

Simulation in LTspice IV

Dieses Buch richtet sich an alle LTspice-Nutzer: Vom Anfänger bis zum Profi, der mit der Entwicklung umfangreicher Schaltungen befasst ist. Seit über 20 Jahren ist LTspice IV die Simulationssoftware schlechthin. Unglücklicherweise ist die Hilfe-Datei die einzige Dokumentation zu dieser Software. Sie ist unvollständig und weit hinter dem Entwicklungsstand der Software zurück. Viele Befehle und Funktionen sind nicht oder nur unzureichend erklärt. Dieses Buch schließt diese Lücke!

In diesem Buch werden die fünf wichtigsten Editoren in LTspice IV beschrieben. Es werden deren Ausführung und der Betrieb der Software erklärt. In den darauf folgenden Kapiteln werden die Definitionen und Befehle – die so genannten Simulationsdirektiven – ausführlich erläutert und mit Beispielen veranschaulicht. Kapitel 12 behandelt das Herunterladen von SPICE-Modellen und Teilschaltungen sowie die Generierung von Symbolen für die nachfolgende Verwendung. Quellen, passive, aktive und Spezialbauteile und deren Konfiguration sind Gegenstand der Kapitel 13 bis 16. In Kapitel 17 dreht sich alles um Speicherdrosseln und Transformatoren. Hierfür bietet LTspice IV ein nichtlineares Modell, das auch Sättigung und Hysterese berücksichtigt. Kapitel 18 legt den Schwerpunkt auf das Control Panel. Hierbei handelt es sich um ein echtes Dashboard, das alle LTspice IV-Einstellungen zugänglich macht. Kapitel 19 ist eine Sammlung von Anwendungsbeispielen aus verschiedenen Feldern der Elektronik. In Kapitel 20 schließlich werden FAQs beantwortet, die dem Autor bei seinen Schulungen häufig gestellt wurden. Kapitel 21 behandelt das Design von Schaltkreisen mit Standard-Transformatoren mit flexibler Ein- und Ausgangsspannung.

SIMULATION
IN LTSPICE IV

HANDBUCH, METHODEN
UND ANWENDUNGEN

SIMULATION IN LTSPICE IV

GILLES BROCARD

HANDBUCH, METHODEN
UND ANWENDUNGEN

Mit einem Vorwort von Mike Engelhardt

1. Ausgabe

1. Ausgabe

Swiridoff Verlag
ISBN 978-3-89929-257-2

VORWORT

Das Vorwort zu diesem Werk von Gilles Brocard schreiben zu dürfen, ist für mich eine große Ehre. Ich schätze seine Arbeit in diesem Buch und hoffe, dass auch Sie davon profitieren werden.

Die Entwicklung von LTspice hat mir viel Spaß bereitet. Ich habe eine Reihe numerischer Methoden implementiert, durch die sich LTspice von traditionellen SPICE-Programmen abhebt: eine neue numerische Integrationsmethode, die Knotenreduzierung, ein natives Schaltungselement, das sich wie ein Leistungs-MOSFET verhält, ein neues Steuer-element für den „time step“ und viele andere mehr.

Den größten Sprung machte LTspice 2008, als es Multithreading-fähig wurde. Wir stellten fest, dass es eigentlich recht einfach war, die Berechnungen auf mehrere Rechnerkerne zu verteilen; schwieriger war hingegen, die Simulationen tatsächlich zu beschleunigen. Das Problem bestand darin, dass der Objektcode von LTspice stark optimiert war – ein Großteil war bereits in optimierter Assembly-Sprache implementiert worden. Deswegen benötigte er für jeden Zeitschritt nur wenige Mikrosekunden, und das war ein kurzer Zeitraum verglichen mit dem Aufwand zur Synchronisierung mehrerer Threads. Deswegen entwickelten wir ein Mittel zur dynamischen Anpassung der Cache-Größen der einzelnen Threads. So konnten wir die Threads stochastisch herunterfahren, was wiederum die gleichmäßige Verteilung der Arbeitslast gestattete. Eine weitere wichtige Technik, die zu diesem Zeitpunkt eingeführt wurde, war die Codegenerierung. Sie erzeugt ein Assembly-Listing, das für Ihre Schaltung optimiert ist. Dieser Code wird dann mit dem Assembler übersetzt und durch LTspice für die Ausführung verknüpft. Dieser selbstschreibende Code wird normalerweise während der Simulation alle paar Sekunden generiert, damit Ihre Schaltung der theoretischen FLOPS-Obergrenze einer modernen CPU bei der Ausführung möglichst nah kommt. Darum ist LTspice IV auch so schnell.

Aber damit wird natürlich auch ein Zweck verfolgt. Meiner Meinung nach hat SPICE umfassendere Auswirkungen gehabt als jeder andere Simulator. Deswegen ist es wichtig, ein besseres SPICE zu schreiben. LTspice ermöglicht Ihnen die schnelle Prototyperstellung Ihrer Entwürfe, damit Sie sie besser nachvollziehen und sogar eine Entwicklung intuition ausbilden können.

Mike ENGELHARDT
Manager of Simulation Development
Linear Technology Corporation
April 2011

DER AUTOR

Gilles Brocard

Geboren 1952 in Paris, Frankreich.

Nach seinem Studium der Mathematik und Elektrotechnik spezialisierte er sich auf das Design von DC/DC-Schaltnetzteilen. In diesem Bereich arbeitete er über 20 Jahre.

Heute arbeitet er als freiberuflicher Ingenieur und schreibt Studien und Analysen für zahlreiche namhafte Unternehmen. Er schrieb mehrere Bücher, unter anderem über die elektronische Antriebssteuerung von Flugzeugen, über passive Bauelemente und über den LTspice IV Simulator. Bis heute gibt er sein Wissen über das Design von Schaltnetzteilen in LTspice IV in Seminare weiter.

INDEX

VORWORT	5
DER AUTOR	6
INDEX	7
EINLEITUNG	21
1 LTSPICE IV: EINFÜHRUNG UND VORGESCHICHTE	25
1.1 Schaltungssimulation mit LTspice IV	25
1.1.1 Die drei Grundschrirte	25
1.1.2 Ergebnisanalyse	27
1.2 Die Geschichte von LTspice IV	27
1.2.1 1969–1971: CANCER	27
1.2.2 1972–1974: SPICE1	28
1.2.3 1975–1983: SPICE2	28
1.2.4 1984–1990: SPICE3	28
1.2.5 1990–2007: Die Geburt von LTspice	29
1.2.6 1999–2008: LTspice/SwitcherCADIII	29
1.2.7 Seit Ende 2008: LTspice IV	29
1.3 Welche wesentlichen Vorzüge bietet LTspice IV?	30
1.4 Das bietet LTspice IV	31
1.5 Das bietet LTspice nicht	32
1.6 Fazit	33
2 VON LTSPICE IV BEREITGESTELLTE DATEIEN	34
2.1 Die LTspice IV-Installation	34
2.1.1 Systemanforderungen	34
2.1.2 LTspice IV herunterladen	34
2.2 Wie funktioniert LTspice IV?	36
2.3 Die Editoren in LTspice IV	37
2.4 Im Installationsumfang enthaltene Dateien	39
2.4.1 Modelle, Teilschaltungen, Makromodelle und Bauteilbibliotheken	39
2.4.2 Anwendungsbeispiele	39
2.5 LTspice IV-Dateierweiterungen	44
3 MIT LTSPICE IV ARBEITEN	47
3.1 Installation von LTspice IV	47
3.1.1 LTspice IV unter Windows starten	47
3.2 Wie funktioniert LTspice IV?	48
3.3 Nach dem Starten von LTspice IV verfügbare Menüs	48
3.3.1 Das Menü „File“	50
3.3.2 Das Menü „View“	50

