

Kurze Anleitung
für das Simulationsprogramm

LT-SPICE

Prof. Dr.-Ing. Karl-Hermann Cordes

Version 3.6: Dez. 2013

Inhalt

1	Vorbemerkungen	3
2	Installation	3
2.1	Vorbereitungen	3
2.2	Programm-Installation	3
3	Zeichnen einer zu simulierenden Schaltung	4
3.1	Platzieren der Bauelemente	4
3.2	Verbindungen herstellen	6
3.3	Attribute der Bauelemente	7
3.4	Knoten-Namen	8
3.5	SPICE-Befehle und Netzlisten-Zeilen, Kommentar-Text	9
4	Die SPICE-Circuit-Datei	10
5	Starten der Simulation und Ergebnis-Darstellung	11
5.1	Arbeitspunkte der einzelnen Bauelemente (.OP)	11
5.2	Darstellung der Ergebnisse der Analysen .DC, .AC und .Tran	12
5.3	Operationen im Plot-Fenster	14
5.4	Einbinden mathematischer Operationen	18
5.5	FFT-Plot	18
5.6	Einstellen der Betriebstemperatur	21
5.7	Einbinden von Wave-Dateien	22
5.8	Laplace-Übertragungsfunktion	24
5.9	Kommandos zu Analysen bzw. Auswertungen von Analysen	25
6	Zeichnen von Symbolen	25
7	Hierarchische Schaltpläne	26
7.1	Zeichnen eines hierarchischen Schaltplanes	27
7.2	Beispiel	27
8	LT-SPICE-Einstellungen (Control Panel)	31
8.1	Operation	31
8.2	Compression	31
8.3	SPICE	31
8.4	Save Defaults	31
8.5	Drafting Options	32
	LT-SPICE-Shortcuts	33
9	Literatur	34

1 Vorbemerkungen

LT-SPICE ist ein voll funktionsfähiger SPICE-Simulator der Firma Linear Technology, der besonders für die Simulation von Schaltreglern entwickelt wurde, aber auch für beliebige Schaltungen eingesetzt werden kann [1], [2]. Grundlage ist das Simulationsprogramm SPICE 3 der Universität Berkeley mit einigen sehr hilfreichen Ergänzungen der Firma Linear Technology.

Die Eingabe der Schaltung erfolgt über ein Schematic-Capture-Werkzeug. Die gezeichnete Schaltung, in die auch die relevanten SPICE-Kommandos eingetragen werden, wird beim Starten des Simulators in eine Circuit-Datei umgewandelt und diese dann dem Simulator übergeben. Die Titelzeile und das .END-Statement werden nicht im Schaltplan angegeben; beide werden automatisch gesetzt. Die Beschreibung der Schaltung kann selbstverständlich auch direkt in Form einer Circuit-Textdatei erfolgen. Hierzu kann ein beliebiger Text-Editor (z.B. Notepad) oder besser der in LT-SPICE eingebaute Editor eingesetzt werden. – Es wird empfohlen, sich nebenbei mit den allgemeinen SPICE-Regeln vertraut zu machen. Dafür steht das Skript „Einführung in das Simulationsprogramm *SPICE*“ [3] zur Verfügung.

Die Ergebnisse können anschließend als Kurven dargestellt werden. Sehr hilfreich ist dabei die Möglichkeit, in der Schaltung mit der Maus auf einen Knoten zu zeigen und das Knotenpotential sofort grafisch dargestellt zu bekommen. Ähnliches gilt auch für Ströme durch Bauteile. Im Ergebnisplot sind außerdem „Cursor-Messungen“ möglich. Auch mathematische Rechenoperationen können eingebunden werden. Kurzum: das Programm ist außerordentlich vielseitig und trotzdem leicht zu bedienen.

Obwohl das Programm eine wirklich brauchbare *Hilfe* enthält, die einen raschen Einstieg erleichtert, soll in den folgenden Abschnitten eine kurze Anleitung in *deutscher* Sprache gegeben werden.

2 Installation

Bevor mit der Installation des eigentlichen Simulators begonnen wird, sollten einige Vorbereitungen getroffen werden. Danach wird das Programm LT-SPICE installiert. Da LT-SPICE das einfache Einbinden selbsterstellter Symbole gestattet, können anschließend auch solche Symbole in den Bibliotheks-Ordner von LT-SPICE gebracht werden.

2.1 Vorbereitungen

- Einen Ordner `Spicelib` einrichten, z.B. `D:\Spicelib`. In diesem Ordner werden die Modell-Bibliotheken gesammelt. Am einfachsten ist es, den kompletten Ordner `Spicelib` vom Hochschul-Server [5] zu importieren und direkt unter `D:\` zu platzieren.
- Einen Ordner `Circuit` (für Circuit-Textdateien, Endung `.cir`) einrichten, z.B. `D:\Circuit`.
- Einen Ordner `Schematic` (für Schaltpläne, Endung `.asc`) einrichten, z.B. `D:\Schematic`.

2.2 Programm-Installation

- Die Webseite von Linear Technology (www.linear.com) aufsuchen und die *gepackte* Datei `LTspiceIV.exe` importieren und irgendwo *temporär* speichern.
- Von dort aus die Installation starten durch **Doppel-Klick** auf die Datei `LTspiceIV.exe`. Seit Windows 7 schlage ich vor, LT-SPICE direkt im Wurzelverzeichnis einer Festplatten-Partition zu installieren, also z.B. unter `C:\LTC\LTspiceIV\`, um Probleme mit der Benutzerkontenverwaltung zu vermeiden. Auch die Installation auf einem USB-Stick ist möglich.
- Auf dem Desktop wird automatisch eine Verknüpfung mit `LTspice IV` hergestellt. Das Symbol erscheint auf dem Desktop.



- In LT-SPICE stehen praktisch alle wichtigen Symbole für das Zeichnen von Schaltungen zur Verfügung. Es besteht aber die Möglichkeit, eigene Schaltzeichen zu entwerfen und diese in LT-SPICE einzubinden. So sind z.B. im Unterordner `sym_neu` des Ordners `Neue Symbole` [4] einige von mir abgeänderte und auch einige neue Symbole zusammengestellt (Endung `.asy`). Dazu gehört z.B. das europäische Zeichen für den ohmschen Widerstand. Der komplette *Inhalt* des Ordners `sym_neu` wird einfach in den LT-SPICE-Ordner `sym` kopiert. Ziel-Pfad: `C:\LTC\LTspiceIV\lib\sym\`. Dort vorhandene Symbole, die denselben Namen haben wie Elemente aus dem Ordner `sym_neu`, werden dabei allerdings überschrieben. Dies gilt z.B. für den Widerstand. Da diese Prozedur nach jedem Programm-Update von LT-SPICE erforderlich wird, kann die kleine Batch-Datei `Symbole.bat` – zu finden ebenfalls im Ordner `Neue Symbole` – die Arbeit erleichtern. Sie braucht nur durch einen **Doppel-Klick** gestartet zu werden. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass der Ordner `sym_neu` vorher im Ordner `lib` platziert worden ist und der oben angegebene Ziel-Pfad gültig ist.

3 Zeichnen einer zu simulierenden Schaltung

Das Entstehen einer Schaltung wird am besten anhand eines einfachen Beispiels beschrieben. Wir wählen hier einen Verstärker mit nur einem Bipolar-Transistor, siehe **Bild 5**. Die Schaltung soll hier den Namen `Verst-1.asc` erhalten und in einem Unterordner des vorbereiteten Ordners `Schematic` (siehe Abschnitt 2.1) abgespeichert werden. Der Unterordner erhält den Namen `Projekt_1`.

3.1 Platzieren der Bauelemente

Die einzelnen Arbeitsschritte werden nun der Reihe nach aufgelistet und zum Teil kurz erläutert:

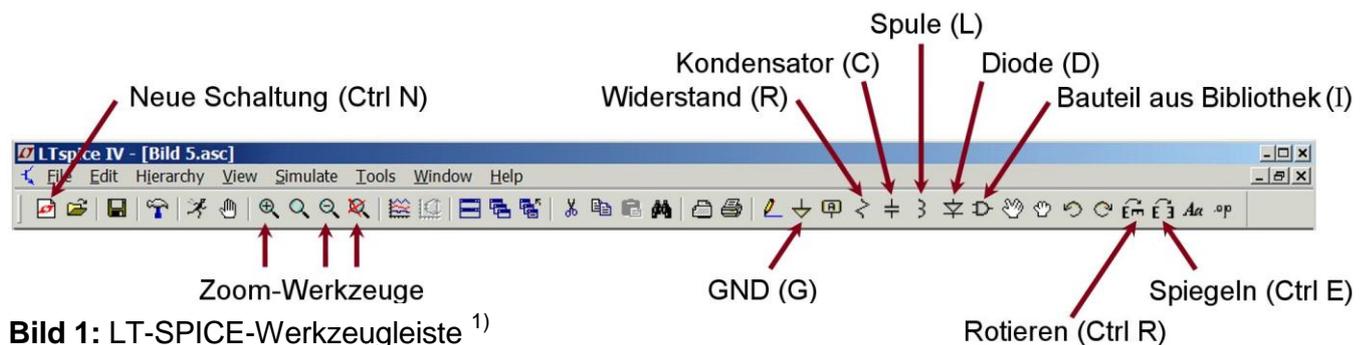


Bild 1: LT-SPICE-Werkzeugleiste ¹⁾

¹⁾ Die Shortcuts (in Klammern) werden später im **Abschnitt 8.5** erläutert.

- Starten des Programms LT-SPICE durch **Doppel-Klick** auf das Symbol: 
- Öffnen einer „Neuen Schaltung“ durch **Links-Klick** auf die entsprechende Schaltfläche, siehe **Bild 1** oder Shortcut `Ctrl N`.
- Am besten gleich speichern: `File` → `Save As` in den Unterordner `Projekt_1` des Ordners `Schematic`, z.B. `D:\Schematic\Projekt_1\Verst-1.asc`. Später kann dann einfach mittels des Windows-Befehls `Ctrl S` gespeichert werden, weil dann der Pfad bekannt ist.
- Grid-Punkte können durch den Shortcut `Ctrl G` aus- oder eingeschaltet werden. Außerdem stehen „Zoom-Werkzeuge“ zur Verfügung, siehe **Bild 1**.
- Das Einstellen von Farben und anderen Optionen wird später im **Abschnitt 8.5** erläutert. Dies würde an dieser Stelle nur den raschen Einstieg in das Programm stören.

- **Anmerkung:** Durch Zeigen mit dem Maus-Cursor auf Teile in der Schaltung erhält man in der Statuszeile (linke untere Bildschirm-Ecke von LT-SPICE) hilfreiche Informationen.
- **Links-Klick** auf das zu platzierende Bauelement, siehe **Bild 1**. Einfacher ist es, Shortcuts zu verwenden. So erscheinen die Elemente „R“, „C“, „L“ bzw. „D“ einfach durch Tippen der entsprechenden Buchstaben auf der Arbeitsfläche.

Alle weiteren Bauelemente können über den Shortcut „I“ (dieser Shortcut muss noch definiert werden, siehe **Abchnitt 8.5**) in der Symbol-Bibliothek erreicht werden: Über das sich öffnende Dialogfeld „**Select Component Symbol**“, siehe **Bild 2**, kann das gewünschte Bauelement gesucht werden. Soll z.B. ein NPN-Transistor in der Schaltung verwendet werden, reicht es bereits aus, die beiden ersten Buchstaben in die „Bauteil-Zeile“ des Dialogfeldes einzutippen (**Bild 2**). Oft stehen mehrere Symbole zur Auswahl. Das Aussehen eines Symbols hat keinen Einfluss auf das spätere Simulationsergebnis. Wichtig ist nur, dass die Zahl der Anschlüsse und deren Reihenfolge mit den Angaben im verwendeten SPICE-Modell übereinstimmen.

- Vor dem **Absetzen** eines Bauelementes, d.h. solange es noch *selektiert* ist, kann es *gespiegelt* (Shortcut Ctrl E) oder *gedreht* (Ctrl R) werden. Später können der *Verschiebe-* oder der *Streck-*Befehl (M oder F8, vergleiche **Bild 4**) zum *Selektieren* verwendet werden. Werden dann die Werkzeug-Symbole zum Spiegeln bzw. Drehen angeklickt, darf man sich nicht daran stören, dass die selektierten Bauteile mit der Maus mitgenommen werden.

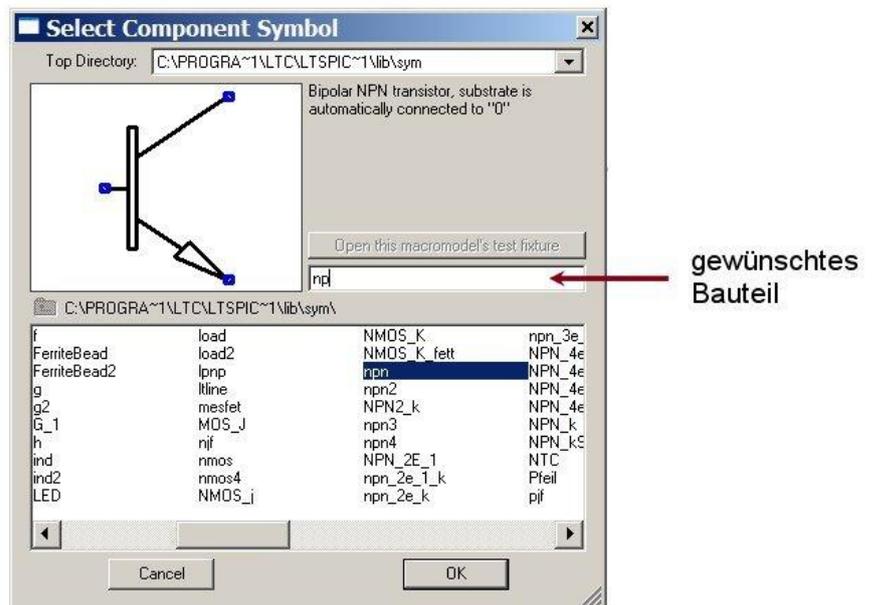


Bild 2: Auswahl eines Bauelementes

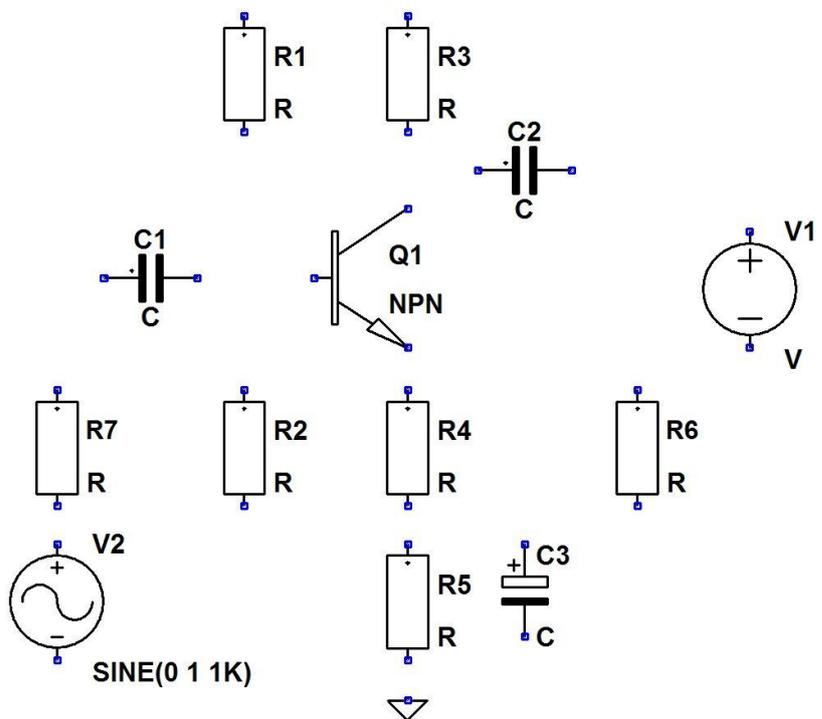


Bild 3: Platzierung der Bauelemente

- **Hinweis:** Einige Bauelemente enthalten zur Kennung des *positiven* Anschlusses eine kleine Markierung. Obwohl diese für nichtgepolte Elemente, wie z.B. für Widerstände und normale Kondensatoren, eigentlich nicht erforderlich ist, kann sie zur Erkennung der Stromrichtung hilfreich sein: Der vom positiven zum negativen Knoten fließende Strom wird bekanntlich als positiv definiert.
- In unserem Beispiel werden insgesamt sieben Widerstände, drei Kondensatoren, ein NPN-Transistor und zwei Spannungsquellen benötigt. Für die Eingangsspannung wird das Symbol „Signal“ gewählt. Die Bauelemente könnten z.B., wie in **Bild 3** gezeigt, angeordnet werden. **Achtung:** Nicht das GND-Symbol vergessen!

