiert ist,

```
E1 |+node| |-node| |+cnode| |-cnode|
+ LAPLACE=(1+3180u*S)*(1+75u*S)/((1+318u*S)*(1+3.18u*S)*9.897).
```

Zwischen den Steuerspannungs-Klemmen |+cnode| und |-cnode| wird die Filtereingangsspannung angeschlossen und an den Klemmen |+node| |-node| wird die Filterausgangsspannung abgegriffen.

2.1.4 Spezielle Anweisungen

Die Anweisung `.model` dient dazu, für die in SPICE enthaltenen Bauelementemodelle Parameter zu spezifizieren. Mit den SPICE-Anweisungen

```
Q1 2 1 0 BC413B
.model BC413B NPN BF=230 RB=210 TF=3N
+ CJE=7P CJC=8P IS=72F VAF=15 KF=13F
```

wird der NPN-Bipolartransistor BC413B spezifiziert, falls er nicht Teil der Bipolartransistor-Bibliothek ist. Genauer gesagt, es wird das SPICE-eigene Transistormodell mit Parametern spezifiziert. Man kann auch auf diese Weise z.B. zwei Transistoren in einem Differenzverstärker unterschiedliche Stromverstärkungen BF zuweisen und so die Auswirkungen dieses Unterschieds auf die Gleichtaktunterdrückung simulieren.

Mit der `.param`-Anweisung lassen sich Variablen definieren, die nicht nur Konstanten sein müssen, sondern auch durch Berechnung gewonnen werden können. Beispiele sind die Anweisungen

```
R1 1 2 {rval}
.param rval=6.8Meg
```

oder

```
R1 1 2 {rval}
.param rval={3*10k/5},
```

mit der einem Widerstand R1 ein fester oder ein berechneter Wert zugewiesen wird. Auch können so Abhängigkeiten zwischen Bauelementen erklärt werden, wie es das Beispiel

```
.param R1=1k
.param R2={10*R1}
```

zeigt.

Mit der `.step`-Anweisung können die Parameter einer Schaltung für alle Analysen variiert werden. Beispiele sind die beiden Anweisungen

```
.step LIN I1 5mA -2mA 100uA
.step PARAM rval LIST 100k 500k 1Meg
```

Mit der ersten Anweisung wird der Strom I1 linear zwischen 5 mA und -2mA mit einem Dekrement von $100\mu\text{A}$ schrittweise geändert. Mit der zweiten Anweisung wird eine als Parameter definierte Variable `rval` mit den drei gelisteten Werten 100k, 500k und 1Mega listenwertweise geändert und kann z.B. als Widerstandswert dienen.

Die Anweisung `.subckt` dient dazu, Teilschaltungen in der Form von Unterprogrammen zu definieren. Mit dieser Anweisung werden wir später unsere Röhrenmodelle definieren. Der obligate Rahmen der `.subckt`-Anweisung ist

```
.subckt Name A-Knoten
Bauelemente der Teilschaltung
.ends <Name>
```

Mit den Knoten **A-Knoten** werden die von außen zugänglichen Knoten festgelegt. Knoten innerhalb der Teilschaltung werden, sofern es nicht der globale Knoten 0 ist, wie lokale Knoten behandelt. Teilschaltungen können auch verschachtelt werden. Das Einbinden einer Teilschaltung in eine Netzliste erfolgt in der Form

```
Xname S-Knoten Name
```

Mit den Knoten **S-Knoten** werden die Netzwerkknoten festgelegt, an die die Teilschaltung angeschlossen ist.

2.2 Gleichstromanalysen

SPICE enthält drei Anweisungen für Gleichstromanalysen:

- .OP
- .DC <srcnam> <Vstart> <Vstop> <Vincr> [<srcnam2> <Vstart2> <Vstop2> <Vincr2>]
- .TF V(<node>[, <ref>]) <source> oder .TF I(<voltage source>) <source>

Die Anweisung .OP, die ohne Parameter erfolgt, berechnet die Gleichstromarbeitspunkte. Hierzu werden alle Kondensatoren aus der Schaltung "entfernt" und alle Induktivitäten durch "Kurzschlüsse" ersetzt. SPICE berechnet die Knotengleichspannungen, die Zweiggleichströme und bei manchen SPICE-Softwareprodukten auch die Verlustleistungen der Bauelemente, in denen ein fließender Gleichstrom einen Gleichspannungsabfall zur Folge hat. SPICE stellt uns ein komfortables DC-Multimeter zur Verfügung, das Spannungen anzeigt, Ströme anzeigt, ohne hierfür Zweige auftrennen zu müssen, und Leistungen. Das Instrument weist automatische Bereichswahl auf und einen unendlich hohen Innenwiderstand für Spannungsmessungen, was vor allem bei Röhrenschaltungen ein klarer Vorteil ist.