3.3.3	Das Menü „Tools“	50
3.3.4	Das Menü „Help“	51
3.3.5	Kontextmenü auf der Startseite	51
3.4	Ausführliche Schritt-für-Schritt-Anleitung mit Beispielen	52
3.4.1	Schaltplan zeichnen	55
3.4.2	Bauteilparameter eingeben	64
3.4.3	Simulationsparameter eingeben	71
3.4.4	Erste Frequenzmessungen	74
3.4.5	Transientenmessungen	75
3.4.6	FFT-Messungen	79
3.4.7	Klirrfaktormessung	80
3.4.8	Maximalamplituden vor dem Übersteuern	83
3.4.9	Kurvenabschnitte vergrößern	87
3.4.10	Erste Gehversuche	89
4	SCHALTBILD-EDITOR	90
4.1	Die Befehle in LTspice IV	90
4.2	Der Schaltbild-Editor	91
4.2.1	Das Menü „File“	92
4.2.2	Das Menü „Edit“	95
4.2.3	Das Menü „Hierarchy“	98
4.2.4	Das Menü „View“	99
4.2.5	Das Menü „Simulate“	101
4.2.6	Das Menü „Tools“	102
4.2.7	Das Menü „Window“	102
4.2.8	Das Menü „Help“	103
4.2.9	Kontextmenü des Schaltbild-Editors	103
4.3	Bauteildatenbanken	105
4.4	Neues Schaltbild zeichnen	107
4.4.1	Schaltbild-Editor öffnen	107
4.4.2	Erste Elemente auf dem Schaltbild anordnen	107
4.4.3	Wichtige Befehle im Schaltbild-Editor	109
4.4.4	Elemente im Schaltbild miteinander verbinden	111
4.4.5	Wert oder Bezug eines Bauteils eingeben	111
4.4.6	Werte eines Bauteils mit dem Attribut-Editor eingeben	115
4.4.7	Schaltbild ausgestalten (optional)	116
4.4.8	Simulation, Quelle und Direktiven hinzufügen (optional)	117
4.4.9	Schaltbild speichern	117
4.4.10	Simulation starten	118
4.5	Einbinden eines Busses	118
4.6	Wiederholung: Vorgehensweise bei der Nutzung des Schaltbild-Editors	122
4.6.1	Zwei Gesichtspunkte, die unbedingt beachtet werden müssen	123
4.7	Schaltbild exportieren	123

5	SYNTAX UND BAUTEIL-EDITOR	124
5.1	Allgemeine Syntaxregeln in LTspice IV	124
5.2	Der Bauteilattribut-Editor	126
5.3	Normale oder komplexe Bauteilmodelle einsetzen	130
5.3.1	Aktuellen Wert eines Bauteils ändern	131
5.3.2	Attribute anzeigen und Bauteilwerte ändern	135
5.4	Felder im Bauteilattribut-Editor	138
5.5	Bauteilattribute mit zwei Modellen darstellen	139
6	SYMBOL-EDITOR UND HIERARCHIEN	143
6.1	Das Menü im Symbol-Editor	143
6.1.1	Das Menü „File“	143
6.1.2	Das Menü „Edit“	144
6.1.3	Das Menü „Hierarchy“	144
6.1.4	Das Menü „Draw“	144
6.1.5	Das Menü „View“	145
6.1.6	Das Menü „Tools“	145
6.1.7	Das Menü „Window“ (zur Verwaltung der Anzeigefenster)	145
6.1.8	Das Menü „Help“	145
6.1.9	Kontextmenü des Symbol-Editors	145
6.2	Schritt 1: Symbol zeichnen	146
6.3	Schritt 2: Anschlüsse hinzufügen	146
6.4	Schritt 3: Attribute hinzufügen oder ändern	147
6.5	Mögliche Aufrufe aus einem Symbol	149
6.6	Sichtbare, mit dem Symbol verbundene Attribute	151
6.7	Symbol aus einem Schaltbildabschnitt automatisch erstellen	152
6.8	Symbol automatisch aus einer Netlist generieren	153
6.9	Hierarchische Verknüpfungen in LTspice IV	158
6.10	Regeln der Hierarchienutzung	159
6.10.1	Wie die Matroschka-Püppchen	159
6.11	Hierarchiestrukturregeln	160
6.11.1	Ebenenhierarchie	161
6.12	Befehle im Menü „Hierarchy“	162
6.13	Beispiel: Workflow bei einer einfachen 2-Ebenen-Hierarchie	163
6.13.1	Bildschirm 1: Teilschaltungsmodell	163
6.13.2	Bildschirm 2: Sekundärschaltbild	163
6.13.3	Bildschirm 3: Hauptschaltbild	164
6.13.4	Bildschirm 4: Simulation des Hauptschaltbildes	164
6.14	Hierarchieverzeichnis exportieren	165
6.15	Interaktion zwischen über- und untergeordneten Ebenen	165
7	DER NETLIST-EDITOR	167
7.1	Wo Netlists herkommen	167
7.2	Die Netlist als obligatorische Komponente	167
7.3	Netlists: Struktur, Syntax und Konventionen	167

7.4	Eine Beispiel-Netlist	168
7.5	Die Menüs im Netlist-Editor	169
7.5.1	Das Menü „Edit“	170
7.5.2	Das Menü „View“	170
7.5.3	Das Menü „Simulate“	170
7.5.4	Kontextmenü des Netlist-Editors	170
7.6	Netlist schreiben	170
7.7	Syntax der Netlist-Dateien (.CIR, .NET, .SP)	172
7.8	Netlist-Editor aus einem Schaltbild heraus öffnen	172
7.9	Netlist ausführen	175
7.10	Netlist eines Schaltbildes exportieren	176
7.11	In Netlists verwendete Systembefehle	177
8	MESSUNGEN, WAVEFORM VIEWER UND FFT-EDITOREN	178
8.1	LTspice IV Kurvenansicht	178
8.1.1	Ergebnisanzeige der Simulationsberechnung	178
8.1.2	Auswahl von Messpunkten im Schaltbild	178
8.2	Anzeige einer Messung im Waveform Viewer	178
8.2.1	Spannung gegen Masse darstellen	178
8.2.2	Strom darstellen	179
8.2.3	Differenzspannung darstellen (nicht massebezogen)	179
8.2.4	Vorherige Kurven löschen	180
8.2.5	Eine oder mehrere Kurven selektiv löschen	180
8.2.6	Momentanverlustleistung anzeigen	180
8.2.7	Anzeige von durchschnittlicher Leistung und Energie-Integral der dargestellten Leistung über die Zeit	181
8.2.8	Anzeige des Mittelwerts von Spannung oder Strom über den angezeigten Zeitraum oder des Effektivwertes (quadratischer Mittelwert)	181
8.3	Verwendung der Menüs	182
8.3.1	Waveform Viewer und FFT-Analyse-Editor	182
8.3.2	Das Menü „File“	183
8.3.3	Das Menü „View“	183
8.3.4	Menü „Plot Settings“ (Konfiguration des Waveform Viewers)	184
8.3.5	Menü „Simulation“ (Simulation starten)	186
8.3.6	Das Menü „Tools“	187
8.3.7	Das Menü „Window“	187
8.3.8	Das Menü „Help“	187
8.3.9	Kontextmenü des Waveform Viewers	188
8.4	Anzuzeigende Messungen auswählen	189
8.5	Kurve oder Fenster hinzufügen	191
8.5.1	Kurve hinzufügen	191
8.5.2	Fenster hinzufügen	193
8.6	Zoom-Funktionen	193
8.7	Mathematische Operationen im Waveform Viewer	194