3.2 Verbindungen herstellen

Das Herstellen der *Verdrahtung* ist in LT-SPICE sehr einfach. Die wichtigsten Arbeitsschritte:



Bild 4: Weitere Zeichenwerkzeuge

- Auswahl des Werkzeuges „Leitung“ (Wire, Shortcut F3), siehe **Bild 4**.
- Durch **Links**-Klick und Bewegen der Maus können dann die Leitungen (Wire) gezeichnet wer-

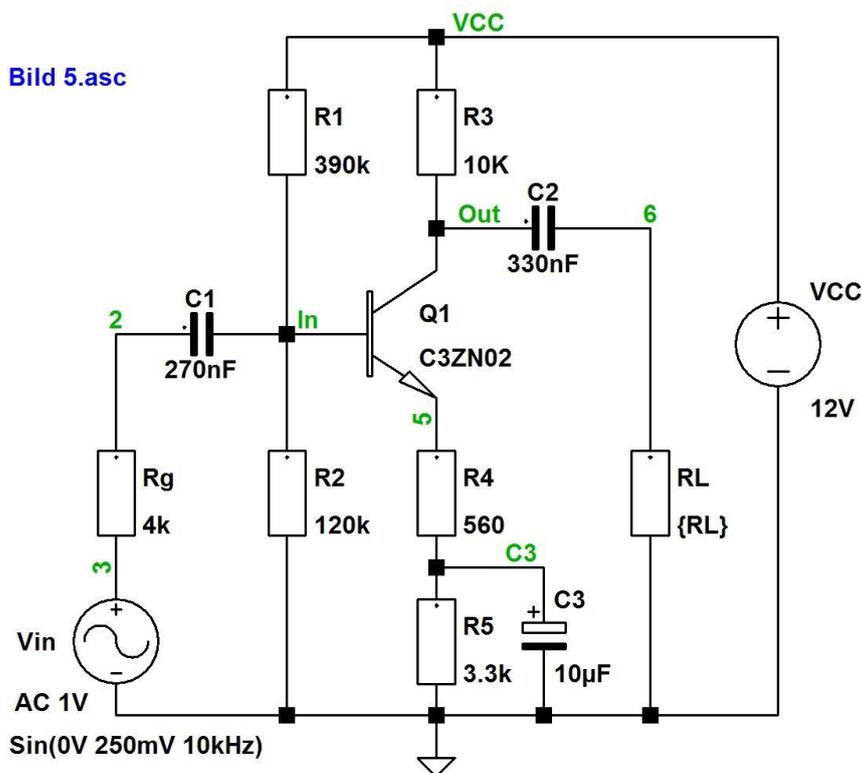


Bild 5:

Fertige Schaltung mit Simulationsanweisung

Das Modell steht hier direkt im Schaltplan und kann einfach editiert werden.

Im Normalfall ist es günstiger, die Bibliotheks-Anweisung mit dem kompletten Speicher-Pfad des Modells in den Schaltplan zu schreiben.

.Model C3ZN02 NPN (IS=1.1e-16 BF=190 ...)
.TRAN 0.2ms

.Param RL = 22k

den. Sie dürfen auch durch ein Bauteil hindurch gelegt werden. Durch **Rechts**-Klick oder **Esc** wird der Vorgang abgeschlossen. Dann werden Kurzschlüsse zwischen Bauteil-Anschlüssen automatisch beseitigt.

- Das Werkzeug „Strecken“ (Drag, Shortcut F8) dient zum Verändern von Leitungslängen oder allgemein zum Strecken. Zuerst wird das Werkzeug ausgewählt. Dann wird mit gedrückter **linker** Maus-Taste ein Rechteck um den zu streckenden Bereich gezeichnet, um ihn zu *selektieren* und das Strecken durch Bewegen der Maus vorgenommen. Die Verbindungen bleiben dabei erhalten. Der Vorgang wird durch **Rechts**-Klick oder **ESC** abgeschlossen.
- Das Werkzeug „Verschieben“ (Move, Shortcut M) dient, wie der Name schon ankündigt, zum Verschieben. Die Handhabung ist vergleichbar mit dem „Strecken“, allerdings werden nur selektierte Bereiche verschoben. Die Verbindungen werden nur mit verschoben, wenn sie auch selektiert sind. Der Vorgang wird durch **Rechts**-Klick oder **ESC** abgeschlossen.
- Weitere wichtige Werkzeuge: Löschen (F5 oder Del), Undo (Ctrl Z) und Redo (Ctrl Y).
- Leitungen können gekreuzt werden. Dabei entsteht keine Verbindung an der Kreuzungsstelle. Um eine Verbindung herzustellen, muss eine Leitung bis zum Anschlusspunkt geführt und dann durch **Links**-Klick die Verbindung hergestellt werden. Der Vorgang wird durch **Rechts**-Klick oder **ESC** abgeschlossen. Die fertig *verdrahtete* Schaltung ist in **Bild 5** wiedergegeben.
- Es gibt auch die Möglichkeit, „Linien“ zu zeichnen. Linien sind keine Leitungen und erscheinen nicht in der SPICE-Circuit-Datei. Sie können aber zur Hervorhebung oder Umrandung dienen. Das Linien-Werkzeug wird mit dem Shortcut Ctrl L gestartet. Durch **Rechts**-Klick auf die gezeichnete Linie öffnet sich ein Menü, das nachträglich die Einstellung des *Linien-Stiels* gestattet.

3.3 Attribute der Bauelemente

Nachdem die Leitungen verlegt sind, müssen die einzelnen Bauelemente Namen erhalten und mit Werten versehen werden. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass es in SPICE zwei verschiedene Arten von Bauelementen gibt: 1) einfache, zweipolige Elemente, wie z.B. Widerstände, Kondensatoren, Spulen und unabhängige Quellen, für die oft die Angabe eines Wertes oder weniger Parameter schon ausreicht und 2) komplexere Bauteile, die zur näheren Beschreibung eine Modell-Anweisung erfordern (Dioden, Transistoren, Subcircuits usw.). Im Folgenden werden die Arbeitsschritte kurz erläutert:

- Im einfachsten Fall reicht es aus, durch **Rechts**-Klick auf die Attribute „Bauteil-Name“ (z.B. R3) bzw. „Bauteil-Wert“ (z.B. R) ein kleines Dialogfeld zu öffnen, um die Einträge zu ändern.
- Durch Zeigen auf das Bauelement mit der Maus und **Rechts**-Klick kann ein anderes Dialogfeld geöffnet werden, das die Auswahl von Bauelementen gestattet, für die in LT-SPICE fertige Modelle existieren. Für einen integrierten MOS-FET (mit vier Anschlüssen) wird ein abgeändertes Dialogfeld geöffnet. Dieses gestattet den Eintrag der relevanten geometrischen Abmessungen. Auch bei Spannungs- oder Stromquellen kann diese Prozedur verwendet werden.
- Durch Zeigen auf das Bauelement mit der Maus und **Ctrl** und **Rechts**-Klick wird ein *allgemeines Dialogfeld* geöffnet, das die wichtigsten Einträge gestattet. Von dieser Möglichkeit wird häufig Gebrauch gemacht, siehe **Bild 6**. Durch **Doppel**- oder **Rechts**-Klick auf eine Zeile in der Spalte „Value“ wird ein Editieren der betreffenden Zeile ermöglicht. – Bei einem integrierten MOS-FET sind oft neben der Nennung der Hauptmaße W , L und dem Vervielfachungsfaktor M die Angaben AD , AS , PD und PS für die Berechnung der Drain- und Source-Gebiete erforderlich. Diese können dann einfach der Reihe nach in die Zeilen „SpiceLine“ und „SpiceLine2“ geschrieben werden. Eine Reihenfolge ist nicht zu beachten. Möchte man die Angaben W , L und M im Schaltplan sichtbar haben, ist es am besten, W und L in der Zeile „Value“ anzugeben und M in der Zeile „Value2“ (oder auch umgekehrt). Der Transistor-Typ wird am besten in die Zeile „SpiceModel“ geschrieben. Durch **Doppel**- oder **Rechts**-Klick in der Spalte „Vis.“ kann ein

Kreuz gesetzt werden, um das betreffende Attribut im Schaltplan *sichtbar* zu machen. Und so erscheinen die Einträge in der Netzliste (allgemeine Syntax):

```
<Name> Knoten1 Knoten2 [...] <SpiceModel>
+   <Value> <Value2> <SpiceLine> <SpiceLine2>
```

- Die Position eines Attributes kann durch vorheriges Aktivieren des Verschiebe- oder auch des Streck-Werkzeuges (M oder F8) und **Links**-Klick auf das betreffende Attribut verändert werden. **Rechts**-Klick oder Esc beendet den Vorgang wieder.
- Bei aktiven Bauelementen, wie z.B. Transistoren wird als „Wert“ der *Bauteil-Typ* angegeben. In unserem Beispiel wird der Transistor-Typ „C3ZN02“ verwendet. Als Name wird „Q1“ vergeben.
- Die Spannungsquelle VCC für die Versorgungsspannung V_{CC} ist eine reine DC-Quelle. Als Attribute reichen der Name „VCC“ und der Wert „12V“ aus.
- Für die Eingangsquelle könnte prinzipiell das gleiche Symbol verwendet werden wie für die Versorgungsspannung, da die Form für SPICE keine Bedeutung hat. Es kann aber auch eine *Signal*-Quelle eingesetzt werden. Für eine solche existiert ein Dialogfeld, das durch **Rechts**-Klick auf das Bauelement geöffnet werden kann und dann eine genaue Spezifikation der Quelle erlaubt. – Ich bevorzuge die Verwendung des *allgemeinen Attribut-Fensters*, siehe **Bild 6**. Der Eintrag „AC

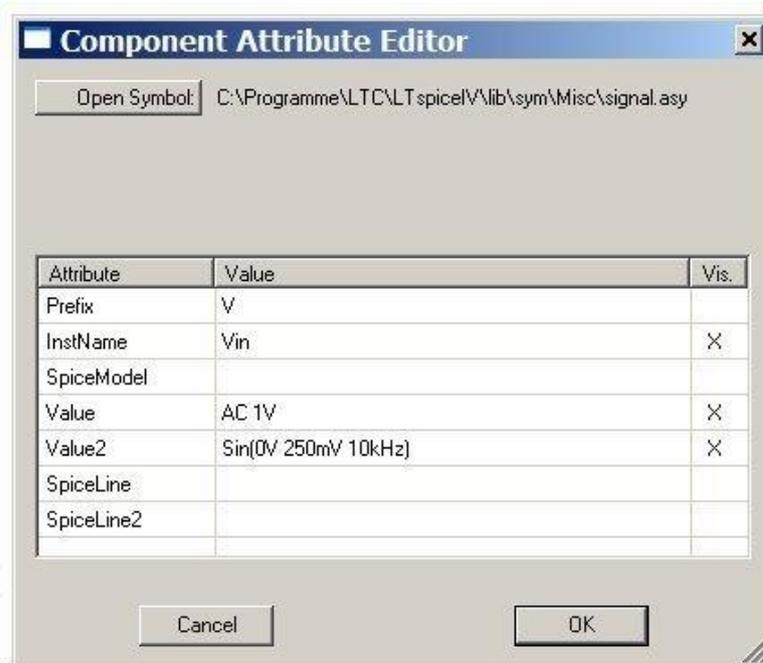


Bild 6:

Allgemeines Fenster zum Editieren der Bauelement-Attribute

Es wird geöffnet durch Zeigen auf das Bauelement und dann: Ctrl und Rechts-Klick.

Die Einträge können nach einem **Rechts**- oder **Doppel**-Klick editiert werden.

Wird in der Spalte „Vis.“ ein Kreuz gesetzt, wird der zugehörige Eintrag im Schaltplan sichtbar.

1V“ wird für die AC-Analyse benötigt, und durch „Sin(0V 250mV 10kHz)“ wird eine sinusförmige Spannungsquelle mit dem DC-Wert 0 V, der Amplitude 250 mV und der Frequenz 10 kHz spezifiziert. Die beiden Zeilen dürfen auch vertauscht werden. Die Angabe in nur einer der beiden Value-Zeilen ist ebenfalls zulässig. – Nähere Informationen zur Spezifikation von *unabhängigen* Spannungsquellen sind in der „eingebauten“ Hilfe, den Skripten der Firma Linear Technology [1] und [2] oder im Skript „Einführung in das Simulationsprogramm SPICE“ [3] zu finden.

- Der Lastwiderstand RL soll in diesem Beispiel *parametrisch* zugewiesen werden. Als Wert wird deshalb ein Parameter in geschweiften Klammern eingetragen. Dies kann ein beliebiges Zeichen sein, z.B. {a} oder besser: {RL}. Die Definition des Parameters erfolgt später.

3.4 Knoten-Namen

Beim Erstellen des Schaltplans werden vom Programm automatisch Knoten-Namen vergeben. Sehr viel sinnvoller ist es jedoch, eigene Namen vorzugeben. Die Arbeitsschritte:

- Auswahl des Werkzeuges „Knoten-Name“ (Label Net, Shortcut F4), siehe **Bild 4**. Es öffnet sich ein kleines Dialogfeld, das zur Gestaltung des Knotens dient.
- Zunächst wird der Knoten-Name in das editierbare Feld „ABC“ eingetragen. Dies reicht für die meisten Knoten bereits aus. Als Knoten-Namen sind prinzipiell alle Zeichen erlaubt, bis auf Sonderzeichen. – Zusätzlich besteht die Möglichkeit, über „Port Type“ den Knoten als Eingangs- Ausgangs- oder bidirektionalen Knoten zu definieren. Dies hat nur für das Aussehen der Schaltung eine Bedeutung, nicht aber für SPICE.
- Nach dem Drücken von „OK“ kann der Knoten-Name platziert werden. Wichtig ist, dass der Markierungspunkt wirklich genau auf eine Leitung oder deren Ende gesetzt wird! Der „Port Typ“ wird erst sichtbar, wenn der Knoten-Name genau das *Ende* einer Leitung trifft.