Die Anweisung .DC ergänzt die Gleichstromanalysen um einstellbare Labornetzgeräte. Eine Anweisung

```
.DC Ua 200V 300V 1V
```

erhöht die Gleichspannung Ua von 200V bis 300V in 1V-Schritten und löst eine Folge von 101 .OP-Analysen aus. Die .DC-Anweisung läßt sich auch vermaschen. So würde die Anweisung

```
.DC Ua 200V 300V 1V Ug -15V 0V 0.5V
```

die beiden Spannungen Ua und Ug zwischen

```
Ua := 200V:1V:300V in 101 Schritten und
Ug := -15V:0.5V:0V in 31 Schritten
```

einstellen und so $101 \cdot 31 = 3131$.OP-Analysen auslösen. Die .DC-Analyse ist u.a. für die Aufnahme von Kennlinien der nichtlinearen Bauelemente geeignet. So könnte bei einer Verstärkerröhre die Spannung Ua für die Anodenspannung und die Spannung Ug für die Gitterspannung stehen.

Die Anweisung .TF schließlich berechnet den Gleichgrößenübertragungsfaktor und Ein- sowie Ausgangswiderstand. Mit

```
.TF V(out) V1
```

berechnet die .TF-Anweisung, ausgehend von einer unabhängigen Gleichspannungsquelle V1, den Faktor, der V(out) in Beziehung zu V1 setzt sowie zwei Widerstandswerte, den einen, den V1 "sieht" und den anderen, den man zwischen dem Knoten out und dem Bezugsknoten GND "sieht". Die Analyse ist also nützlich, wenn man zu einem Netzwerk Ersatzspannungsquelle oder Ersatzstromquelle sucht.

2.3 Zeitbereichs- oder Transientenanalyse

Für die Zeitbereichsanalyse enthält SPICE fünf Arten zeitabhängiger Spannungs- bzw. Stromquellen, die mit der Angabe

V<name> |+node| |-node| <Quellenbezeichner> <Zeitparameter>

aufgerufen werden. Entsprechende Stromquellen sind mit dem Buchstaben I statt V festzulegen. Die Quellenbezeichner sind EXP, PULSE, SIN, SFFM und PWL und sind wie folgt definiert:

- **EXP (Exponentialquelle)**

EXP V1 V2 tauD1 tauC1 tauD2 tauC2

V1: Anfangsspannung, V2: Maximalspannung, tauD1: Anstiegsverzögerungszeit, tauC1: Anstiegszeitkonstante, tauD2: Abklingverzögerungszeit, tauC2: Abklingzeitkonstante

$$v(t) = \begin{cases} V_1, & 0 \leq t < \tau_{D1}, \\ V_1 + (V_2 - V_1) \left(1 - e^{-\frac{t - \tau_{D1}}{\tau_{C1}}}\right), & \tau_{D1} \leq t < \tau_{D2}, \\ V_1 + (V_2 - V_1) \left(\left(1 - e^{-\frac{t - \tau_{D1}}{\tau_{C1}}}\right) - \left(1 - e^{-\frac{t - \tau_{D2}}{\tau_{C2}}}\right)\right), & \tau_{D2} \leq t < t_{\text{STOP}}. \end{cases}$$

- **PULSE (Impulsquelle)**

PULSE V1 V2 tauD tauR tauF tauP T

V1: Anfangsspannung, V2: Maximalspannung, tauD: Verzögerungszeit, tauR: Anstiegszeit, tauF: Abfallzeit, tauP: Pulsbreite, T: Periode

$$v(t) = \begin{cases} V_1, & 0 \leq t < \tau_D, \\ V_1 + \frac{V_2 - V_1}{\tau_R}(t - \tau_D), & \tau_D \leq t < \tau_D + \tau_R, \\ V_2, & \tau_D + \tau_R \leq t < \tau_D + \tau_R + \tau_P, \\ V_2 - \frac{V_2 - V_1}{\tau_F}(t - \tau_D - \tau_R - \tau_P), & \tau_D + \tau_R + \tau_P \leq t < \tau_D + \tau_R + \tau_P + \tau_F, \\ V_1, & \tau_D + \tau_R + \tau_P + \tau_F \leq t < \tau_D + T, \\ V_1 + \frac{V_2 - V_1}{\tau_R}(t - \tau_D - T), & \tau_D + T \leq t < \tau_D + \tau_R + T, \\ \text{u.s.w.} \end{cases}$$

- **SIN (Sinusquelle)**

SIN V0 VA f tauD df phi

V0: Gleichspannungsoffset, VA: Wechselspannungsamplitude, f: Frequenz in Hz, tauD: Verzögerungszeit in s, df: Dämpfungsfaktor, phi: Phase in Grad

$$v(t) = \begin{cases} V_0 + V_A \sin\left(2\pi \frac{\varphi}{360^\circ}\right), & 0 \leq t < \tau_D, \\ V_0 + V_A \sin\left(2\pi \left(f(t - \tau_D) + \frac{\varphi}{360^\circ}\right)\right) e^{-df(t - \tau_D)}, & \tau_D \leq t < t_{Stop}. \end{cases}$$