8.8	Berechnung eines algebraischen Ausdrucks anfordern	194
8.8.1	Darstellung der Kurve ändern	195
8.9	Benutzerdefinierte Funktionen	199
8.10	Achsenskalen ändern	200
8.10	Skalen der vertikalen Achse ändern	200
8.10.2	Skalen der horizontalen Achse	201
8.11	Nutzung des Waveform Viewers im x-y-Modus.	202
8.12	Kontextmenü und Skalen.	203
8.13	Weitere Skalenkonfigurationen.	204
8.13.1	Linke vertikale Skala.	204
8.13.2	Nur die Phase darstellen	205
8.13.3	Rechte vertikale Skala.	205
8.14	Anzeige mehrerer Kurven im Waveform Viewer	207
8.15	Informationen über die Kurven im Waveform Viewer.	209
8.16	Weitere Konfiguration von Kurvendarstellungen im Waveform Viewer	211
8.17	Farbzuordnung im Waveform Viewer festlegen.	211
8.18	Zwei Messcursor	213
8.18.1	Messcursor auf Kurven platzieren	214
8.19	Anzeige der Koordinaten in der unteren Leiste.	216
8.20	Konfiguration des Waveform Viewers speichern	218
8.21	Schnelleres Laden von Dateien	218
8.22	RAM und Adressierungsraum.	219
9	DIREKTIVEN FÜR DIE KONFIGURATION VON SIMULATIONEN	221
9.1	Definition einer Simulationsdirektive	221
9.1.1	Editor für Simulationsdirektiven	221
9.1.2	Syntax von Simulationsdirektiven	223
9.1.3	Erste Syntaxregel	223
9.1.4	Zweite Syntaxregel	223
9.1.5	Dritte Syntaxregel.	225
9.1.6	Niemals einen Pflichtparameter vergessen	226
9.2	.Options Simulationsparameter modifizieren	227
9.3	.IC Feste Anfangsbedingungen für Simulation im Zeitbereich	231
9.4	.Savebias Einen DC-Arbeitspunkt speichern	233
9.5	.Loadbias Einen DC-Arbeitspunkt laden	234
9.6	.Net Berechnung eines Netzwerkparameters mit einer AC-Simulation	234
9.7	.Nodeset Anfangsbedingungen für die DC-Analyse	235
10	DIE SECHS HAUPTSIMULATIONEN	236
10.1	Vorstellung der sechs Hauptsimulationen	236
10.1.1	DC-Simulationen (kontinuierlich)	236
10.1.2	AC-Simulationen (Frequenz)	237
10.1.3	Simulationen nicht-linearer Schaltungen.	237
10.1.4	Simulationseigenschaften	237

10.2	Auswahlkriterien für Simulationen	238
10.2.1	Wenn die einzige Anregungsquelle der Schaltung eine Gleichstromquelle ist	239
10.2.2	Wenn die einzige Anregungsquelle der Schaltung eine Wechselstromquelle mit niedriger Amplitude ist.	239
10.2.3	Die einzige Anregungsquelle der Schaltung ist eine alternierende Spannungsquelle mit hoher Amplitude	240
10.3	.OP – Simulation eines kontinuierlichen Arbeitspunktes	240
10.4	.DC – Sweep-Analyse von DC-Quellen (für eine bis drei Quellen)	242
10.5	.TF – Übertragungsfunktion-Simulation (Verstärkung, Eingangs- und Ausgangsimpedanz)	243
10.6	.AC – Simulation eines AC-Signals um einen Arbeitspunkt	245
10.7	.NOISE – Rauschsimulation	246
10.8	.TEMP – Sweep-Simulation der Temperatur	248
10.9	.TRAN – Simulation im Zeitbereich (nicht-linear)	251
10.10	Konfiguration der .TRAN Simulation im Zeitbereich	253
10.10.1	Den Wert von Maximum Timestep mit Bedacht wählen	253
10.10.2	Parameter: .uic (Simulation im Zeitbereich)	258
10.10.3	Parameter: startup (Simulation im Zeitbereich)	259
10.10.4	Parameter: steady (Simulation im Zeitbereich)	260
10.10.5	Parameter: .nodiscard (Simulation im Zeitbereich).	263
10.10.6	Parameter: .step (Simulation im Zeitbereich)	264
10.11	.FOUR – Harmonische als numerisches Format bearbeiten	267
10.11.1	Wie funktioniert die FFT-Analyse?	267
10.11.2	Vorbedingungen für eine repräsentative FFT-Analyse	271
10.11.3	Einfluss der Parameter Stop Time und Time step auf die FFT	283
10.12	Monte Carlo-statistische Simulationen	285
12.12.1	Erster Schritt	287
12.12.2	Zweiter Schritt	287
12.12.3	Dritter Schritt	288
12.12.4	Anmerkung zum Monte Carlo-Verfahren	288
10.13	Simulationen konfigurieren	289
11	NUMERISCHE MESSERGEBNISSE, DOWNLOADS, DATENSICHERUNG UND MODELLE	291
11.1	Messungen als numerische Daten	291
11.1.1	Messungsdateien mit numerischen Daten	291
11.1.2	Deklaration von Variablen	291
11.2	MEAS – Messwerte numerisch anzeigen	291
11.2.1	Erster Messungstyp: für nur einen Punkt auf der x-Achse	292
11.2.2	Beispiele für die Verwendung von .meas für nur einen Punkt auf der x-Achse	296
11.2.3	Zweiter Messungstyp: für ein Intervall zwischen zwei Punkten auf der x-Achse	298
11.2.4	Beispiele für die Verwendung der Parameter rise, fall, last und cross	299
11.2.5	Fall einer NOISE-Simulation	308
11.2.6	Erstellung eines Messskripts: File_name.meas	308
11.2.7	Genauigkeit der mit dem Befehl .meas erhaltenen Resultate	314
11.3	.PARAM – Variablen und Parameter	315