3.5 SPICE-Befehle und Netzlisten-Zeilen, Kommentar-Text

LT-SPICE bietet die besondere Möglichkeit, *SPICE-Befehle* und *Netzlisten-Zeilen* direkt in den Schaltplan schreiben zu dürfen. Dies macht eine Simulationsschaltung sehr übersichtlich. Alle Informationen, die für die Simulation relevant sind, stehen direkt in der Schaltung und brauchen nicht umständlich über Dialogfelder zur Anzeige gebracht zu werden. Die wichtigsten Arbeitsschritte werden im Folgenden kurz erklärt:

- Auswahl des Werkzeuges „SPICE“ (Shortcut S), siehe **Bild 4**.
- In das sich öffnende Text-Fenster können direkt die SPICE-Befehle (Dot-Kommandos) oder Netzlisten-Zeilen geschrieben werden. – In unserem Beispiel wird zunächst der Parameter des Lastwiderstandes RL definiert: `.Param RL = 22k` (nähere Informationen zur Parameter-Anweisung siehe *Hilfe* oder [1], [2] oder „*Einführung in das Simulationsprogramm SPICE*“ [3]). – Des Weiteren muss angegeben werden, wo SPICE das Modell des Transistors findet. Entweder direkt im Schaltplan: `.Model C3ZN02 NPN (IS=1.1e-16 BF=190 ...)` oder durch die Bibliotheks-Anweisung: `.Lib D:\Spicelib\C36\C3Z-N.phy` (Angabe des kompletten Pfades; dies ist die bevorzugte Methode). – Durch eine weitere Zeile wird die Simulationsanweisung spezifiziert: `.TRAN 0.2ms`. In LT-SPICE reicht es für die Transienten-Analyse in vielen Fällen bereits aus, nur die Endzeit, hier *0,2ms*, anzugeben.
- Die Anordnung von SPICE-Zeilen im Schaltplan ist beliebig. Sie kann sogar *senkrecht* erfolgen.
- Sollen im Fenster für SPICE-Direktive mehrere Zeilen untereinander geschrieben werden, wird eine neue Zeile mit dem Shortcut **Ctrl M** gestartet. – Lange Zeilen können geteilt werden. Wie beim Schreiben einer Circuit-Datei ist dann aber darauf zu achten, dass jede Zeilen-Fortsetzung mit einem Pluszeichen (+), gefolgt von mindestens einem Leerzeichen, beginnt, siehe **Bild 7**.

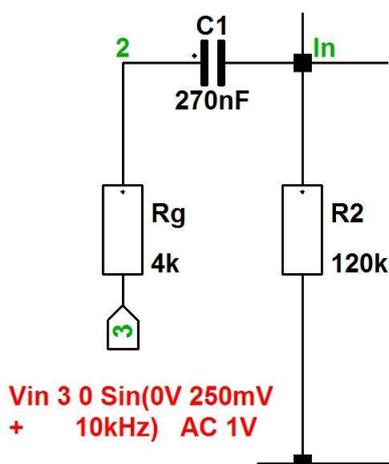


Bild 7:

Angabe eines Bauelementes als Netzlisten-Zeile

Hier liegt die Spannungsquelle „ V_{in} “ zwischen den Knoten „3“ und „0“. Danach folgt die Wertangabe „ $Sin(0V \dots)$ “.

Passt die gewünschte Anweisung nicht in eine Zeile, kann eine neue Zeile begonnen werden (Ctrl M). Die Fortsetzung muss mit einem Pluszeichen (+) beginnen, gefolgt von mindestens einem Leerzeichen.

Das Fortsetzungszeichen (+) wird *nicht* verwendet, wenn eine *neue Anweisung* beginnt!

- In LT-SPICE können Bauteile statt durch Symbole auch durch Netzlisten-Zeilen in der Schaltung definiert werden. Von dieser Möglichkeit kann vorteilhaft Gebrauch gemacht werden, wenn Bauteile nicht direkt zur Schaltung dazugehören, wie z.B. externe Spannungs- oder Stromquellen (vergl. **Bild 7**) oder auch externe Beschaltungen von Operationsverstärkern usw.
- Für Kommentar-Text steht das Werkzeug „Kommentar“ (Shortcut T), siehe **Bild 4**, zur Verfügung. Kommentar-Text ist nicht SPICE-relevant und dient nur zur Erläuterung. Der Text kann auch *senkrecht* dargestellt werden.
- Wenn eines der Fenster, SPICE-Direktive oder Kommentar, geöffnet ist, kann nachträglich noch die Bedeutung geändert werden. Dies kann durch die entsprechende Markierung erfolgen: Comment oder SPICE directive.
- Wenn die Schaltung fertig ist, sollte mit dem bekannten Shortcut **Ctrl S** gespeichert werden. Dies ist zwar keine Voraussetzung für die nachfolgende Simulation, ist aber dennoch sinnvoll.

4 Die SPICE-Circuit-Datei

LT-SPICE wandelt die gezeichnete Schaltung schon vor Beginn der Simulation in eine Circuit-Datei um. Diese wird automatisch erzeugt. Sie kann nach der Schaltungseingabe durch View SPICE Netlist dargestellt werden. Zu der in **Bild 5** gezeigten Schaltung hat sie folgendes Aussehen:

```
* D:\Schematic\Projekt_1\Bild 5.asc
R2 In 0 120k
Q1 Out In 5 0 C3ZN02
R4 5 C3 560
R3 VCC Out 10K
R1 VCC In 390k
VCC VCC 0 12V
C1 2 In 270nF
Vin 3 0 AC 1V Sin(0V 250mV 10kHz)
C2 Out 6 330nF
RL 6 0 {RL}
Rg 2 3 4k
R5 C3 0 3.3k
C3 C3 0 10µF
.TRAN 0.2ms
.Model C3ZN02 NPN (IS=1.1e-16 BF=190 ...)
.Param RL = 22k
.backanno
.end
```

Diese Datei mit der Endung `.net` erscheint in dem Verzeichnis, in dem auch die Schaltung gespeichert ist. Sie wird normalerweise nach dem Schließen von LT-SPICE wieder gelöscht, kann aber auch erhalten werden (entweder: **alles Markieren**, dann **Ctrl C** (in die Zwischenablage kopieren) und dann als Text-Dokument mit der Endung `.net` speichern. Oder: **Tools** → **Control Panel** → **Operation** → **Automatically delete .net files** → **No**). – Das einzige ungewohnte Kommando `.backanno` dient dazu, während der Simulation dem Ergebnis-File (RAW-Datei, Endung `.raw`) Informationen zuzusetzen, die später das Darstellen von Strömen in Bauteil-Knoten mittels Maus-Klick ermöglicht.

Die Netzliste wird normalerweise nicht weiter benötigt. Wenn jedoch irgendwelche Fehler auftreten und die Simulation vielleicht nicht startet, kann ein Blick auf die Netzlisten-Zeilen oft helfen, triviale Fehler zu entdecken.

5 Starten der Simulation und Ergebnis-Darstellung

Wie eingangs schon erwähnt, wird die Schaltung automatisch in eine Simulationsdatei (Netzliste mit SPICE-Befehlen) umgewandelt und dient als Eingangs-File für die Simulation. – Gestartet wird die Simulation durch **Links**-Klick auf das „Run-Männchen“, siehe **Bild 8**. Durch **Links**-Klick auf die



Bild 8: Weitere Werkzeuge

Schaltfläche „Halt“ kann die Simulation angehalten werden. Für beide Befehle können Shortcuts definiert werden. Ich verwende die **Leertaste** für das Starten und **H** für das Stoppen. Wie die Shortcuts eingerichtet werden, wird im **Abschnitt 8.5** erläutert.

Im Folgenden werden für die in **Bild 5** gezeigte Schaltung einige Simulationen beschrieben und die Darstellung der Ergebnisse erläutert.

5.1 Arbeitspunkte der einzelnen Bauelemente (.OP)

Die einfachste Analyse ist die Bestimmung der Arbeitspunkte der in der Schaltung verwendeten Bauelemente. Das sind die DC-Knoten-Potentiale und die Ströme durch die Bauelemente. Die wichtigsten Arbeitsschritte werden kurz aufgelistet:

- In der Schaltung **Bild 5** die Transienten-Anweisung `.Tran 0.2ms` entfernen und durch die Arbeitspunkt-Anweisung `.OP` (Operation Point) ersetzen, damit nur die Arbeitspunkte ermittelt und sofort angezeigt werden.
- Simulation starten, siehe **Bild 8**. Danach erscheint sofort das Ergebnis der Analyse in Form einer Tabelle, siehe **Bild 9**.

The screenshot shows the status window of LTspice IV displaying the results of a DC operating point analysis. The window title is `* D:\Schematic\Projekt_1\Bild 5.asc`. The content is as follows:

```

--- Operating Point ---

V(in):      2.59429      voltage
V(out):     7.25349      voltage
V(5):       1.84179      voltage
V(c3):      1.57459      voltage
V(vcc):     12          voltage
:           :           :
I(R2):      2.16191e-005 device_current
I(Vin):     7.00457e-019 device_current
I(Vcc):     -0.000498768 device_current
  
```

Bild 9: Ergebnisse der DC-Arbeitspunkt-Analyse (Auszug)

- Die Ergebnisse werden darüber hinaus in der TL-SPICE-Statuszeile (ganz unten links) angezeigt, wenn man mit der Maus auf einen Knoten oder Bauteil-Anschluss zeigt.

- Während einer AC-Analyse werden zusätzlich auch die Kleinsignal-Parameter der Halbleiter-Bauelemente berechnet, wie beispielsweise die innere Steilheit g_m (ohne Bahnwiderstände) und die wirksamen Kapazitäten im Arbeitspunkt. Diese Ergebnisse werden ins *Error-Log-File* geschrieben. Sie können durch View → SPICE Error Log sichtbar gemacht werden. Diese Datei ist normalerweise nicht permanent. Sie kann aber auf zweierlei Weise gespeichert werden. Entweder: alles Markieren → Ctrl C (in die Zwischenablage kopieren) und dann als Text-Dokument speichern (mit der Endung `.log`). Oder: Tools → Control Panel → Operation → Automatically delete .log files → No. Diese letzte Methode führt aber im Laufe der Zeit zu viel Daten-Müll!

5.2 Darstellung der Ergebnisse der Analysen .DC, .AC und .Tran

In den meisten Anwendungen möchte man nicht nur die Ergebnisse für einen Arbeitspunkt haben, sondern interessiert sich vielmehr für die Abhängigkeit der Ergebnisse von Spannungen, Strömen, der Temperatur, der Frequenz oder der Zeit. Hierfür sind bekanntlich die DC-Analyse (`.DC`), die AC-Analyse (`.AC`) und die Transienten-Analyse (`.Tran`) vorgesehen. Auf die Einzelheiten soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Nähere Informationen hierzu sind in der „eingebauten“ *Hilfe* oder im Skript „Einführung in das Simulationsprogramm SPICE“ [3] oder in [8] zu finden. Im Folgenden soll aber kurz die grafische Darstellung der Simulationsergebnisse am Beispiel einer Transienten-Analyse für die Schaltung **Bild 5** beschrieben werden.

- In der Schaltung **Bild 5** die Arbeitspunkt-Anweisung `.OP` entfernen und wieder durch die Transienten-Anweisung `.Tran 0.2ms` ersetzen. Hierzu kann auch das LT-SPICE-Fenster zum Editieren der Simulations-Kommandos dienen, siehe **Bild 10**. Zunächst wird für die Art der Analyse

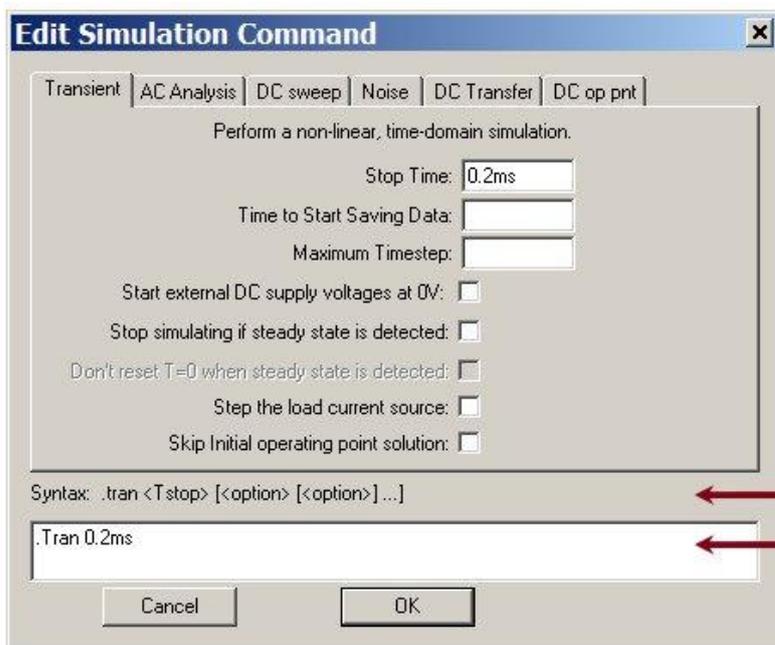


Bild 10:

Fenster zum Editieren der Simulations-Kommandos.

Es wird wie folgt geöffnet:

Werkzeugleiste →
Schaltfläche Simulate →
Edit Simulation Cmd.

die entsprechende Registerkarte gewählt, hier z.B. Transient. Danach können entweder die vorbereiteten Felder ausgefüllt werden oder man schreibt gleich die Anweisung in das untere Kommando-Fenster. Die Syntax ist zur Erinnerung über dem Kommando-Fenster angegeben (siehe braune Pfeile). Nach dem Drücken von OK kann dann die neue Anweisung platziert werden. Der Punkt vor der `.OP`-Anweisung wird automatisch durch ein Semikolon ersetzt, wodurch die Anweisung *ausgeschaltet* und das neue Kommando wirksam wird.

- Simulation starten durch **Links**-Klick auf das „Run-Männchen“ (Leertaste), siehe **Bild 8**.
- **Links**-Klick auf das Feld „Kurve auswählen“, siehe **Bild 8**.

- Es öffnet sich ein Fenster „Select Visible Waveforms“. Nach dem Auswählen eines Knoten-Potentials oder eines Bauelement-Stromes wird das Simulationsergebnis als Plot dargestellt. – Die Auswahl ist nicht auf die Darstellung einer Kurve beschränkt: Bei gleichzeitigem Drücken der **Ctrl**-Taste können auch mehrere markiert und anschließend dargestellt werden.
- Im Fenster „Select Visible Waveforms“ kann durch Drücken von **Alt** und **Doppel-Klick** ein Fenster geöffnet werden, das die Eingabe eines komplexeren Ausdruckes gestattet. Dieser kann auch mathematische Verknüpfungen enthalten. Nähere Informationen hierzu sind in der „eingebauten“ *Hilfe* oder im Skript „Einführung in das Simulationsprogramm SPICE“ [3] zu finden.
- Elegant gelöst ist die Verwendung eines speziellen Cursors in LT-SPICE. Durch Zeigen mit der Maus auf eine Leitung verwandelt sich der normale Cursor in einen *Spannungs-Cursor* (*rote Prüfspitze*) vergleiche **Bild 11**. Durch **Links**-Klick wird sofort das Potential der Leitung, d.h. des zugehörigen Knotens, dargestellt, z.B. „V(Out)“. Auch in der Statuszeile, ganz unten links, wird

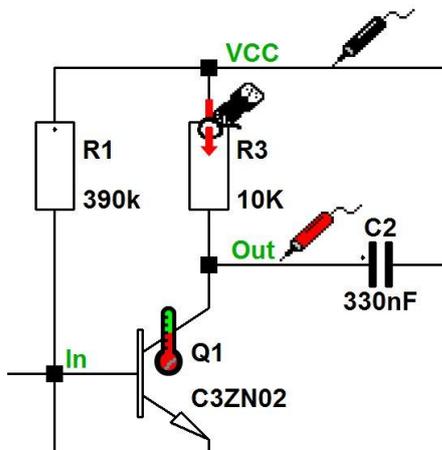


Bild 11: Spannungs-Cursor, Referenz-Markierung, Strom-Cursor und Leistungs-Cursor

Spannungs-Cursor (*rote Spitze*): Auf die Leitung zeigen.