- **SFFM (Frequenzmodulationsquelle)**

SFFM V0 VA fC m fM

V0: Gleichspannungsoffset, V2: Wechselspannungsamplitude, fC: Trägerfrequenz, m: Modulationsindex, fM: Modulationsfrequenz

$$v(t) = V_0 + V_A \sin(2\pi f_C t + m \sin(2\pi f_M t)), \quad t \geq 0.$$

- **PWL (Quelle mit stückweise linearem Zeitverlauf)**

PWK T1 V1 T2 V2 ... TN VN

Tn: Zeitstützpunkt, n=1,...,N, Vn: Amplitudenwert zum Zeitpunkt t=Tn, n=1,...,N

$$v(t) = \begin{cases} V_1, & 0 \leq t < T_1, \\ V_1 + \frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1} (t - T_1), & T_1 \leq t < T_2, \\ \text{u.s.w.} \end{cases}$$

Für die Zeitbereichsanalyse steht die .TRAN-Anweisung (Transientenanalyse) zur Verfügung. Die .TRAN-Anweisung legt den Zeitabschnitt fest, in dem das Signal, also der Zeitverlauf einer Spannung oder eines Stroms berechnet werden. Der Zeitabschnitt beginnt mit der Zeit t=0. Die Anweisung hat die Form

.TRAN <tp> <tE> [tD] [tmax] [UIC]

Mit dem Parameter tp wurde ursprünglich dem Plotter oder dem Drucker angegeben, wieviele Abtastwerte im Zeitabschnitt [tD,tE] geplottet oder gedruckt werden sollten. Bei den heute üblichen Graphik-Darstellungen ist dieser Parameter ohne Bedeutung und kann zu Null gesetzt werden. Der Parameter tE gibt das Ende des Zeitintervalls und der optionale Parameter tD den Beginn der Datenaufzeichnung an. Mit der Wahl tD>0 können Einschwingvorgänge übergangen werden, was z.B. bei einer nachfolgenden Fourieranalyse notwendig ist. Der Parameter tmax gibt an, wie groß der Maximalzeitschritt zweier aufeinander folgender Abtastungen sein darf. Wenn dieser Parameter nicht spezifiziert ist, wählt SPICE seinen Wert zu tmax=tE/50. Man muß hier bedenken, dass SPICE Abtastzeitpunkte dynamisch bzw. adaptiv wählt, was bedeutet, dass Zeitintervalle sehr viel kleiner als tmax sein können. Die Wahl von tmax beeinflusst die

Genauigkeit einer optionalen nachfolgenden Fourieranalyse, was wir im Abschnitt 6.5 genauer diskutieren werden. Mit dem Schlüsselwort **UIC** (use initial conditions) können die Energiespeicher, Kondensatoren und Induktivitäten, mit Angaben für den Zeitpunkt $t=0$ "geladen" werden.

2.4 Frequenzbereichsanalyse

Das Netzwerk (oder die Schaltung) enthält eine oder mehrere Spannungs- oder Stromquellen der Form

$$V \text{ } [+node] \text{ } [-node] \text{ } [DC \text{ } <V0>] \text{ } AC \text{ } <V> \text{ } [<\phi>].$$

Die Quellen sind zwischen den Knoten **+node** und **-node** angeordnet und mit einem optionalen Gleichspannungsoffset **V0**, einer überlagerten sinusförmigen Wechselspannung mit der Amplitude **V** sowie der optionalen Phase **phi** festgelegt. Erst mit der Durchführung der **.AC**-Analyse wird die Frequenz f des Wechselanteils festgelegt. Auf diese Weise stellt SPICE sicher, dass alle Quellen des Netzwerks Wechselanteile mit derselben Frequenz erzeugen. Dies hat z.B. zur Folge, dass in linearen Netzwerken sämtliche Zweigwechselspannungen und Zweigwechselströme ebenfalls die Frequenz f aufweisen. Die Quellspannung gehorcht dann der Zeitfunktion

$$u(t) = V_0 + V \cos \left(2\pi f t + \varphi \frac{2\pi}{360^\circ} \right).$$

Zum Wechselanteil gehört die komplexe Amplitude

$$U = V e^{j\varphi}.$$

Mit der **.AC**-Analyse wird für ausgewählte Zweiggrößen, d.h. Zweigspannungen, Zweigströme oder auch Zweigleistungen, die komplexe Amplitude über der Frequenzvariablen berechnet und zur Verfügung gestellt. Alle Quellen haben dieselbe Frequenz, die mit der Analyse aus einem benutzerdefinierten Intervall gewählt und in benutzerdefinierter Weise variiert wird. Wenn nur eine Quelle verwendet wird und diese mit $V=1$ und $\varphi=0$ parametrisiert wird, erhält man frequenzdiskrete Übertragungsfunktionen als Analyseergebnisse. Bei anderer Wahl der Parameter muß man auf die komplexe Amplitude $V e^{j\varphi}$ normieren. Im Laborbetrieb ersetzt SPICE mit der **.AC**-Analyse den Spektrumanalysator mit Mitlaufgenerator, ein Messgerät, das teuer ist und zumeist mit erheblichem Bedienungsaufwand zu benutzen ist.

Die **.AC**-Analyse hat drei mögliche Aufrufe, die sich in der Art der *Frequenzfortschaltung* unterscheiden:

.AC DEC	<n>	<fS>	<fE>
.AC OCT	<n>	<fS>	<fE>
.AC LIN	<n>	<fS>	<fE>