11.4	.STEP – Konfigurierbare Intervalle	318
11.4.1	Die Befehle .step und select steps, Schritt für Schritt	320
11.5	.FUNC – Benutzerdefinierte Funktionen	325
11.6	Effizienzbericht über einen DC/DC-Wandler: steady	326
11.7	.FERRET – eine Datei automatisch downloaden	327
11.8	.GLOBAL Globale Deklaration	328
11.9	.SAVE Beschränkung der Menge an gespeicherten Daten	328
11.10	.WAVE – Ausgangssignal in .wav Format umwandeln	329
11.10.1	Anmerkungen zu .wav Dateien	330
11.11	Konfiguration eines Bauteilwertes mit dem Befehl .param	330
11.12	.MODEL – Definition eines SPICE-Modells	332
11.13	.SUBCKT – Definition einer Teilschaltung	333
11.14	.INCLUDE – Eine neue Bibliothek einbinden	334
11.15	.LIB – Bibliothek für Modelle oder Teilschaltungen	335
11.15.1	Verschlüsselte Bibliothek	336
12	IMPORT VON BAUTEILMODELLEN	337
12.1	Muss LTspice IV Bauteilmodelle herunterladen?	337
12.2	Makromodelle und Modelle	337
12.2.1	Dateinamenserweiterung von Makromodellen oder Modellen: .MODEL oder .MOD	337
12.3	Teilschaltungen	338
12.4	Bibliotheken und Modelle	338
12.5	Ein Bauteilmodell besteht aus zwei Elementen	339
12.6	Symbole zum Aufruf von Bauteilen	339
12.7	Bauteilmodell herunterladen	339
12.8	Drei Namenserweiterungen für drei Methoden, Bauteile hinzuzufügen	340
12.9	Ein Symbol kann mehrere Elemente aufrufen	340
12.10	Modellbibliotheken	341
12.10.1	Wie erkennt der Compiler, dass genau dieses Bauteil und kein anderes verwendet wird?	342
12.10.2	Jedes Bauteil hat mehrere mögliche Modelle	343
12.11	Modelle	343
12.12	Beispiel: Teilschaltungsbibliothek 74htc.lib	343
12.13	Beispiel: Bipolarer Darlington-Transistor MJ11015	344
12.13.1	Schritt eins: Download	346
12.13.2	Schritt zwei: automatisierte Symbolerstellung	347
12.13.3	Schritt drei: Anpassung des Symbols	347
12.14	Beispiel: Operationsverstärker TL071	350
12.15	Erstellung einer Teilschaltung	355
12.16	Eine neue Schaltung entsteht	356
12.17	Illustriertes Beispiel der Erstellung einer Teilschaltung	357
13	EDITOR FÜR SPANNUNGS- UND STROMQUELLEN	364
13.1	Zwei Arten von Quellen und zwei Editoren	364
13.2	Zwei Arten von Quellen: abhängig oder unabhängig	366

13.3	Alle Simulationen erfordern unabhängige Quellen	367
13.3.1	Spannungs- oder Stromquellen müssen den Erfordernissen jedes Simulationstyps angepasst werden	367
13.4	Eine Quelle im Schaltbild platzieren	368
13.4.1	Drei unabhängige Quellen	368
13.4.2	Neun abhängige Quellen – sechs lineare und drei nichtlineare	369
13.4.3	Zwei abhängige Quellen (überflüssig)	370
13.5	Unabhängige Quellen	370
13.6	V Unabhängige Spannungsquelle	371
13.6.1	PULSE Spannungsquelle	372
13.6.2	SINE Spannungsquelle (sinusförmig)	372
13.6.3	EXP Spannungsquelle (exponentiell)	372
13.6.4	Frequenzmodulierte Spannungsquelle (SFFM)	373
13.6.5	Beliebige Spannungsquelle, moduliert durch PWL	373
13.6.6	Spannungsquelle, moduliert durch eine <code>.wav</code> Datei	373
13.7	I Unabhängige Stromquelle	374
13.7.1	PULSE Stromquelle	375
13.7.2	SINE Stromquelle (sinusförmig)	375
13.7.3	EXP Stromquelle (exponentiell)	375
13.7.4	Frequenzmodulierte Stromquelle (SFFM)	376
13.7.5	Modulierte Stromquellen	376
13.8	Load Unabhängige Last	378
13.9	Editor für unabhängige Quellen	379
13.9.1	Frequenzdurchlauf-Konfiguration einer unabhängigen Quelle für eine AC-Simulation	381
13.9.2	Konfiguration unabhängiger Stromquellen für eine DC-Simulation (kleine Amplituden)	382
13.9.3	Konfiguration unabhängiger Quellen für eine AC-Simulation (kleine Amplituden)	386
13.9.4	Konfiguration unabhängiger Quellen für eine Simulation im Zeitbereich (hohe Amplitude)	390
13.10	Unabhängige Quellen	411
13.11	E Spannungsgesteuerte Spannungsquellen	411
13.11.1	Erstes Modell: Die Übertragungsfunktion ist ein konstanter Wert	412
13.11.2	Zweites Modell: Die Übertragungsfunktion ist eine Tabelle von Wertepaaren	415
13.11.3	Drittes Modell: Die Übertragungsfunktion ist eine Laplace-Transformation und eine Funktion von S	416
13.12	F Stromgesteuerte Stromquelle	417
13.12.1	Beispiel	418
13.13	G Spannungsgesteuerte Stromquelle	422
13.13.1	Erstes Modell	422
13.13.2	Zweites Modell	423
13.13.3	Drittes Modell	423
13.14	H Stromgesteuerte Spannungsquelle	424
13.15	B Nichtlineare, frei gewählte Spannungsquelle	425
13.15.1	Für eine frei gewählte Spannungsquelle	426
13.16	B Nichtlineare, frei gewählte Stromquelle	430
13.17	E _{poly} Nichtlineare polynomiale Spannungsquelle	432

13.18	Gpoly Nichtlineare polynomiale Stromquelle	433
13.19	Attribute-Editor für abhängige Quellen	434
14	PASSIVE BAUTEILE	436
14.1	Passive Bauteile	436
14.1.1	Einführung in die Verwendung von Bauteilmodellparametern	436
14.2	R – Widerstand (ein Modell)	437
14.3	C – Kondensator (zwei Modelle)	440
14.3.1	Erstes Modell des Standardkondensators	440
14.3.2	Zweites Modell des Standardkondensators	442
14.4	L. Induktivität	443
14.4.1	Erstes Induktivitätsmodell (linear, ohne Sättigung)	443
14.4.2	Zweites (nichtlineares) Modell	445
14.4.3	Drittes Modell: CHAN (nichtlinear unter Berücksichtigung von Sättigung und Hysterese)	446
14.5	Hysteresezyklus	448
14.6	Unterschiede zwischen Induktivitäten mit und ohne magnetischem Werkstoff	450
14.6.1	Gewickelte Induktivität ohne magnetischen Kern (Luftspule)	450
14.6.2	Gewickelte Induktivität mit magnetischem Kern	451
14.7	K Transformatoren (gekoppelte Induktivität)	452
14.8	Gekoppelte Induktivität mit mehreren Wicklungen	453
14.9	Weitere Möglichkeiten, einen Transformator mit Sättigung und Hysterese zu erstellen	454
15	HALBLEITERBAUTEILE	455
15.1	Halbleiterbauteile	455
15.1.1	Bauteilmodell auswählen	455
15.2	D Diode (drei Modelle)	456
15.2.1	Erstes Standarddiodenmodell	456
15.2.2	Zweites Standarddiodenmodell	457
15.2.3	Gemeinsame Leistungsparameter	458
15.3	Q Bipolartransistor (drei Modelle: Ebers-Moll, Gummel-Poon und VBIC)	459
15.3.1	Ebers-Moll- und Gummel-Poon-Modelle	460
15.3.2	Drittes Modell (VBIC)	462
15.4	J JFET-Transistor (ein Modell)	467
15.5	M Monolithischer MOSFET (verschiedene Modelle)	468
15.5.1	Monolithischer MOSFET	469
15.5.2	MOSFET-Transistormodelle	470
15.6	M DMOSFET (ein Modell)	473
15.7	Z – MESFET-Transistor (ein Modell)	477
16	ZUSATZBAUTEILE	478
16.1	Sonstige Zusatzbauteile	478
16.1.1	Einführung in die Verwendung von Bauteilmodellparametern	478
16.2	S – Spannungsgesteuerter Schalter (zwei Modelle)	479
16.2.1	Erstes Standardmodell Level=1	481
16.2.2	Zweites vollständiges Modell Level=2	482