Referenz-Markierung (*schwarze Spitze*): Auf die Leitung zeigen und **Rechts**-Klick: → „Mark Reference“.

Strom-Cursor:

a) Bauteilstrom: Auf das Bauelement zeigen;

b) Leitungsstrom: **Alt**-Taste und auf die Leitung zeigen.

Leistungs-Cursor (Thermometer): **Alt**-Taste und auf das Bauelement zeigen

angezeigt, was geplottet werden kann. – Um eine Potential-Differenz darzustellen, kann eine *Referenz-Markierung* gesetzt werden. Dazu wird zunächst, wie oben, der Cursor auf die entsprechende Referenz-Leitung gebracht, z.B. Knoten „VCC“. Ausgelöst durch einen **Rechts**-Klick öffnet sich ein kleines Menü, in dem dann „Mark Reference“ ausgewählt wird: Die Markierung wird in Form einer *schwarzen Prüfspitze* sichtbar. Anschließend kann, wieder wie oben, ein Spannungs-Cursor gesetzt werden. Durch **Links**-Klick wird dann sofort das Potential gegenüber dem Referenz-Knoten dargestellt. Im Fall des obigen Beispiels erscheint der Plot „V(Out,VCC)“.

- Eine Potential-Differenz kann auch wie folgt geplottet werden: Mit der Maus auf die Leitung (Knoten) zeigen → **Links**-Klick und gedrückt halten (der Cursor verwandelt sich in einen Spannungs-Cursor) → zum Referenz-Knoten führen → Maus-Taste loslassen.
- Sehr hilfreich ist auch der *Strom-Cursor* in LT-SPICE, der in Form einer kleinen Stromzange mit einem *roten Pfeil* für die Stromrichtung erscheint, vergl. **Bild 11**. Wenn der normale Cursor auf ein Bauelement zeigt, verwandelt er sich in den *Strom-Cursor*. Durch einen **Links**-Klick wird dann der Strom durch das betreffende Bauteil geplottet, z.B. „i(R3)“. – Auch zum Plotten von *Leitungsströmen* kann der Strom-Cursor eingesetzt werden: Der normale Cursor verwandelt sich in einen *Strom-Cursor*, wenn er bei gedrückter **Alt**-Taste auf eine Leitung geführt wird. Durch einen **Links**-Klick wird die Strom-Darstellung ausgelöst. Auch in der Statuszeile, ganz unten links, wird wieder angezeigt, was geplottet werden kann.
- **Konvention:** In ein Bauelement hineinfließende Ströme gelten als positiv.
- Als weitere sehr nützliche Ergänzung bietet LT-SPICE einen Leistungs-Cursor, der es ermöglicht, die gesamte Leistung eines Bauelementes grafisch darzustellen. Der normale Cursor verwandelt sich in einen *Leistungs-Cursor* (Thermometer), wenn er bei gedrückter **Alt**-Taste auf ein

Bauelement geführt wird, siehe **Bild 11**. Durch einen **Links**-Klick wird die Leistungs-Darstellung ausgelöst. Auch in der Statuszeile, ganz unten links, wird wieder angezeigt, was geplottet werden kann. Wendet man diese Prozedur z.B. auf den Transistor Q1 in **Bild 5** an, wird folgender Ausdruck grafisch dargestellt: $V(\text{Out}, 5) * I_c(Q1) + V(\text{In}, 5) * I_b(Q1)$. Dies ist im Fall einer DC-Analyse die gesamte in dem betreffenden Bauelement (hier im Transistor Q1) in Wärme umgesetzte Verlustleistung. Bei einer Transienten-Analyse ist die Zeit die unabhängige Variable (x-Achse). Geplottet wird dann die Leistung als Funktion der Zeit. Die in Wärme umgesetzte Verlustleistung ist in diesem Fall der *zeitliche Mittelwert* der Leistung. Auch dieser kann zur Anzeige gebracht werden: Dazu zeigt man bei gedrückter **Ctrl**-Taste im „Plot-Fenster“, siehe **Bild 12**, mit der Maus auf den Ausdruck (Kurven-Bezeichnung oder trace label), dessen Mittelwert gebildet werden soll und führt einen **Links**-Klick aus. Das Ergebnis wird in einem

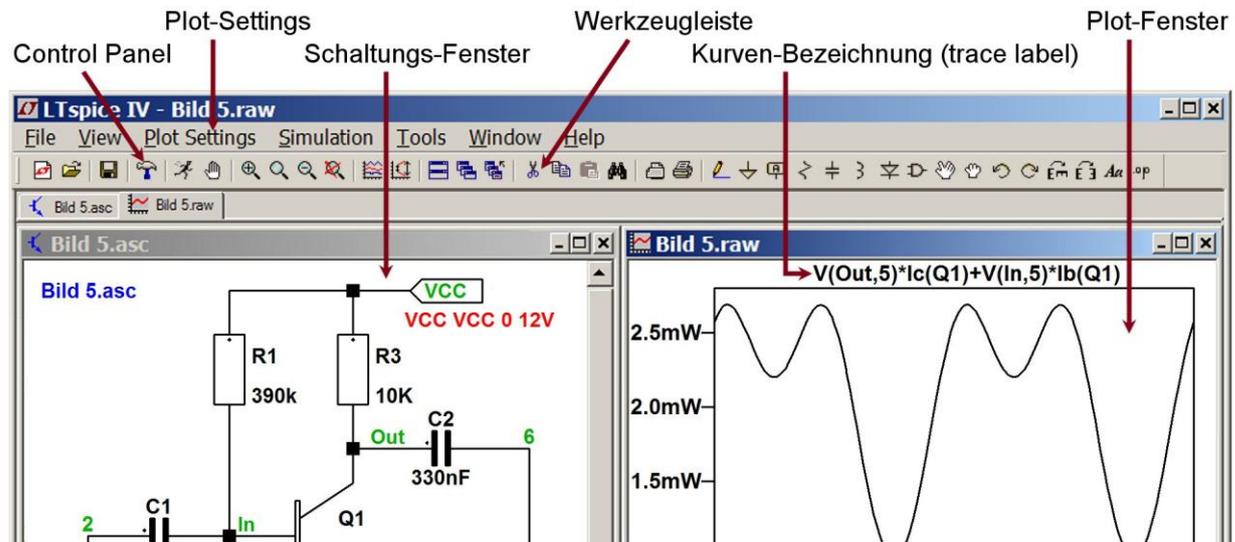


Bild 12: Aktivierung des Plot-Fensters

kleinen Fenster angezeigt, vergl. **Bild 13**. Dieses Fenster enthält neben der Angabe des Mittelwertes (in diesem Beispiel den zeitlichen Mittelwert der Leistung, die im Transistors Q1 in Wärme umgesetzt wird) auch das zugehörige Zeit-Intervall und das Zeit-Integral der Leistung für das Intervall.

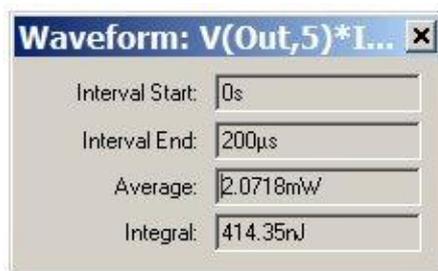


Bild 13:

Anzeige der Verlustleistung:

Ctrl drücken und halten →
im *Plot-Fenster* auf den
Ausdruck zeigen.

5.3 Operationen im Plot-Fenster

Durch **Links**-Klick auf die Titel-Leiste des Plot-Fensters wird dieses aktiviert. Dann bietet LT-SPICE mannigfaltige Gestaltungsmöglichkeiten für die Darstellung der Simulationsergebnisse. Das *aktive Plot-Fenster* sei die Ausgangsposition für die Beschreibung der folgenden Arbeitsschritte. Verwendet werden wieder Simulationsergebnisse zur Schaltung **Bild 5**.

- **Drei mögliche Fenster-Anordnungen:** Entweder horizontal oder vertikal geteilt oder hintereinander (kaskadenförmig): Mit der Maus auf die „Werkzeug-Leiste“ (**Bild 12**) gehen → **Rechts-Klick** → im sich öffnenden Menü die gewünschte Anordnung auswählen. – Hinweis: Das *aktive* Fenster erscheint als *erstes* Fenster, also *oben* bzw. *links* bzw. *vorne*.
- Durch **Rechts-Klick** in das *Plot-Fenster* (nicht auf die Titel-Leiste des Plot-Fensters) öffnet sich ein „Werkzeug-Menü“, siehe **Bild 14 a**). Einige Werkzeuge sind bereits bekannt oder brauchen nicht weiter erklärt zu werden. Kurz erläutert werden sollen jedoch drei wichtige Werkzeuge:
 - 1) **Add Plot Pane** öffnet einen weiteren Plot-Bereich. Dies kann auch einfacher über einen Shortcut erreicht werden: Im *aktiven* Plot-Fenster den Shortcut **Ctrl A** eingeben. Das Einrichten von Shortcuts wird im **Abschnitt 8.5** beschrieben.
 - 2) **Add Trace:** Dialogfeld zur Auswahl darzustellender Kurven. Dieses ist vergleichbar mit dem bereits bekannten Menü „Kurve auswählen“ (siehe **Bild 8**). Es bietet aber drei interessante Möglichkeiten. Erstens existiert ganz oben ein kleines Feld, in das Kürzel hineingeschrieben werden können. Dadurch kann die Auswahl an darzustellenden Kurven im Dialogfeld eingeschränkt werden. Wird z.B. ein „i“ eingetippt, werden nur Ströme angezeigt. Zweitens ist das Feld zum Formulieren von Verknüpfungen und mathematischen Ausdrücken etwas einfacher zu handhaben. Drittens kann ein Shortcut zum Öffnen des Dialogfeldes definiert werden. Es reicht dann aus, bei *aktivem* Plot-Fenster einfach den Shortcut **A** einzutippen. Das Einrichten von Shortcuts wird im **Abschnitt 8.5** beschrieben.
 - 3) **Sync. Horiz. Axes:** Werden zwei Plots in getrennten Feldern dargestellt, haben normalerweise beide dieselbe x-Variable. Nach **Links-Klick** auf die Schaltfläche **Sync. Horiz. Axes** besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Variablen zu wählen, Beispiel: **Abschnitt 7.2**.
- In der Werkzeugleiste (**Bild 12**) kann der Menü-Punkt „Plot Settings“ ausgewählt werden. Es öffnet sich ein Dialogfeld mit weiteren Werkzeugen, siehe **Bild 14 b**). Die meisten Werkzeuge

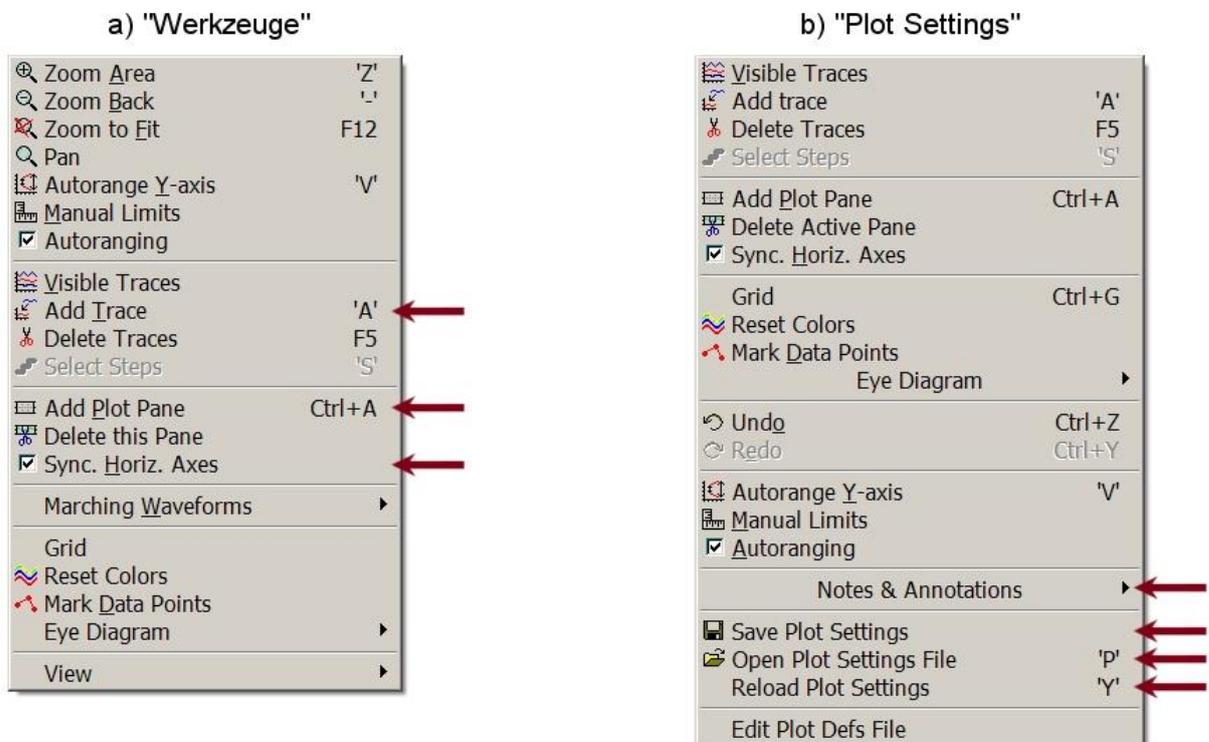


Bild 14: Zwei Werkzeug-Menüs für den Plot-Bereich

- Rechts-Klick** direkt im „Plot-Fenster“ (nicht in der „Titel-Leiste“)
- „Plot Settings“ in der „Werkzeug-Leiste“ anklicken (siehe z.B. **Bild 12**)

sind in dem zuvor genannten Werkzeug-Menü enthalten. Vier zusätzliche Werkzeuge sollen kurz erläutert werden:

- 1) **Notes & Annotations:** Für zusätzliche Beschriftungen, Pfeile usw.
 - 2) **Save Plot Settings:** Es besteht die Möglichkeit, die Plot-Einstellungen zu speichern. Die Einstellungen werden als Text-File mit der Endung `.plt` gespeichert.
 - 3) **Open Plot Setting File:** Es besteht die Möglichkeit, aus bereits gespeicherten Plot-Settings eins auszuwählen. Dies kann auch einfacher über einen Shortcut erreicht werden: Im *aktiven* Plot-Fenster den Shortcut **P** eingeben; Das Einrichten wird in **Abschnitt 8.5** beschrieben.
 - 4) **Reload Plot Settings:** Ein für eine Simulation gespeichertes Plot-Setting-File wird geladen. Die Plots erscheinen mit den gespeicherten Einstellungen. Auch dies kann einfacher über einen Shortcut erreicht werden: Im *aktiven* Plot-Fenster den Shortcut **Y** eingeben; Das Einrichten wird in **Abschnitt 8.5** beschrieben.
- **Ausschnitts-Vergrößerung:** Eine Ausschnitts-Vergrößerung kann einfach durch Zeichnen eines Rechtecks um den gewünschten Bereich erreicht werden. Zuvor muss dazu das Werkzeug **Zoom Area** ausgewählt werden. Durch **View Fit** kann das Bild wieder im Ganzen dargestellt werden.

The image shows two icons: 'Zoom Area' with a magnifying glass and a red rectangle, and 'View Fit' with a magnifying glass and a red 'X' over a corner. Red arrows point to each icon.
 - Die Limits der beiden Achsen können auch ganz gezielt eingestellt werden. Durch Zeigen mit der Maus auf eine Achsen-Beschriftung verwandelt sich der Cursor in ein kleines Lineal. Ein **Links**-Klick führt dann zum Öffnen eines Dialogfeldes, in das die Achsen-Limits eingetragen werden können. Für die horizontale Achse kann darüber hinaus die Variable geändert werden. Die neue Variable darf auch algebraische Verknüpfungen enthalten.
 - **Abtasten einer Kurve mit dem Maus-Cursor:** Führt man die Maus im Plot-Fenster über eine dargestellte Kurve, können in der LT-SPICE-Statuszeile (ganz unten links) die Koordinaten abgelesen werden.
 - **Angehefteter Cursor:** Zum *genauen* Vermessen einer Kurve kann an sie ein Cursor *angeheftet* werden, der in Form zweier sich kreuzenden Linien erscheint. Durch einen **Links**-Klick auf die „Kurven-Bezeichnung“ (trace label) wird der Vorgang ausgelöst. Der Label wird zur Markierung gestrichelt umrandet, und es öffnet sich ein Fenster, das die x- und y-Werte anzeigt. Beim Zeigen mit der Maus auf eine der Cursor-Linien verwandelt sich der Cursor in eine gelb ausgefüllte „ \perp “. Nach dem Drücken der linken Maus-Taste können die Linien bewegt werden.
 - **Zweiter Cursor:** Der gerade genannte Cursor kann durch einen zweiten ergänzt werden. Durch **Rechts**-Klick auf die „Kurven-Bezeichnung“ (trace label) wird der sogenannte „Expression-Editor“ geöffnet. Er gestattet einerseits eine weitreichende algebraische Formulierung eines darzustellenden Plots. Andererseits gelingt über das Feld **Attached Cursor** das Einblenden eines



Bild 15: Expression-Editor

Rechts-Klick auf eine „Kurven-Bezeichnung“ im Plot-Fenster öffnet diesen Editor

zweiten Cursors, siehe **Bild 15**. Jeder Cursor kann unabhängig mit der Maus verschoben werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, Differenzen zu messen. Dies ist z.B. in **Bild 16** für den Plot $V(\text{Out})$ (Schaltung **Bild 5**) gezeigt. Das sich öffnende Fenster zeigt die Werte der horizontalen

und der vertikalen Achsen, sowie die zugehörigen Differenzen. Die unterste Zeile enthält noch zwei weitere nützliche Informationen: Der erste Wert ist der Kehrwert der horizontalen Differenz. Er erscheint in diesem Beispiel mit der Einheit „kHz“. Es besteht somit die Möglichkeit, die Frequenz einer Schwingung zu messen. Der zweite Wert in der untersten Zeile gibt den Differenzen-Quotienten (Slope) an. Er gibt Aufschluss über die Steigung der Kurve.

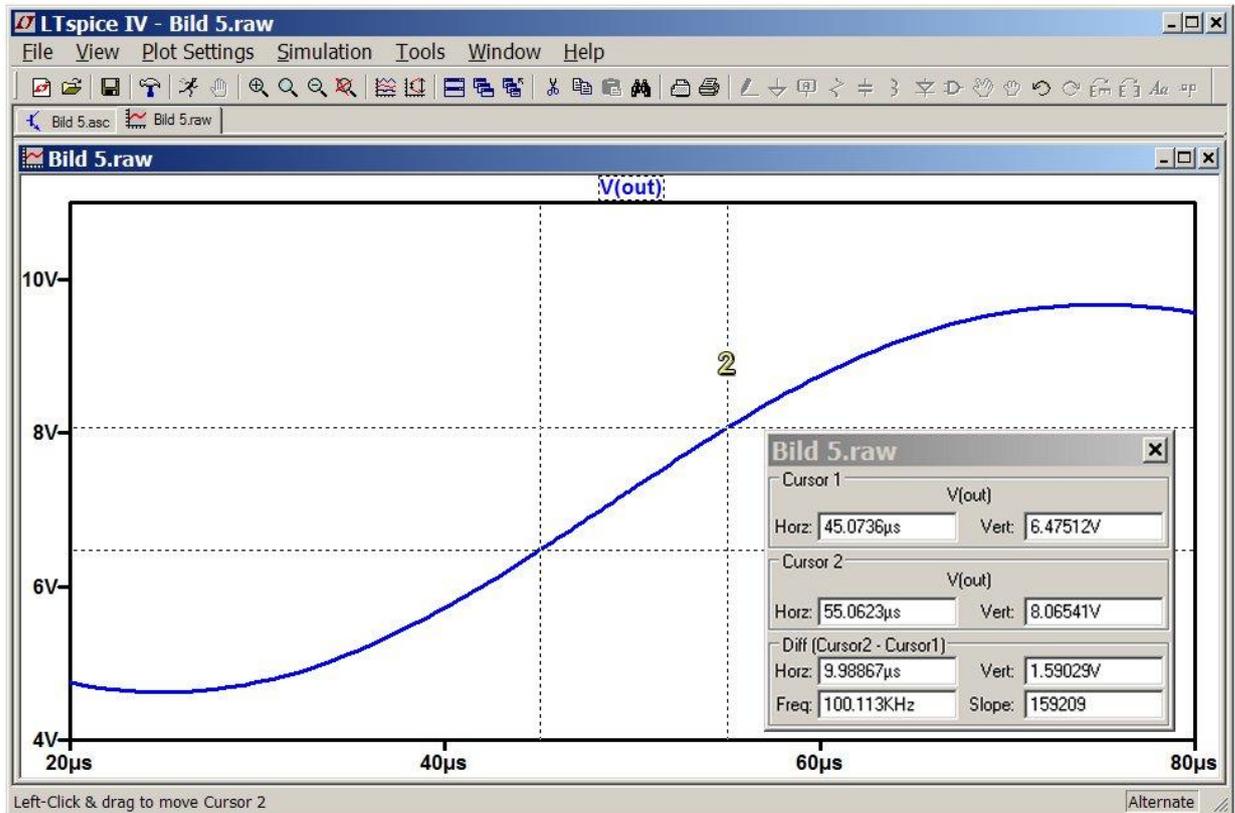


Bild 16: Erster und zweiter Cursor im Plot-Bereich

Rechts-Klick auf die „Kurven-Bezeichnung“ → 1st & 2nd Cursor → Cursor verschieben.

- Wird ein zweiter Cursor verwendet, kann dieser auch an eine *andere* Kurve geheftet werden.
- **Kurvenschar:** Nach einer Step-Anweisung wird eine Kurvenschar dargestellt. Die einzelnen Kurven erscheinen in unterschiedlichen Farben. Den Hinweis, welche Kurve zu welchem Parameter gehört, erhält man über eine *angeheftete* Cursor-Linie: Cursor durch **Links-Klick** auf die „Kurven-Bezeichnung“ (trace label) → mit dem Maus-Cursor auf die Cursor-Linie zeigen (*gelb* hinterlegte Ziffer wird sichtbar), → **Rechts-Klick** → die „Cursor Step Information“ erscheint.
- **AC-Analyse:** Die Schaltung **Bild 5** soll z.B. im Frequenzbereich 10 Hz ... 100 MHz untersucht werden. Die Analyse-Anweisung lautet dann: .AC dec 50 10Hz 100Meg.
- **Tip:** Um ohne große Umschweife gleich die *Übertragungsfunktion* (Ausgangsgröße dividiert durch Eingangsgröße) zu erhalten, sollte die Eingangsgröße auf AC 1V bzw. AC 1A eingestellt werden. Dann wird durch „1“ dividiert. Wegen der Linearisierung sämtlicher Bauelemente für deren Arbeitspunkte braucht man sich um *Übersteuerungen* keine Gedanken zu machen.
- Im Fall einer AC-Analyse wird normalerweise gleich der Bode-Plot dargestellt: Der Amplitudengang in Dezibel und die Phase in Grad. Beide Kurven erscheinen im selben Diagramm; links die Achsen-Beschriftung für die Amplitude, rechts für die Phase. – Getrennte Ansichten sind einfach durch Öffnen eines zweiten Plot-Fensters möglich, zunächst mit demselben Inhalt. Ein **Links-Klick** auf die rechte Achse führt zum Öffnen eines Dialogfeldes, in das einerseits die Achsen-Limits eingetragen werden können, das aber andererseits auch die Möglichkeit bietet, das

Plotten der Phase auszuschalten: Don't plot phase. Ein analoges Dialogfeld öffnet sich beim **Links**-Klick auf die rechte Achse. Es erlaubt das Ausschalten des Amplitudenganges durch Betätigen der Schaltfläche Don't plot magnitude, siehe **Bild 17**.

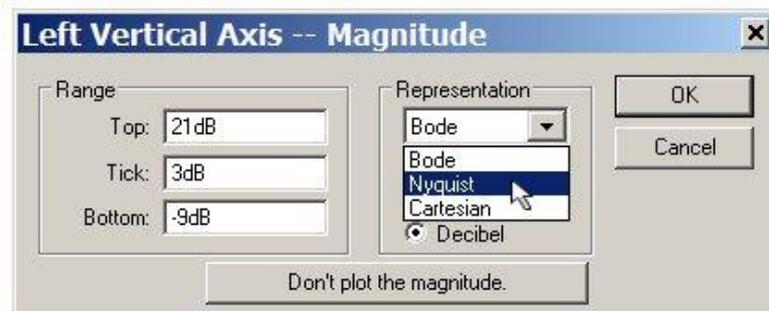


Bild 17: y-Achsen-Editor

Links-Klick auf die linke y-Achse öffnet diesen Editor (im Fall einer AC-Analyse)

- **Ortskurven-Darstellung:** Im Fall einer AC-Analyse kann das Simulationsergebnis auch in Form einer Ortskurve dargestellt werden: Realteil = x-Achse, Imaginärteil = y-Achse. Dazu wird der y-Achsen-Editor (siehe **Bild 17**) durch **Links**-Klick auf die linke-y-Achse geöffnet. Im Menü Representation wird Nyquist ausgewählt.

5.4 Einbinden mathematischer Operationen

LT-SPICE bietet die Möglichkeit, Simulationsergebnisse in mannigfacher Weise miteinander zu verknüpfen und auch mathematische Ausdrücke einzubinden. Die Vorgehensweise:

- **Rechts**-Klick direkt im „Plot-Fenster“ (nicht in der „Titel-Leiste“) → Add Trace (oder einfacher: Shortcut A) → im sich öffnenden Dialogfeld kann in der unteren Kommando-Zeile der gewünschte Ausdruck eingetragen (es ist nur eine Zeile möglich).
- **Rechts**-Klick auf eine „Kurven-Bezeichnung“ (trace label) öffnet den sogenannten „Expression-Editor“, siehe **Bild 15**. Dieses Dialogfeld bietet Raum für mehrzeilige darzustellende Ausdrücke. Eine neue Zeile wird durch Ctrl M eingeleitet.
- **Mögliche Operationen:** Siehe Help (Shortcut F1) → Help Topics → Inhalt → LTspice IV → Waveform Viewer → Waveform Arithmetic.
- **Eigene Funktionen:** LT-SPICE bietet auch die Möglichkeit, *eigene Funktionen* zu definieren. Nähere Informationen sind in der LT-SPICE-Hilfe zu finden: Hilfe → Help Topics → Inhalt → LTspice IV → LTspice → Dot Commands → .FUNC; siehe auch [3] und [9].

5.5 FFT-Plot

Im Anschluss an eine Transienten-Analyse gestattet LT-SPICE die grafische Darstellung einer periodischen Funktion in Form eines Frequenz-Spektrums (FFT-Plot = **F**ast-**F**ourier-**T**ransformation). Hierfür sind allerdings unbedingt einige Vorüberlegungen notwendig, damit nicht Frequenzlinien *vorgetäuscht* werden, die in Wahrheit nicht auftreten. So erfordert die FFT-Darstellung eine detaillierte Angabe der Transienten-Anweisung. Allgemeine Syntax:

```
.TRAN Tstep Tstop [Tstart [dTmax]]
```

Hierin gibt T_{stop} den Analyse-Zeitraum an. Die Zeitangabe T_{step} spezifiziert das Druck- oder Plot-Intervall für Zeilendrucker und hat heute eigentlich keine Bedeutung mehr. Der Default-Wert ist deshalb bei LT-SPICE $T_{step} = 0$. Die optionalen Angaben T_{start} und dT_{max} werden für die FFT-Darstellung sehr wichtig: Mit T_{start} werden die Ergebnisse bis zu diesem Zeitpunkt unterdrückt. Mit der Angabe von dT_{max} kann die *maximale* Zeit-Schrittweite vorgegeben werden. Die *wahre* Schrittweite wird vom Programm automatisch an die Rechenaktivität angepasst. Standardmäßig ist $dT_{max} = T_{stop}/50$. Ein *kleinerer* Wert dT_{max} führt zu „glatteren“ Kurven, verlängert aber

die Rechenzeit. Die Parameter der Transienten-Anweisung müssen für einen aussagekräftigen FFT-Plot sorgfältig überlegt werden:

- Der Darstellungszeitraum ($T_{stop} - T_{start}$) muss unbedingt über *ganzzahlige Vielfache der Periodendauer* des Signals erstreckt werden. T_{start} hängt von Einschwingvorgängen ab.
- Der Zeitraum ($T_{stop} - T_{start}$) bestimmt sowohl die Breite der Linien als auch die Startfrequenz des Spektrums. Das gilt auch für den minimalen Frequenzschritt:

$$\text{Linienbreite} = \frac{2}{T_{stop} - T_{start}}; \quad \text{Startfrequenz} = \text{Frequenzschrittweite} = \frac{1}{T_{stop} - T_{start}}.$$

- Der maximale Zeitschritt dT_{max} kann als Kehrwert der minimalen Samplefrequenz $f_{s,min}$ gedeutet werden, und diese Frequenz muss entsprechend der *Shannon-Bedingung* mindestens doppelt, besser $20\times$ so hoch sein [6], wie die höchste im Signal erwartete Oberwellenfrequenz f_{max} :

$$f_{s,min} = \frac{1}{dT_{max}} \geq (2 \dots 20) \cdot f_{max} \quad \rightarrow \quad dT_{max} = \frac{1}{f_{s,min}} \leq \frac{1}{(2 \dots 20) \cdot f_{max}}.$$

dT_{max} ist der *maximal* vorgegebene Zeitschritt. Die tatsächliche Schrittweite wird vom Simulator automatisch den Erfordernissen angepasst und kann deshalb kleiner ausfallen, d.h. die tatsächliche Samplefrequenz f_s ist meist höher als $f_{s,min}$ und auch nicht konstant.