16.3	W Stromgesteuerter Schalter (drei Modelle)	483
16.3.1	Erstes Standardmodell	484
16.4	O Verlustbehaftete Übertragungsleitung (ein Modell)	487
16.5	T. – Verlustfreie Übertragungsleitung (ein Modell)	489
16.6	Ü – RC-Übertragungsleitung (ein Modell)	490
16.7	A – Sonderfunktionen.	491
16.7.1	Sonderfunktionen INV, BUF, AND, OR, XOR.	492
16.7.2	Sonderfunktionen SCHMITT, SCHMTBUF, SCHMTINV, DIFFSCHMITT, DIFFSCHMITTINV und DIFFSCHMITTBUF	494
16.7.3	Sonderfunktionen DFLOP und SRFLOP	494
16.7.4	Sonderfunktion PHIDET	495
16.7.5	Sonderfunktion VARISTOR	495
16.7.6	Sonderfunktion MODULATE.	496
16.7.7	Sonderfunktion SAMPLE	496
16.8	X – Teilschaltung aufrufen	497
17	INDUKTIVITÄT, HYSTERESE, ÜBERTRAGER UND GEKOPPELTE INDUKTIVITÄTEN	499
17.1	Die Bedeutung von magnetischen Werkstoffen	499
17.1.1	Betrieb eines Magnetkreises	499
17.1.2	Definitionen	499
17.2	Verlauf der Hysteresekurve	501
17.2.1	Neukurve (gepunktete Linie)	501
17.2.2	Verlauf Hysteresekurve (durchgezogene Linie)	501
17.3	Induktivität, magnetische Feldstärke und Induktion messen	502
17.3.1	Das CHAN-Modell (Sättigung und Hysterese)	503
17.3.2	Induktivitätsmessung	506
17.3.3	Magnetische Flussdichte messen.	507
17.4	Drei Beispiele für Hysteresekurven.	509
17.5	Hysteresekurven mit Luftspalt	512
17.6	Hysteresekurve mit mehreren Werten für H	513
17.7	Hysteresekurve mit gleichbleibender Vorspannung.	514
17.8	Darstellung von vier LTspice IV-Transformatormodellen	515
17.9	Transformatormodelle 1 und 2 ohne Berücksichtigung von Sättigung und Hysterese	516
17.10	Vier für die Modelle 1 und 2 erforderliche Werte	517
17.11	Kopplungsfaktor K und Übersetzungsverhältnis N – zwei wichtige Werte	518
17.12	Zwei Ersatzschaltbilder für die Modelle 1 und 2.	519
17.13	Transformatormodell 1: $K=1$, ausdrückliche Streuinduktivität.	519
17.14	Transformatormodell 2: K ungleich 1 und eine implizite Streuinduktivität (von LTspice IV berechnet)	520
17.15	Transformatoren mit mehreren Wicklungen	521
17.16	Bestimmung eines Transformators entsprechend den Eigenschaften eines Schaltnetzteils	523
17.17	Der von uns ausgewählte Transformator	525
17.18	Berechnungen der Modellwerte aus Messungen oder bekannten Eigenschaften	525
17.19	Transformatormodelle 1 und 2.	526
17.20	Schaltbild des Schaltnetzteils mit Transformator 1	527

17.21	Schaltbild des Schaltnetzteils mit Transformator 2	531
17.22	Schlussfolgerungen zu den beiden Methoden	533
17.22.1	Transformatoren mit mehreren Wicklungen	535
17.23	Sättigungsprobleme bei Transformatoren	536
17.24	Transformatormodell 3 mit Sättigung und Hysterese.	540
17.25	Transformatormodell 3 mit Teilschaltung	540
17.26	Teilschaltungen mit nur einer Sekundärinduktivität.	542
17.27	Transformatorteilschaltung mit mehreren Sekundärinduktivitäten.	546
17.28	Integration der Teilschaltungen (Transformatormodell 3) in ein Schaltnetzteil	550
17.29	Einstellungen eines Snubbers (Überspannungsbegrenzers)	553
17.30	Überschreitung der Merkmale eines Bauteils.	557
17.31	Ähnlichkeit zwischen Simulationsresultaten und Messungen an einem Prototyp	560
17.32	Schlussfolgerungen zur Ähnlichkeit von Simulation und echten Messungen	564
18	CONTROL PANEL UND TASTENKOMBINATIONEN	565
18.1	Die neun Registerkarten des Control Panels	565
18.2	Die Registerkarte „Compression“ (Optionen für die Datenkompression)	566
18.3	Die Registerkarte „Save Defaults“ (Speicheroptionen).	568
18.4	Die Registerkarte „SPICE“ (Betrieboptionen für den LTspice IV-Simulationskern)	570
18.4.1	Vorsichtsmaßnahmen bei der SPICE-Konfiguration.	571
18.4.2	Parameter zur Steuerung der Simulationsberechnung	571
18.4.3	Parameter zur Steuerung der Integrationsmethode.	572
18.4.4	Steuerparameter für den Solver	573
18.5	Die Registerkarte „Drafting Options“ (Entwurfsoptionen)	574
18.6	Die Registerkarte „Netlist Options“ (Optionen für die Netlist-Syntax und das Schreiben von Netlists).	578
18.7	Die Registerkarte „Waveforms“ (Waveform Viewer)	580
18.8	Die Registerkarte „Operation“ (Allgemeine LTspice IV-Konfiguration)	584
18.9	Die Registerkarte „Hacks!“ (Interne Abläufe in LTspice IV)	586
18.9.1	Vorsichtsmaßnahmen bei der Hacks!-Konfiguration	587
18.9.2	Steuerparameter auf der Registerkarte „Hacks!“	587
18.10	Die Registerkarte „Internet“ (Optionen für die Internetverbindung)	588
18.11	Konfiguration der Tastenkombinationen.	590
18.11.1	Interaktivität des Schaltbild-Editors.	591
18.11.2	Tastenkombinationen im Schaltbild-Editor	592
18.12	„Colour Preferences“ (Farbkonfiguration)	593
19	ANWENDUNGSBEISPIELE	594
19.1	Charakteristische Kennlineinschar eines Halbleiterbauteils	594
19.1.1	Eigenschaften des n-Kanal-JFET 2N3819.	594
19.1.2	Eigenschaften des n-Kanal-Bipolartransistors 2N2222.	598
19.1.3	Änderung der Eigenschaften durch Temperatureinfluss.	599
19.1.4	Temperaturabhängige Eigenschaften einer Zenerdiode.	600