- Die Zahl der Samples für den FFT-Plot ergibt sich aus dem Zeitraum ($T_{stop} - T_{start}$) und der Samplefrequenz f_s . Wäre f_s konstant, könnte die Samplezahl wie folgt angegeben werden.

$$\text{Samplezahl} = \text{Samplefrequenz} \times \text{Analyse-Zeitraum} = f_s \cdot (T_{stop} - T_{start}).$$

Nun ist aber die Samplefrequenz f_s in der Regel größer als $f_{s,min} = 1/dT_{max}$. Folglich gilt:

$$\text{Samplezahl} \geq f_{s,min} \cdot (T_{stop} - T_{start}) = \frac{\text{Darstellungszeitraum}}{\text{maximaler Zeitschritt}} = \frac{T_{stop} - T_{start}}{dT_{max}}.$$

Für die Darstellung eines FFT-Plots wird die Samplezahl (Number of data samples in time) in Form einer Zweierpotenz 2^N (512, 1024, ...) verwendet und muss angegeben werden (siehe später). Eine hohe Samplezahl vergrößert zwar den Dynamikbereich der Amplitudendarstellung, doch ist es nicht sinnvoll, mehr Samples vorzugeben, als tatsächlich während der Transienten-Analyse ermittelt wurden. Unerwünschte Details im Spektrum wären die Folge. Meist reicht es aus, sich an der höchsten im Spektrum erwarteten Oberwellenfrequenz f_{max} zu orientieren:

$$\text{gewählte Samplezahl} = 2^N \approx 2 \cdot f_{max} \cdot (T_{stop} - T_{start}).$$

- Außerdem ist zu beachten, dass für die Speicherung des Ergebnis-Files (RAW-Datei) normalerweise eine beträchtliche Datenkompression vorgenommen wird. Die FFT-Darstellung wird dadurch deutlich verschlechtert. Durch die Options-Anweisung: `.Options Plotwinsize = 0` kann die Datenkompression jedoch einfach ausgeschaltet werden.

Für unsere Schaltung **Bild 5** soll nun ein FFT-Plot erstellt werden. Interessant sei der Frequenzbereich von etwa 1 kHz bis 100 kHz , und die Linienbreite möge z.B. 1 kHz betragen. Ein Darstellungszeitraum von $(T_{stop} - T_{start}) = 2 / \text{Linienbreite} = 2 / (1 \text{ kHz}) = 2 \text{ ms}$ reicht somit aus. Dieser Wert ist ein ganzes Vielfaches der Signal-Periode. Einschwingvorgänge sollten bis $T_{start} = 100 \text{ ms}$ abgeklungen sein. – Die Darstellung des Spektrum bis zu einer Frequenz von $f_{max} = 100 \text{ kHz}$ erfordert eine Samplefrequenz von mindestens 200 kHz . Als maximaler Zeitschritt dT_{max} würde dann ein Wert von $5 \mu\text{s}$ gerade ausreichen. Mit $dT_{max} = 0.5 \mu\text{s}$ wird jedoch eine höhere Genauigkeit erzielt. – Als Samplezahl (Number of data samples in time) genügt ein Wert von $2 \cdot f_{max} \cdot (T_{stop} - T_{start}) = 400$. Da aber die Zahl der echten Samples wegen $dT_{max} = 0.5 \mu\text{s}$ höher ist als erforderlich, kann problem-

los die nächst höhere Zweierpotenz $512 = 2^9$, $N = 9$ oder sogar $1024 = 2^{10}$, $N = 10$ eingesetzt werden. – Nun zur Simulation der Schaltung **Bild 5**:

- Transienten-Anweisung ändern in: `.TRAN 0us 102ms 100ms 0.5us`.
($T_{stop} - T_{start} = 102\text{ ms} - 100\text{ ms} = 2\text{ ms}$)
- Simulation starten.
- Das Plot-Fenster durch **Links**-Klick auf dessen Titel-Leiste aktivieren.
- FFT-Darstellung aktivieren: View → FFT, siehe **Bild 18**. Anschließend im sich öffnenden Fenster Select Waveforms to include in FFT die gewünschten Kurven auswählen → Number of data samples: 1024. Das Spektrum für die Ausgangsspannung am Knoten „6“ zeigt **Bild 19**.

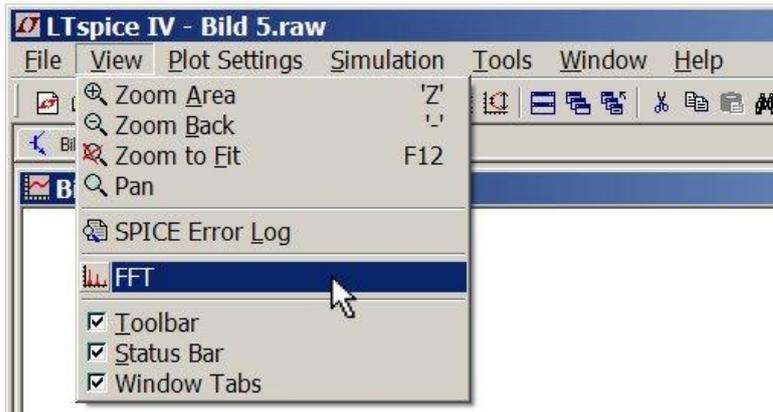


Bild 18: FFT aktivieren

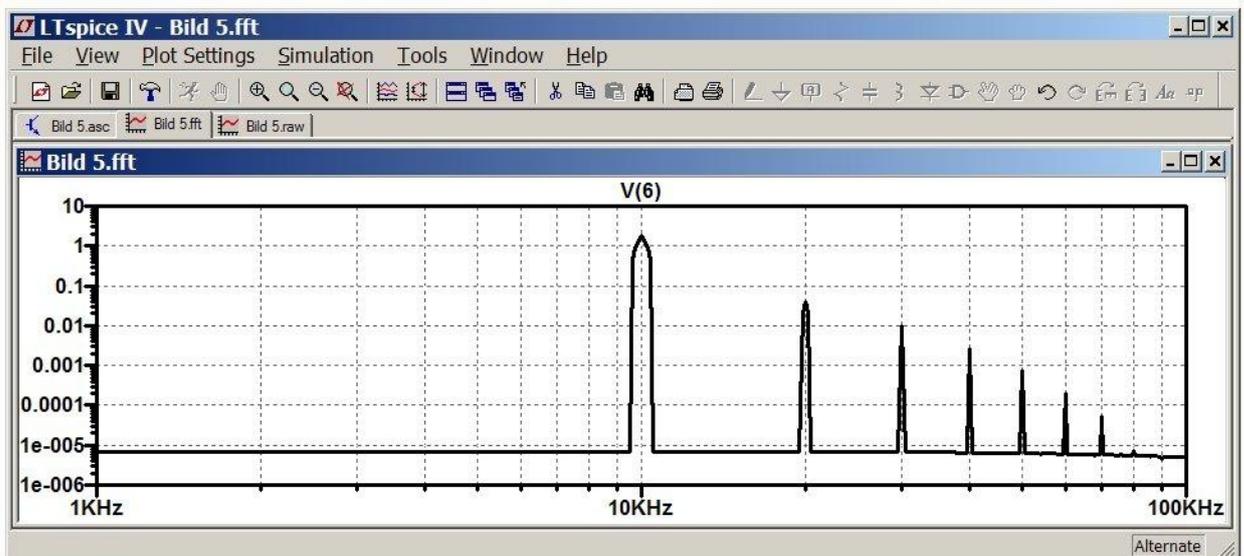


Bild 19: FFT-Plot zur Schaltung Bild 5 (SPICE-Datei: Bild 5_FFT.asc) Ausgangsknoten „6“
Öffnen der Achsen-Editoren durch **Links**-Klick auf die Achsen, Editor vergl. **Bild 17**.

- **Achtung:** Die Ergebnisse werden als *Effektiv-Werte* dargestellt!
- **Fourier-Komponenten:** Die Amplituden der Harmonischen können auch als Fourier-Komponenten in Tabellenform ausgegeben werden. Dazu ist in der Schaltung bzw. Circuit-Datei eine entsprechende Zeile hinzuzufügen:

`.Four f1 [Zahl der Harmonischen] Ausgangswert1 Ausgangswert2 ...`

Mit `Ausgangswert1`, `Ausgangswert2`, ... werden die Schwingungen (Knotenspannungen oder Bauteilströme) ausgewählt, für die eine Fourier-Analyse durchzuführen ist. Die Frequenz `f1` kennzeichnet die Grundfrequenz der periodischen Schwingung. Optional kann die Zahl der

zu berechnenden Harmonischen angegeben werden; der Default-Wert ist 9. Ermittelt wird auch der DC-Anteil. Der Berechnung der Fourier-Koeffizienten eines periodischen Signals wird *rechtsbündig genau die letzte Periode* (Kehrwert der Grundfrequenz f_1) zugrundegelegt. Der Zeitbereich muss deshalb *nicht* über ganzzahlige Periodenlängen erstreckt werden.

- In unserem Beispiel soll die Ausgangsspannung V(6) analysiert werden, und wir wollen uns auf die ersten fünf Harmonischen beschränken: `.Four 10kHz 5 V(6)`.
- Das Ergebnis wird nach erfolgter Transienten-Analyse ins *Error-Log-File* geschrieben. Es kann durch `View` → `SPICE Error Log` sichtbar gemacht werden, vergl. **Bild 20**.

Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component	Normalized Component	Phase [degree]	Normalized Phase [deg]
1	1.000e+04	2.539e+00	1.000e+00	-179.71°	0.00°
2	2.000e+04	5.886e-02	2.318e-02	90.53°	270.24°
3	3.000e+04	1.515e-02	5.966e-03	-179.33°	0.38°
4	4.000e+04	4.156e-03	1.637e-03	-89.17°	90.54°
5	5.000e+04	1.158e-03	4.562e-04	1.02°	180.73°

Total Harmonic Distortion: 2.400041%

Bild 20: Ergebnis einer Fourier-Analyse (Simulationsdatei: Bild 5_FFT.asc)

- Die Log-Datei ist normalerweise nicht permanent. Sie kann aber auf zweierlei Weise gespeichert werden. Entweder: alles Markieren → `Ctrl C` (in die Zwischenablage kopieren) und dann als Text-Dokument speichern (z.B. mit der Endung `.txt`). Oder: `Tools` → `Control Panel` → `Operation` → `Automatically delete .log files` → `No`. Diese letzte Methode führt aber im Laufe der Zeit zu viel Daten-Müll!

5.6 Einstellen der Betriebstemperatur

1. Globale Vorgabe einer Temperatur

Wenn im Schaltplan keine Betriebstemperatur angegeben wird, rechnet LT-SPICE automatisch mit dem Default-Wert $Temp = 27^\circ C$ (entsprechend $T = 300 K$). Andere Werte, einzelne oder auch mehrere, können einfach durch die SPICE-Zeile

```
.Temp <Temp1> <Temp2> ...
```

oder auch durch die Step-Anweisung

```
.Step Temp List <Temp1> <Temp2> ...
```

vorgegeben werden. Sie gelten dann für alle Bauelemente der Schaltung, also global.

In LT-SPICE kann auch ein Temperatursweep mittels einer DC-Anweisung durchgeführt werden. Dies ist z.B. für die Ergebnisdarstellung in Abhängigkeit von der Temperatur sehr hilfreich. Beispiel:

```
.DC Temp -25 125 1
```

Dies bedeutet eine Variation von $-25^\circ C$ bis $125^\circ C$ in 1-Grad-Schritten. Im Plot erscheint dann die Temperatur als Abszisse (x-Achse). Auch hier gilt die Temperatur für alle Elemente.

2. Individuelle Vorgabe der Temperatur für einzelne Bauelemente

Über die im Punkt 1. genannten Anweisungen wird die Temperatur *global* eingestellt, d.h. sie gilt für alle Elemente einer Schaltung in gleicher Weise. In vielen Anwendungen können aber einzelne Bauteile unterschiedliche Temperaturen annehmen, z.B. durch Eigenerwärmung infolge erhöhter Verlustleistung. In solchen Fällen führt eine globale Vorgabe der Temperatur verständlicherweise zu ungenauen Simulationsergebnissen. Sehr viel sinnvoller ist es dann, einzelnen Bauteilen eine *individuelle* Betriebstemperatur zuzuweisen. Dies ist in LT-Spice problemlos möglich; dem entsprechenden Element wird einfach die Temperatur als Attribut in der Form `Temp = <Wert>` mitgegeben. Hierzu ein Beispiel: Ein Projekt oder eine Schaltung, Schaltungsausschnitt siehe **Bild 21**, soll für eine Betriebstempe-

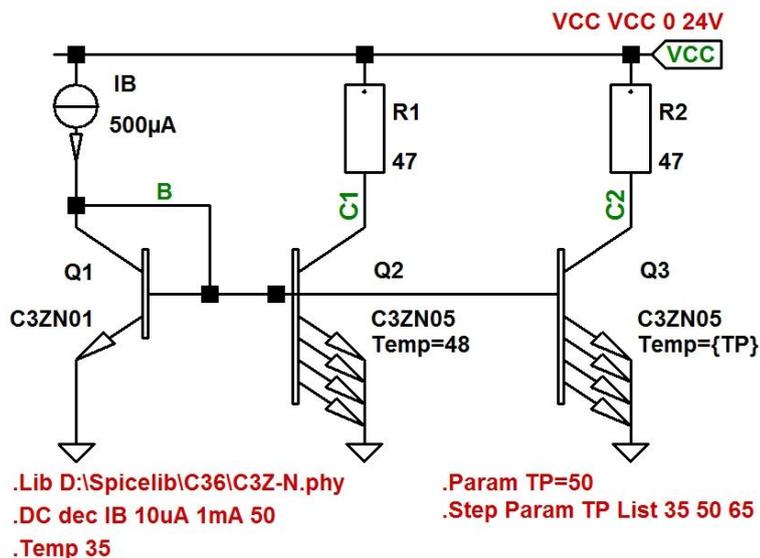


Bild 21:

Vorgabe individueller Bauteiltemperaturen

Attribut bei Q2: `Temp = 48`

Attribut bei Q3: `Temp = {TP}`

`.Param TP = 50`

setzt TP zunächst auf 50 °C.

Durch die Step-Anweisung

`.Step Param TP List 35 50 65`

wird der Wert 50 °C wieder überschrieben.

ratur von 35 °C untersucht werden, der Transistor Q2 möge aber wegen einer erhöhten Verlustleistung im Betrieb eine Temperatur von ca. 48 °C annehmen. Dann wird im Schaltplan zunächst durch die SPICE-Zeile

`.Temp 35` (vergl. auch Punkt 1.)

die globale Temperatur für die gesamte Schaltung angegeben und für den Transistor Q2 das Attribut `Temp=48` hinzugefügt, das nur dessen Betriebstemperatur auf einen anderen Wert setzt. Diese Methode kann selbstverständlich auch auf weitere Elemente der Schaltung ausgedehnt werden. Auch die Zuweisung in Parameterform mit anschließender Step-Anweisung ist möglich. Dies ist in **Bild 21** für den Transistor Q3 gezeigt. Achtung: die geschweifte Klammer beim Parameter TP darf nicht fehlen!