19.2	Verstärkerschaltung	602
19.2.1	Die technischen Daten	602
19.2.2	Aufbau des Verstärkers	602
19.2.3	Überprüfung der Bauteilwerte der Schaltung	605
19.2.4	Effizienz.	607
19.3	Durchschnittsleistung	608
19.3.1	Klirrfaktormessungen	609
19.3.2	FFT-Kurve darstellen	613
19.3.3	Messungen der Intermodulationsverzerrung	614
19.3.4	Frequenzantwort bei Anregung mit einem Rechtecksignal	616
19.3.5	Bode-Diagramm anzeigen	619
19.3.6	Durch den Verstärker generiertes Rauschen	620
19.3.7	Übertragungsfunktion dieses Verstärkers	621
19.4	Bode-Diagramm eines Regelkreises (Schaltnetzteilanwendung)	624
19.4.1	Nachteile der klassischen Verfahren	624
19.4.2	Vorteil des neuen Verfahrens	624
19.4.3	Das Bode-Diagramm für die Verstärkung	626
19.4.4	Das Bode-Diagramm für die Impedanz	628
19.5	Ein einfaches Wattmeter (Anwendung einer Quelle B)	632
19.6	Parametrische Analyse einer RLC-Schaltung	634
19.7	Einbindung eines Busses.	637
19.8	DC/DC-Wandler (Schaltnetzteil)	640
19.8.1	Verwendung einer nicht sättigungsfähigen Luftspule	644
19.8.2	Verwendung einer Spule mit magnetischem Werkstoff	644
19.8.3	Verwendung einer Spule mit nichtgesättigtem magnetischen Werkstoff	646
19.8.4	Effizienzbericht zu einem DC/DC-Wandler	647
19.9	Analyse unter Berücksichtigung der Streuung von Bauteilwerten nach dem Monte Carlo-Verfahren	649
20	FRAGEN UND ANTWORTEN	654
20.1	Welche Auswirkungen hat der verwendete Computer auf die Berechnungsdauer einer Simulation in LTspice IV?	654
20.1.1	Drei Beispiele für Laptops	654
21.1.2	Vier Beispiele für Desktopcomputer	655
20.2	Wo liegen die Grenzen von LTspice IV?	655
20.3	Ist LTspice IV wirklich nützlich?	660
20.4	Wie kann eine Liste der in einer Schaltung verwendeten Bauteile abgerufen werden?	661
20.5	Wie kann man im Schaltbild-Editor zwischen den Seiten wechseln?	661
20.6	Wie kann ein Teil einer Schaltung von einer Schaltbildseite auf eine andere kopiert werden?	661
20.7	Welches sind die häufigsten Bedienfehler bei LTspice IV?	661
20.8	Mit welchen Tipps und Tricks kann ich Zeit sparen?	662
20.9	In welchen Situationen kann LTspice IV stehenbleiben?	662
20.10	Kann LTspice IV auf jedem beliebigen Computer installiert werden?	663
20.11	Welche konkrete Hilfe bietet LTspice IV bei der Simulation elektronischer Schaltungen?	663
20.12	Sind viele Arbeitsschritte erforderlich, um mit LTspice IV eine Simulation durchzuführen?	664

20.13	Wie nützlich ist LTspice IV in Bezug auf Messungen?	664
20.14	Warum gestattet LTspice IV das Testen mehrerer Lösungen?	664
20.15	Besteht das Risiko, süchtig nach LTspice IV zu werden?	665
20.16	Erleichtert LTspice IV das Erlernen der Elektronik?	665
20.17	Sie können die beschriebenen Menüs nicht finden? Oder diese enthalten andere Elemente als erwartet?	666
20.18	Welche Flags werden beim Start von LTspice IV verwendet?	666
20.19	Welche Schritte starten die Ausführung einer Simulation?	668
20.20	Sind die LTspice-Modelle für Schaltnetzteile kompatibel mit anderen SPICE-Softwareversionen?	669
20.21	Wo finde ich zuverlässige Informationen, Modelle und Anwendungsbeispiele für LTspice IV-Benutzer?	669
20.22	Gibt es eine Linux-Version von LTspice IV?	669
21	LTSPICE-MODELLE FÜR DROSSELSPULEN UND ÜBERTRAGER	670
21.1	WE-FLEX Bauteilebibliothek online	671
21.2	Tools für das Entwerfen und Entwickeln von Schaltnetzteilen.	672
21.3	Vorstellung der Transformatorbaureihen WE-FLEX und WE-FLEX+	672
21.4	Das LTspice-CHAN-Spulenmodell	674
21.5	Ausreichende Präzision des CHAN-Modells	679
21.6	Vorteile des LTspice-CHAN-Modells	682
21.7	Neukurve.	683
21.8	Ähnlichkeiten zwischen Simulation und Prototypmessungen	687
21.9	Abhängigkeit des Nennstroms I_N von der Verschaltung der Wicklungen	688
21.10	Wie wird die Sättigung in LTspice IV visualisiert?	688
21.11	Zwei Modellierverfahren für Spulen	689
21.12	Drei Modellierverfahren für Transformatoren	692
21.13	WE-FLEX-/WE-FLEX+-Transformatormodell	696
21.14	Äquivalenzen für Modellierverfahren außerhalb der Sättigungszone	698
21.15	Inhalt der WE-FLEX Modellbibliothek und Verwendung dieser Modelle	699
21.16	Konfiguration des AG-Wertes zur Auswahl von Transformator oder Drosselspule	704
21.17	Zur Erstellung eines Transformators mit dem FLEX-Modell müssen auch die Werte von PR, PL, SR und SL konfiguriert werden	706
21.18	Zur Erstellung einer Drosselspule mit dem WE-FLEX-Modell müssen auch die Werte von IR und IL konfiguriert werden.	708
21.19	Tabellen S2 und T2: Eine wertvolle Hilfe bei der Auswahl von Spule oder Transformator für Ihr Schaltnetzteil	710
21.20	Vollständiges und illustriertes Beispiel eines für ein Sperrwandler-Schaltnetzteil verwendeten LTspice IV-FLEX-Modells	712
21.21	LTspice-Modelle für Transformatoren und Spulen.	719
21.22	Wie man den Wert von Kernverlusten ermittelt.	722
21.23	Verschaltung der LTspice-CHAN-FLEX- und -FLEX+-Modelle	724
21.24	Reihen- und/oder parallele Wicklung bei der WE-FLEX-Baureihe	728
21.25	Grenzen des LTspice-CHAN-Modells für Transformatoren	731

21.26	Der Wert einer mit magnetischen Werkstoff erstellten Spule ändert sich mit dem sie durchfließenden Strom.	732
21.27	Häufig gestellte Fragen	733
ANHÄNGE		744
1	Im CHAN-Modell zu verwendende Werte für L_m und A	744
2	Im CHAN-Modell zu verwendende Werte für B_s , B_r und H_c	745
2.1	Für das CHAN-Modell in LTspice IV direkt verwendbare Parameter	745
QUELLENANGABE		754
INDEX		757

Stünden alle Befehle jederzeit zur Verfügung, dann wären Menüs und Symbolleiste vollkommen überladen. Deswegen passt LTSpice den Zugriff auf die einzelnen Befehle je nach Kontext an.

Anfangs sind nur einige Befehle zugänglich: Dies ist die so genannte **Startphase**. Je nach Anforderungen werden dann Schaltplan-Editor, Waveform-Viewer, Symbol- und Netlist-Editor verfügbar gemacht, und die Menüs passen sich entsprechend an.

Die Befehle sind in **fünf Gruppen** unterteilt:

1. die in diesem Kapitel beschriebenen Befehle der Startphase (Abb. 3.2).

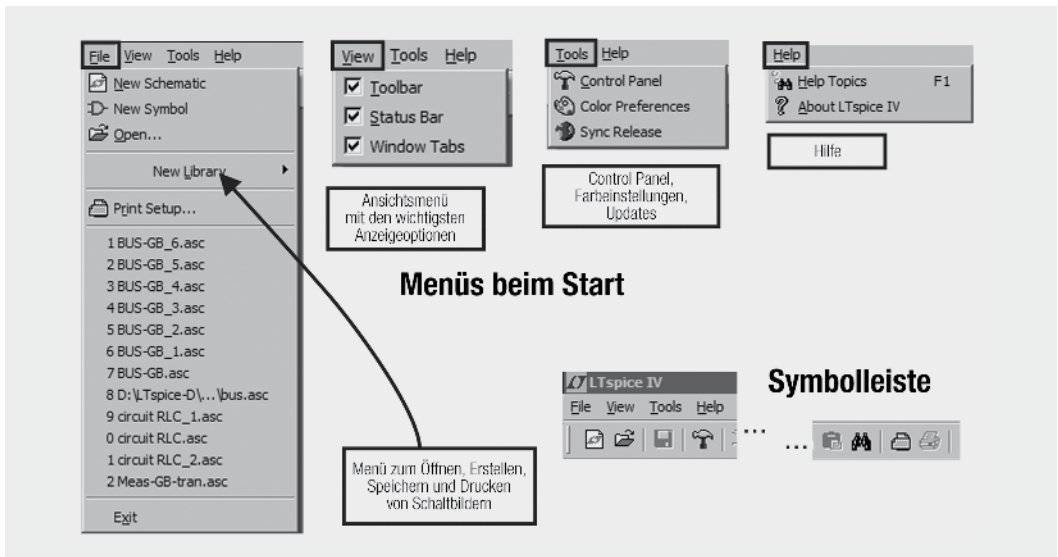


Abb. 3.2

2. die in Kapitel 4 beschriebenen Befehle im **Schaltplan-Editor** (dies ist die größte Gruppe),
3. die in Kapitel 5 beschriebenen Befehle des **Bauteil-Editors** zur Eingabe von Werten und Parametern,
4. die in Kapitel 6 beschriebenen Befehle des **Symbol-Editors**,
5. die in Kapitel 7 beschriebenen Befehle des **Netlist-Editors**,
6. schließlich die in Kapitel 8 beschriebenen Befehle des **grafischen Editors für den Waveform-Viewer**.

ANMERKUNG

Im folgenden Text zeigt ein unterstrichener Buchstabe in einem Befehlsnamen an, dass dieser Befehl über eine Tastenkombination aufgerufen werden kann. Die Liste aller Tastenkombinationen finden Sie am Ende von Kapitel 18.

3 MIT LTSPICE IV ARBEITEN

3.3 Nach dem Starten von LTspice IV verfügbare Menüs

3.3.1 Das Menü „File“

- **New Schematic:** Mit diesem Befehl können Sie ein neues Fenster öffnen, in dem Sie mithilfe des Schaltplan-Editors (vgl. Kapitel 4) ein Schaltplan erstellen können.
- **New Symbol:** Mit diesem Befehl wird ein Editor geöffnet, dessen Zweck ausschließlich die Erstellung von Symbolen zur Darstellung neuer Bauteile ist. Dies kann etwa nach der Erstellung einer Teilschaltung oder dem Download neuer Bauteile aus dem Internet (vgl. Kapitel 6) sein.
- **Open...:** Klicken Sie auf diesen Eintrag, um eine der 62 Beispielschaltungen zu öffnen, die LTspice IV beinhaltet. Außerdem können Sie mit diesem Befehl beliebige gespeicherte Dateien öffnen, z.B. Netlists, Schaltpläne, Symbole, Diagramme usw. Bei Downloads müssen Sie die Erweiterung der Datei angeben, die Sie laden möchten, beispielsweise **.asc**, **.raw**, **.asy**, **.cir**, **.net** usw. (vgl. Kapitel 2).
- **New Library:** Mit diesem Menüeintrag erstellen Sie Bauteilbibliotheken, die Sie dann zu den in LTspice IV bereits vorhandenen Bibliotheken hinzufügen können (siehe Kapitel 11 und 13). Für drei Bauteiltypen können Sie Bibliotheken direkt anlegen:
 - **Capacitor:** Hiermit erstellen Sie eine Bibliothek für Kondensatoren (**.cap**)
 - **Inductor** Hiermit erstellen Sie eine Bibliothek für Induktivitäten (**.ind**)
 - **Resistor** Hiermit erstellen Sie eine Bibliothek für Widerstände (**.res**)
- Mit **Print Setup** können Sie einen Drucker auswählen und konfigurieren.
- **List** zeigt alle zuletzt verwendeten Schaltplaner an.
- **Exit** speichert offene Dateien und beendet LTspice IV.

3.3.2 Das Menü „View“

- **Toolbar:** Aktivieren oder deaktivieren Sie das Kontrollkästchen, um die Symbolleiste ein- bzw. auszublenden.
Empfehlung: Sie sollten die Symbolleiste nicht ausblenden, da sie ebenso wie Tastenkombinationen ein schnelles Arbeiten erlaubt.
- **Status Bar** (Statusleiste unten auf dem Bildschirm): Aktivieren oder deaktivieren Sie das Kontrollkästchen, um die Statusleiste am unteren Bildschirmrand ein- oder auszublenden. In den verschiedenen Phasen Ihrer Arbeit mit LTspice IV erscheinen dort unter Umständen für den Kontext relevante und gelegentlich wichtige Informationen.
Empfehlung: Sie sollten diesen Kommunikationsbereich nicht ausblenden.
- **Window Tabs** (Registerkarten unter der Symbolleiste): Aktivieren oder deaktivieren Sie das Kontrollkästchen, um die Registerkarten am oberen Rand der Fenster, die Namen und Erweiterungen von Dateien anzeigen, ein- oder auszublenden.
Empfehlung: Sie sollten die Registerkarten nicht ausblenden.

ANMERKUNG

Wir empfehlen, diese drei Optionen aktiviert zu lassen, weil sie das Arbeiten mit LTspice IV erleichtern.

3.3.3 Das Menü „Tools“

- **Control Panel:** Über diesen Menüeintrag, der jederzeit in LTspice IV verfügbar ist, können Sie das Control Panel aufrufen, über das Sie alle LTspice IV-Tools und den SPICE-Kern konfigurieren können. Insgesamt neun Registerkarten stehen für die verschiedenen Bereiche zur Verfügung (siehe Kapitel 18).

Als Beispiel soll folgende Befehlszeile im Schaltbild dienen:

```
.meas tran name_of_variable find V(out) at=5m
```

Sie fügt folgende Zeile in die Datei **SPICE Error Log** ein:

```
Name_of_variable : V(out)=-0.0424171 at 0.005
```

Die Zeile besagt, dass die **Spannung** am Knoten mit der Bezeichnung **out** im Schaltbild für einen Wert **t=5 Milli-sekunden** auf der x-Achse **-0,0424171** Volt beträgt.

11.2.1 Erster Messungstyp: für nur einen Punkt auf der x-Achse

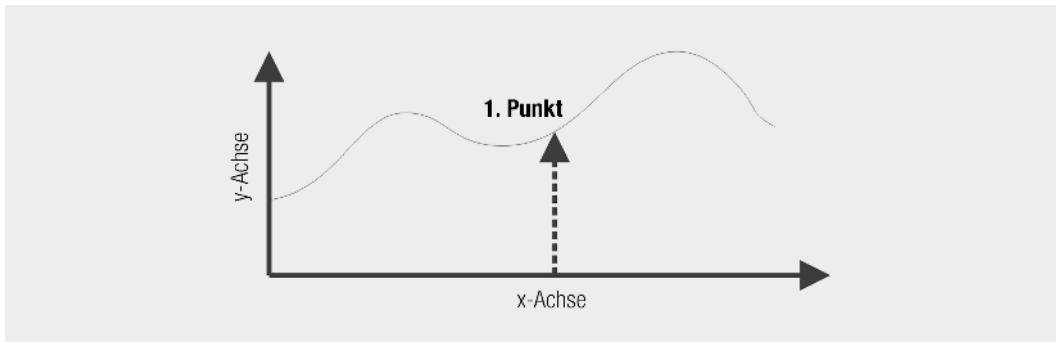


Abb. 11.1

Der Messungstyp erfolgt für **nur einen Wert auf der y-Achse, der abhängig von einem Wert auf der x-Achse ist.**