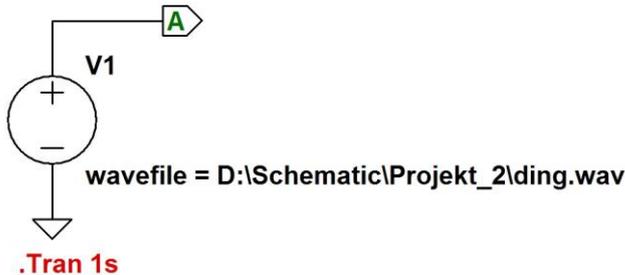
5.7 Einbinden von Wave-Dateien

LT-Spice bietet neben der Definition normaler unabhängiger Spannungs- und Stromquellen durch Gleich- oder Wechselgrößen bzw. Pulsfunktionen auch die Einbindung von Audio-Signalen in Form von Wave-Dateien. Eine vorhandene Wave-Datei kann also als Argument oder „Wert“ einer unabhängigen Quelle verwendet werden. Umgekehrt können die Simulationsergebnisse von Transienten-Analysen auch als Wave-Dateien abgespeichert und dann mit geeigneter Hardware hörbar gemacht werden. Zwei Beispiele sollen dies verdeutlichen. Zu diesem Zweck wird ein zweiter Projektordner im Ordner `Schematic` angelegt. Er erhält den Namen `Projekt_2`.

1. Wave-Datei als Argument einer unabhängigen Spannungsquelle

- In den neuen Unterordner `Projekt_2` im Ordner `Schematic` kopieren wir eine beliebige auf dem Rechner vorhandene Wave-Datei, z.B. die Datei „ding.wav“ aus dem Windows-Ordner (Pfad bei Windows XP: `C:\Windows\Media\ding.wav`; oder es kann auch durch eine Suchroutine eine beliebige andere Datei mit der Endung `.wav` gefunden werden).

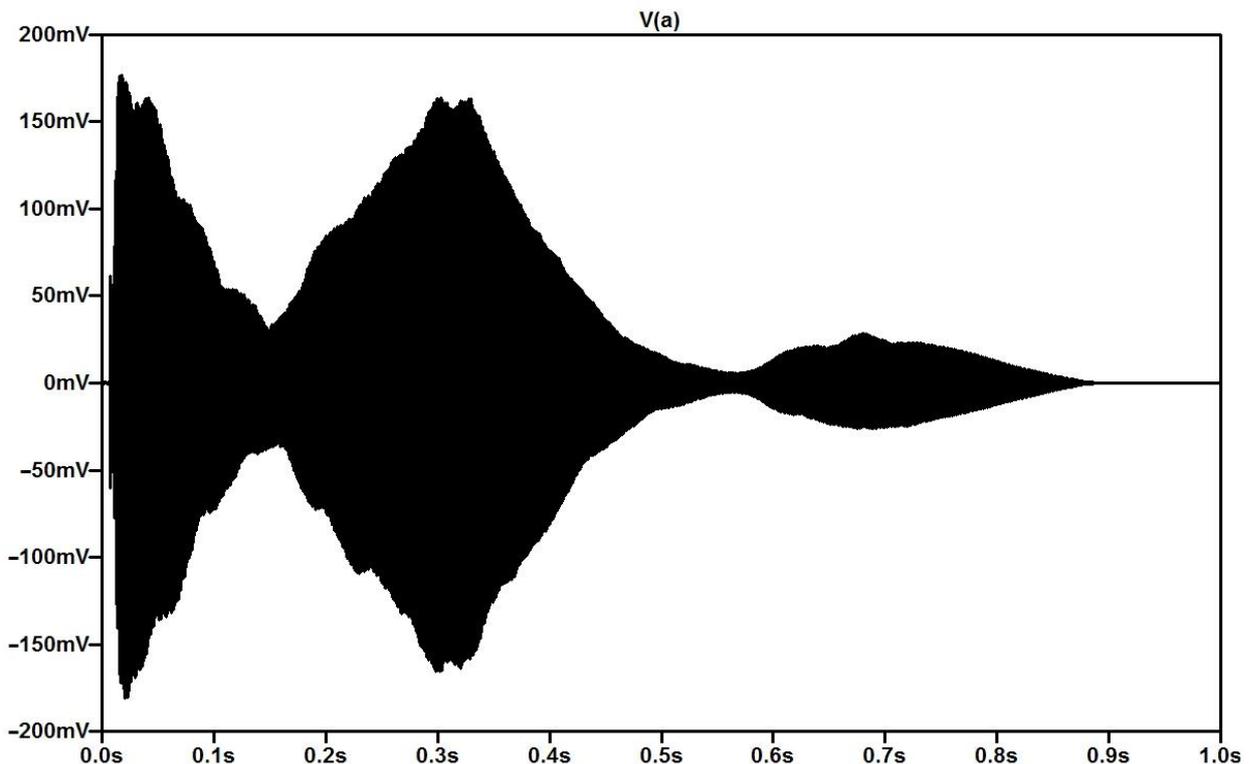
- Im Ordner `Projekt_2` legen wir dann eine Schaltung an, die z.B. den Namen `Wave-1.asc` erhalten soll; Pfad: `D:\Schematic\Projekt_2\Wave-1.asc`. Später kann dann einfach mittels des Windows-Befehls `Ctrl S` gespeichert werden, weil der Pfad bereits festliegt.
- Einfügen einer Spannungsquelle entsprechend **Bild 22**. Als „Wert“ der Spannungsquelle wird **Wave-1.asc**

**Bild 22:**

Einbindung einer Wave-Datei als Argument einer unabhängigen Spannungsquelle

einfach der Pfad der Wave-Datei eingetragen: **wavefile = Pfad der Wave-Datei [chan = <nnn>]**. Bis zu 65536 Kanäle (0 bis 65535) können angewiesen werden. Chan = 0 bedeutet meist „linker Kanal“ und chan = 1 „rechter Kanal“. Siehe hierzu auch Hilfe → LTspice IV → LTspice → Circuit Elements → V. Voltage Source.

- Eintragen der Anweisung für eine Transienten-Analyse, hier z.B. `.Tran 1s`.
- Simulation starten und Darstellung der Spannung am Knoten „A“; siehe **Bild 23**.

**Bild 23:** Ausgangssignal der Spannungsquelle entsprechend **Bild 28**

2. Wave-Datei in LT-SPICE erzeugen

Das Ergebnis einer Transienten-Analyse kann als Wave-Datei abgespeichert und diese anschließend auch hörbar gemacht werden. Das folgende Beispiel soll dies veranschaulichen.

- Im Ordner `Projekt_2` legen wir eine weitere Schaltung an, die den Namen `Wave-2.asc` erhält. Das Signal soll z.B. als Produkt der drei Spannungen `V1`, `V2` und `V3` entstehen: **Bild 24**.

Dabei kann V3 als „Fenster-Funktion“ zum Ein- und Ausblenden des Signals $V1 \cdot V2$ angesehen werden. Die Spannung, die am Knoten „D“ mit Hilfe der B-Quelle B1 gebildet wird, soll schließlich als Wave-Datei gespeichert werden. Maximaler Betrag: 1 V (bzw. 1 A bei Stromquellen)!

- Mit der Anweisung `.Wave <filename.wav> <Nbits> <SampleRate> V(out) [V(out2) ...]` wird SPICE dazu veranlasst, die Wave-Datei zu bilden. Siehe auch Hilfe → LTspice IV → LTspice → Dot Commands → `.WAVE`.
- Nach dem Starten der Simulation wird die Spannung für den Knoten „D“ berechnet (vergleiche **Bild 25**) und gleichzeitig die Wave-Datei mit dem Namen „V(D).wav“ im durch die `.Wave`-Anweisung angegebenen Ordner gespeichert. Diese kann dann hörbar gemacht werden.

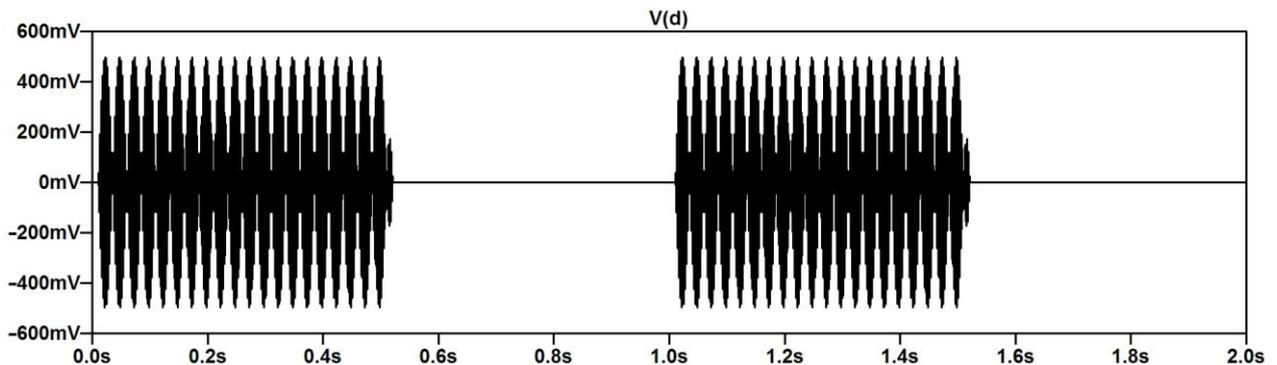


Bild 25: Spannung, die am Knoten „D“ gebildet und als Wave-Datei gespeichert wird

5.8 Laplace-Übertragungsfunktion

Übertragungsfunktionen von Vierpolen können auch durch die *Laplace-Form* im Argument einer gesteuerten E-Quelle als „Wert“ dieser Quelle beschrieben werden. Wir wollen uns dies am Beispiel der Schaltung „TwoTau.asc“ aus dem Education-Ordner von LT-SPICE ansehen. Pfad der Datei:

`C:\LTC\LTspiceIV\Examples\Educational\TwoTau.asc`

Diese Datei kopieren wir in den Ordner `Projekt_2` und ändern sie geringfügig ab, siehe **Bild 26**. Die

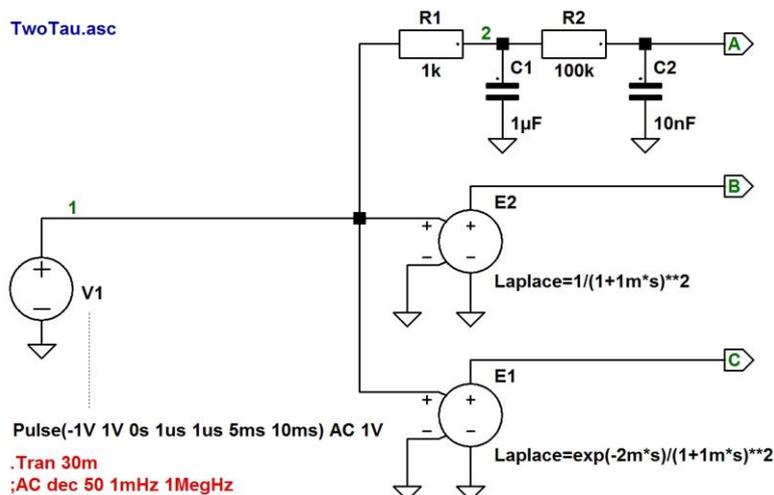


Bild 26: Schaltung „TwoTau“ aus dem Education-Ordner von LT-SPICE als Beispiel für die Laplace-Darstellung eines Vierpols mit zwei Polstellen

Schaltung enthält zwei RC-Glieder R1, C1 und R2, C2; sie bilden einen Tiefpass zweiter Ordnung. Als Eingangssignal dient das Rechteck-Signal der Spannungsquelle V1. Der Ausgangsknoten ist „A“.

Vom Eingangssignal V_1 wird auch die spannungsgesteuerte Spannungsquelle E_2 angesteuert. Diese enthält die *Laplace-Form* der Übertragungsfunktion als „Steuergröße“. Ausgangsknoten ist „B“.

Ein dritter „Vierpol“ mit prinzipiell demselben Frequenzverhalten, also mit denselben Zeitkonstanten die der Original-Tiefpass hat, wird ebenfalls vom Eingangssignal V_1 angesteuert: die spannungsgesteuerte Spannungsquelle E_1 . Der Zähler-Term „ $\exp(-2m*s)$ “ bewirkt eine *Verzögerung* des Ausgangssignals um etwa $2ms$. Hier ist „C“ der Ausgangsknoten, siehe **Bild 26**.

In diesem Beispiel sind die beiden Zeitkonstanten gleich groß: $R_1*C_1 = R_2*C_2 = 1ms$. Wegen des um den Faktor 1000 größeren Widerstandes R_2 gegenüber R_1 *belastet* das zweite RC-Glied R_2 , C_2 den Knoten „2“ praktisch nicht, sodass in der Laplace-Darstellung näherungsweise nur eine „doppelte“ Polstelle auftritt.

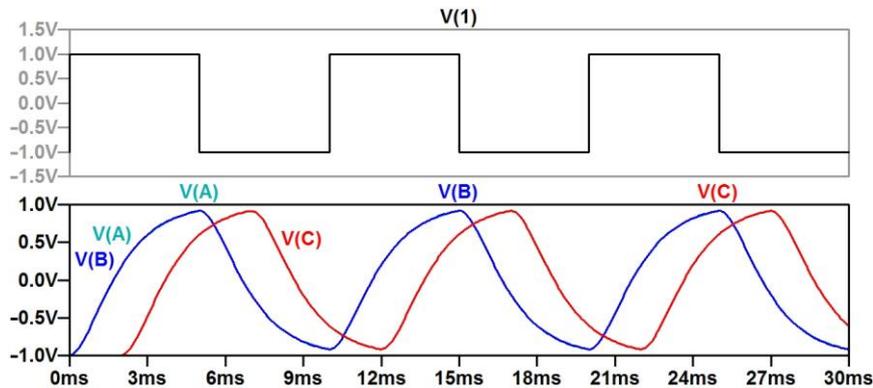


Bild 27:

Ausgangsspannungen an den Knoten „A“, „B“ und „C“. Die Spannungen $V(A)$ und $V(B)$ fallen praktisch zusammen.

5.9 Kommandos zu Analysen bzw. Auswertungen von Analysen

Neben den bisher genannten Anweisungen bietet LT-SPICE eine ganze Reihe weiterer Kommandos zu Analysen bzw. Auswertungen von Analysen, die hier nicht alle angesprochen werden können. Sie sind aber in der Hilfe gut dokumentiert:

Help (F1) → Help Topics → Inhalt → LTspice IV → LTspice → Dot Commands.

Bitte schauen Sie sich die verschiedenen Kommandos, die sogenannten „Dot Commands“, einmal näher an. Sie geben nämlich einen guten Überblick über die vielfältigen Möglichkeiten des Simulators LT-SPICE. Neben den in diesem Skript bereits verwendeten Analyse-Anweisungen möchte ich Ihnen die folgenden Direktiven besonders ans Herz legen:

.Noise, .TF, .Options, .Global, .Func, .Measure, .Net, .Save, und die Paare .IC und .Nodeset, .SaveBias und .LoadBias, .Model und .Subckt, .Lib und .Include, sowie .End und .EndS.