Sie dient dazu, einen Messwert zu einem präzise definierten Zeitpunkt oder bei Erfüllung einer genau definierten Bedingung zu erhalten. Hierbei gilt folgende Syntax:

```
.meas [ac or dc or op or tran or tf or noise] <name>  
+ [<find or deriv or param> <expr>]  
+ [when <cond> or at=<val>]  
+ [td=<vall>]  
+ [<rise or fall or cross>=<N> or last ]]
```


Sie bedeutet:

```
.meas [ac or dc or op or tran or tf or noise] <name>
```

Deklarationen des Simulationstyps sind nützlich, wenn ein Messskript geschrieben wird. **In den meisten Fällen kann diese Deklaration entfallen.**

<name> ist der **Name der Variablen, der das Resultat** der Simulationsdirektive `.meas` zugewiesen wird. Diese Variable kann selbst von einer weiteren `.meas` Direktive aufgerufen werden und so weiter.

```
+ [<find or deriv or param> <expr>]
```

Optionaler Parameter: Definiert eine Aktion, die auf <expr> angewendet werden soll, ehe der Ausdruck der Variablen <name> zugewiesen wird (Einzelheiten siehe Tabelle 11.1).

```
+ [when <cond> or at=<val>]
```

Optionaler Parameter: Bedingung oder Moment der Messung (Einzelheiten siehe Tabelle 11.1).

```
+ [td=<val1>]
```

Optionaler Parameter: Fügt eine Wartezeit bis zur Messung ein (Einzelheiten siehe Tabelle 11.1).

```
+ [<rise or fall or cross>=<N> or last ]]
```

Optionaler Parameter: Bedingungen zur ausgewählten Messung (Einzelheiten siehe Tabelle 11.1).

Schlüsselwort	Bedeutung
	Den Befehl einem Simulationstyp zuordnen
ac	Simulationsdirektive .meas nur auf ac Analyse anwenden
dc	Simulationsdirektive .meas nur auf dc Analyse anwenden
op	Simulationsdirektive .meas nur auf op Analyse anwenden
tran	Simulationsdirektive .meas nur auf trans Analyse anwenden
tf	Simulationsdirektive .meas nur auf tf Analyse anwenden

11 NUMERISCHE MESSERGEBNISSE, DOWNLOADS, DATENSICHERUNG UND MODELLE

11.2 MEAS – Messwerte numerisch anzeigen

Schlüsselwort	Bedeutung
noise	Simulationsdirektive .meas nur auf noise Analyse anwenden
	Diese Deklarationen sind besonders beim Schreiben eines Messskripts nützlich, siehe Abschnitt 2 bis 6.
	Einer Variablen einen Namen zuweisen
<name>	Name der Variablen, wie er in die Datei SPICE Error Log geschrieben wird
	Einen Wert auf der y-Achse finden
max <expr>	Den Höchstwert von <expr> finden
min <expr>	Den Mindestwert von <expr> finden
pp <expr>	Den Peak-zu-Peak-Wert von <expr> finden
mag <expr>	Liefert die Amplitude von <expr> zurück (Verwendung bei AC Simulation)
	Einen Wert auf der y-Achse berechnen
avg <expr>	Den Mittelwert von <expr> berechnen (modifizierte Funktion im Falle einer Noise-Analyse)
rms <expr>	Den quadratischen Mittelwert von <expr> berechnen (modifizierte Funktion im Falle einer Noise-Analyse)
integ <expr>	Den Integerwert von <expr> berechnen (modifizierte Funktion im Falle einer Noise-Analyse)
	Berücksichtigung eines Intervalls auf der x-Achse
trig <cond>	Wenn die Bedingung <cond> erfüllt ist, markiert trig den Beginn des zu berücksichtigenden Intervalls auf der x-Achse. Wird kein Wert für trig vorgegeben, entspricht der Beginn des Intervalls standardmäßig dem Ursprung der x-Achse .
targ <cond>	Wenn die Bedingung <cond> erfüllt ist, markiert targ das Ende des zu berücksichtigenden Intervalls auf der x-Achse. Wird kein Wert für targ vorgegeben, entspricht das Ende des Intervalls standardmäßig dem Endpunkt der x-Achse .
	Anmerkung: Werden weder trig , targ noch when festgelegt, wird .meas auf die gesamte x-Achse angewendet.
val=<quantity>	Der bei einem Bedingungstest auf der x-Achse zu erreichende Wert <quantity>
	Nach einer Verzögerung wirksam
Command td=<val1>	Befehl nur nach der Verzögerung <val1> (x-Achse) ausführen
	Bedingungen
Condition rise=<N>	Sucht den n-ten Wert auf der y-Achse und betrachtet nur Werte auf der ansteigenden Signalfanke , wie in der Bedingung formuliert. Die x-Achse wird von links nach rechts (x-Werte in ansteigender Folge) durchlaufen. Wenn der angeforderte n-te Wert nicht existiert, erscheint eine Fehlermeldung.
Condition rise=last	Sucht den ersten Wert auf der y-Achse und betrachtet nur Werte auf der ansteigenden Signalfanke , wie in der Bedingung formuliert. Die x-Achse wird von rechts nach links (x-Werte in abfallender Folge) durchlaufen.

17.16 Bestimmung eines Transformators entsprechend den Eigenschaften eines Schaltnetzteils

Heutzutage stellen viele Hersteller ihren Kunden Software zur Verfügung, mit deren Hilfe sie das oder die am besten für ihre Anforderungen geeigneten Modelle aus dem Sortiment des Herstellers finden können sollen.

Bauen wir uns also ein Schaltnetzteil mit einer Gleichspannungsversorgung von nominell 4,5 V bei einer Mindestspannung von 3,5 V und einer Maximalspannung von 5,5 V (3 R20-Batterien zu je 1,5 V). Die Sekundärspannung wird auf 12 V für einen Strom von 400 mA festgelegt. Der Zweck dieser Schaltung besteht darin, LEDs in einer Serienanordnung mit Spannung zu versorgen. Wir werden im weiteren Verlauf eine Änderung an dieser Schaltung vornehmen, um den Ausgang des „Spannungsgenerators“ in einen „Stromgenerator“ umzuwandeln, indem wir das zum FB-Eingang des Steuer-ICs **LT1170** angeschlossene Signal ändern.

Die von uns gewählte Schaltung **LT1170** ist eine relativ alte Standardschaltung aus dem LTC-Sortiment mit einer festen Frequenz von 100 kHz, für die nur wenige Bauteile benötigt werden.

Auch wenn eine Isolierung zwischen Primär- und Sekundärwicklung nicht unbedingt erforderlich ist, haben wir uns für das Konzept eines **Sperrwandlernetzteils** mit unvollständiger Entmagnetisierung (bei Volllast) entschieden. Folglich wird der Transformator nicht als effektiver Transformator, sondern als gekoppelten Induktivitäten betrieben, da bei diesem Betriebstyp keine Primär-Sekundär-Transparenz gegeben ist.

Die Leistung ist mit 4,38 W recht niedrig. Da die Autonomie möglichst hoch sein soll, wird die Effizienz einer der wesentlichen Faktoren bei der Bauteilauswahl sein. Wir benötigen eine Mindesteffizienz von 80 Prozent (bei Nennspannung), wobei ein Überspannungsschutz und eine Dämpfung gegen das Aufschwingen ggf. vorhanden sein müssen.

Zur Auswahl eines Transformators aus der WE-FLEX-Baureihe von Würth Elektronik, der unsere Anforderungen erfüllt, setzen wir die kostenlose Software **COMPONENT SELECTOR** von Würth Elektronik ein: Download unter www.we-online.de/component-selector. Somit kann jeder interessierte Leser unser Beispiel problemlos reproduzieren.