6 Zeichnen von Symbolen

Symbole für die Schaltbilder werden normalerweise im Sym-Ordner von LT-SPICE gespeichert. Pfad: $C:\LTC\LTspiceIV\lib\sym\$. In diesem Ordner können auch selbsterstellte Symbole gesammelt werden. Wie solche erstellt werden, soll in den folgenden Abschnitten kurz erläutert werden. LT-SPICE enthält dazu ein spezielles Zeichenprogramm.

- Symbol-Zeichenprogramm öffnen durch File → New Symbol.
- Im sich öffnenden Zeichenfenster kann nun das neue Symbol gezeichnet werden. Dazu stehen im Menü Draw die wichtigsten Werkzeuge wie z.B. „Linie“, „Rechteck“ usw. zur Verfügung, vergleiche **Bild 28**. Diese Objekte sind nicht elektrisch relevant, sondern dienen nur der optischen Gestaltung. Die Endpunkte sind durch kleine rote Kreise gekennzeichnet; diese Markierungen sind später im Schaltbild nicht sichtbar.

- Durch „Pins“ oder „Ports“ werden die elektrischen Verbindungen zum Symbol hergestellt. Sie werden durch das Kommando Edit → Add Pin/Port hinzugefügt. Im sich öffnenden Dialogfeld sind zwei wichtige Eintragungen vorzunehmen: erstens im Feld Label der *Knoten- oder Pin-Name* und zweitens im Feld Netlist Order die *Reihenfolge*, mit der der Knoten später in der SPICE-Netzliste erscheinen soll. *Die Reihenfolge muss unbedingt mit der des zugehörigen SPICE-Modells oder der in einer Bibliothek gespeicherten Subcircuit-Definition übereinstimmen*. Der Knoten-Name (Label) hat dagegen nur dann eine wichtige Bedeutung, wenn das Symbol in einer hierarchischen Schaltung verwendet wird und dahinter eine Schaltung gleichen

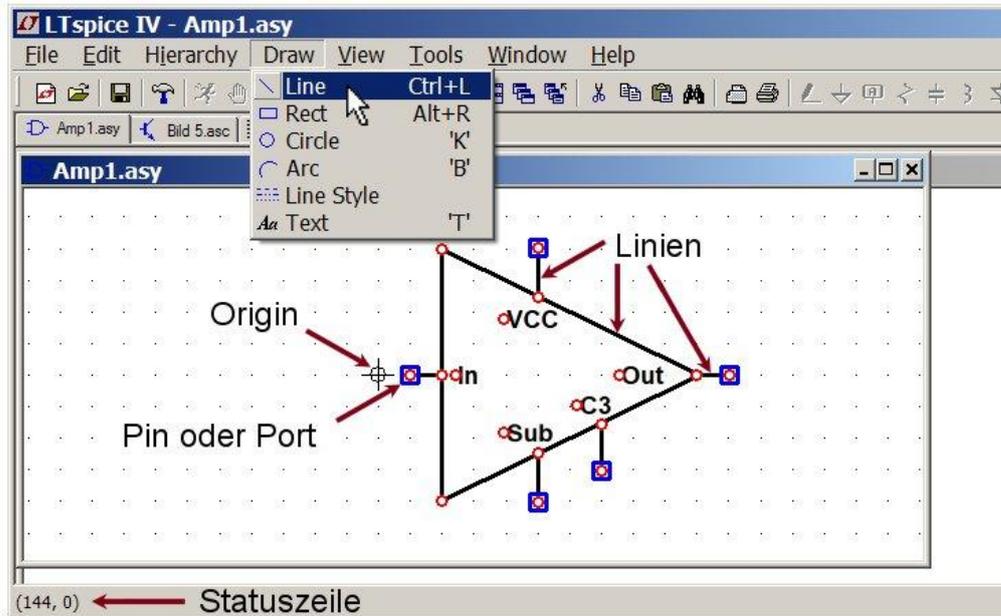


Bild 28: Zeichnen eines neuen Symbols

Namens, aber mit der Endung `.asc` steht, siehe **Kapitel 7**.

- **Attribute** werden über das Kommando Edit → Attributes → Edit Attributes definiert. Das wichtigste Attribut ist der charakteristische *Kennbuchstabe* (z.B. „R“ für einen Widerstand, „Q“ für einen bipolaren Transistor oder „X“ für eine Subcircuit usw.). Nähere Informationen sind zu finden unter: Hilfe → Inhalt → Schematic Capture → Creating New Symbols.
- Im Attribut-Editor kann angegeben werden, ob das Symbol als **Cell** oder als **Block** gebraucht werden soll. Wenn das dahinter stehende SPICE-Modell oder die Subcircuit-Definition in einer Bibliothek gespeichert ist, ist der Symbol-Typ **Cell** geeignet. Für den Gebrauch in hierarchischen Schaltungen, siehe **Kapitel 7**, wird dagegen der Symbol-Typ **Block** gewählt.
- Speichern des neuen Symbols in der LT-SPICE-Symbol-Bibliothek (Endung `.asy`); Pfad: `C:\LTC\LTspiceIV\lib\sym\` oder dort in einem speziellen Ordner, in dem eigene Symbole gesammelt werden.
- Oft ist es möglich, ein bereits in der Symbol-Bibliothek vorhandenes Symbol zu editieren, abzuändern und unter dem neuen Namen zu speichern.

7 Hierarchische Schaltpläne

Hierarchische Schaltungen haben den großen Vorteil, komplexe Schaltungen übersichtlich in Form eines Blockschaltbildes auf einer Seite darstellen zu können. LT-SPICE bietet darüber hinaus die komfortable Möglichkeit, die hinter einem Block-Symbol stehende Schaltung einfach durch einen **Doppelklick** auf das Symbol zu öffnen.

7.1 Zeichnen eines hierarchischen Schaltplanes

Das Zeichnen eines hierarchischen Schaltplanes ist in LT-SPICE relativ einfach. Die wichtigsten Regeln und Schritte werden im Folgenden kurz erläutert:

- Es ist sinnvoll, im normalen Schaltungs-Ordner `Schematic` (siehe **Abschnitt 2.1**) einen *Projekt-Ordner* anzulegen, in dem alle Einzel-Dateien übersichtlich zusammengefasst werden.
- Zu jedem Schaltungs-Block eines hierarchischen Schaltplans wird mit dem Schematic-Capture-Werkzeug von LT-SPICE ein Schaltbild erstellt. Dieses muss im Projekt-Ordner gespeichert werden, in dem auch die Hauptschaltung steht. Die Endung ist `.asc`.
- Zu jedem Schaltungs-Block wird ein *Block-Symbol* (nicht *Cell*) erstellt. Sämtliche Attribute werden gelöscht. Es muss genau denselben Namen erhalten, wie der dahinter stehende Schaltplan, nur mit anderer Datei-Endung: `.asy`. Auch das Symbol muss im Ordner der Hauptschaltung gespeichert werden.
- Die *Zahl der Anschluss-Pins* von Symbol und zugehörigem Schaltplan muss übereinstimmen.
- Die *Namen der Anschluss-Pins* von Symbol und Schaltplan müssen übereinstimmen.
- Wenn die oben genannten Regeln beachtet werden, kann in der Hauptschaltung durch einen **Doppel-Klick** auf ein Block-Symbol die dahinterstehende Teilschaltung geöffnet werden. Nach einer erfolgten Simulation der Hauptschaltung können auch in einer auf diese Weise geöffneten Teilschaltung deren Knoten-Potentiale oder Ströme zur Anzeige gebracht werden.

Anmerkung: Das „Messen“ innerhalb einer Teilschaltung erfordert allerdings, dass die Optionen „Save Subcircuit Node Voltages“ und „Save Subcircuit Device Currents“ aktiviert sind. Dies wird über `Tools` → `Control Panel` → `Save Defaults` eingestellt, vergl. auch **Kapitel 8**.

- Durch einen **Rechts-Klick** auf ein Symbol in der Hauptschaltung öffnet sich ein spezielles Dialogfeld, der sogenannte *Block-Navigator*, siehe **Bild 29**. Über die Schaltfläche `Open Symbol`

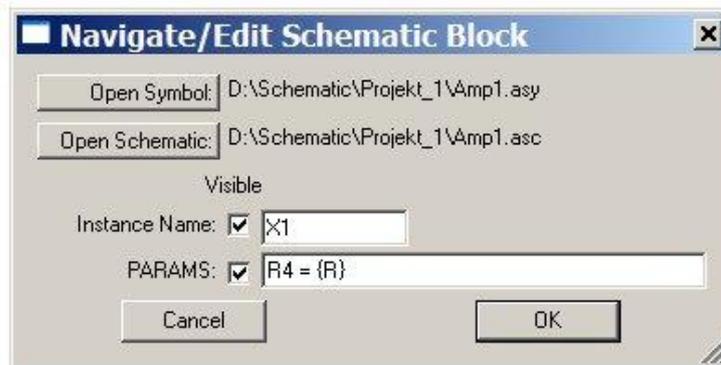


Bild 29: Block-Navigator

Rechts-Klick auf das Block-Symbol in der Hauptschaltung

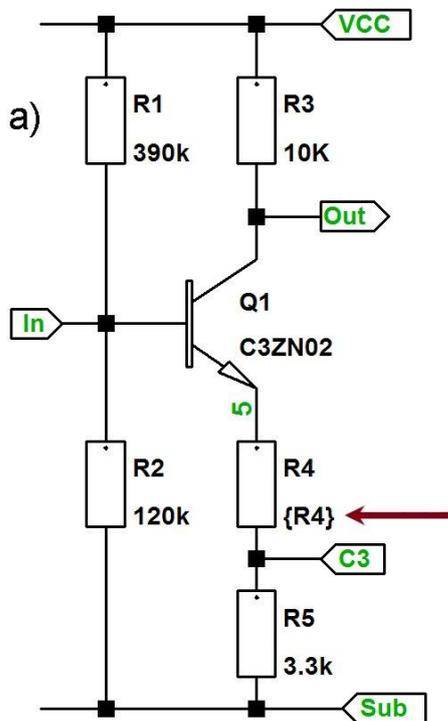
kann das Symbol geöffnet werden. Auch die zugehörige Schaltung ist in diesem Dialogfeld über eine Schaltfläche zu erreichen. Es reicht aber auch ein **Doppel-Klick** auf das Symbol.

7.2 Beispiel

Ein einfaches Beispiel möge dazu dienen, das Arbeiten mit einer hierarchischen Schaltung noch etwas näher zu erläutern. Gewählt wird die in **Bild 5** dargestellte Verstärker-Schaltung. Sie wird in *Schaltungskern* und *äußere Beschaltung* zerlegt. Der Schaltungskern wird dann als Teilschaltung betrachtet und in der Hauptschaltung durch ein Symbol ersetzt. Es wird auch gezeigt, wie von der Hauptschaltung aus Bauteil-Parameter der Teilschaltung verändert werden können.

- Im normalen Schaltungs-Ordner Schematic (siehe **Abschnitt 2.1**) wird ein *Projekt-Ordner* mit dem Namen „Projekt_1“ angelegt, in dem alle Einzel-Dateien übersichtlich zusammengefasst werden. Hier gewählter Pfad: D:\Schematic\Projekt_1.
- Die Bauelemente um den Transistor Q1 herum bilden den Verstärker-Kern. Hierfür wird ein Schaltbild mit dem Namen „Amp1.asc“ erstellt und im Projekt-Ordner „Projekt_1“ gespeichert, siehe **Bild 30 a**).

Amp1.asc



Verstärker.asc

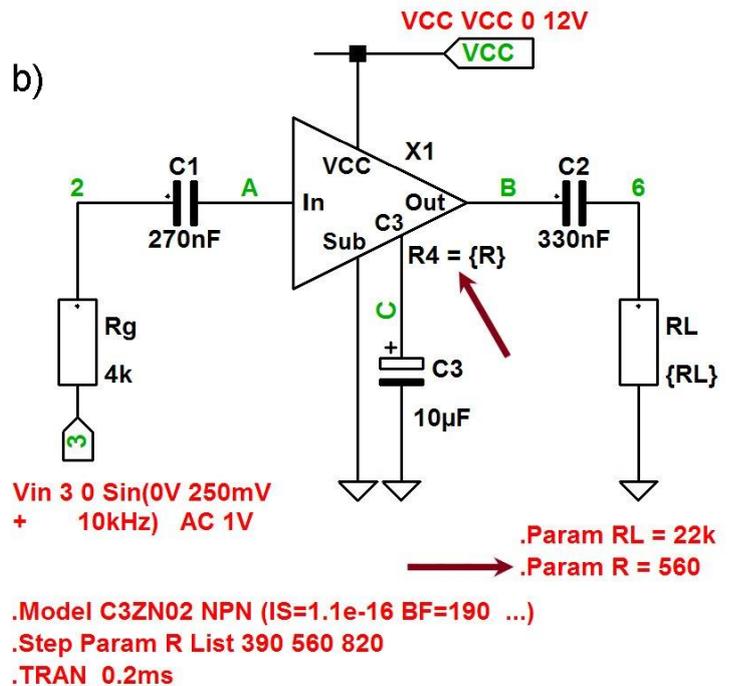


Bild 30: a) Verstärker-Kern: „Amp1.asc“; b) Hierarchische Schaltung: „Verstärker.asc“

Der Widerstand R4 der Teilschaltung a) wird in diesem Beispiel in der Hauptschaltung b) über die Parameter-Anweisung `.Param R = 560` vorgegeben (durch braune Pfeile angedeutet).

- In der Hauptschaltung (**Bild 30 b**) kann als Symbol der Teilschaltung das im **Kapitel 6** gezeigte Beispiel, vergl. **Bild 28**, verwendet werden. Es hat den Namen „Amp1.asy“ und hat dieselben Pin-Namen wie die Schaltung „Amp1.asc“. Dieses Symbol und die Hauptschaltung „Verstärker.asc“ werden im Projekt-Ordner „Projekt_1“ gespeichert.
- In der Hauptschaltung dürfen die Knoten-Namen um das Symbol herum frei gewählt werden. Hier sind z.B. die Knoten-Namen „A“, „B“ und „C“ verwendet worden.
- **Parameter-Übergabe:** Auch in hierarchischen Schaltungen können mittels der Parameter-Anweisung `.Param ... Parameter` über alle Hierarchiestufen hinweg durchgereicht werden. In diesem Beispiel soll der Wert des Widerstandes R4 in der Teilschaltung variiert werden können. Im Schaltbild „Amp1.asc“ wird deshalb statt eines konkreten Wertes dieser als *Parameter* in geschweiften Klammern angegeben: `{R4}`. In der Hauptschaltung muss dieser „Wert“ als Subcircuit-Parameter im zugehörigen Symbol angewiesen werden. Dies gelingt über den Block-Navigator, vergleiche **Bild 29**. Durch einen **Rechts-Klick** auf das Symbol in der Hauptschaltung wird er geöffnet. In der Zeile PARAMS (Subcircuit-Parameter, deshalb das „S“ am Ende) könnte der Wert für den Widerstand R4 direkt angegeben werden, z.B. `R4 = 560`. Hier wird allerdings erneut ein Parameter, nämlich „R“, verwendet. Deshalb wird die Zeile `R4 = {R}` eingetragen. Im Block-Navigator kann durch ein Häkchen markiert werden (Visible), ob die Einträge im

Schaltbild sichtbar sein sollen oder nicht. In der Hauptschaltung steht schließlich die Anweisung `.Param R = 560`, und durch die Zeile `.Step Param R List 390 560 820` wird der Widerstandswert entsprechend der durch die *Liste* spezifizierten Angaben variiert.

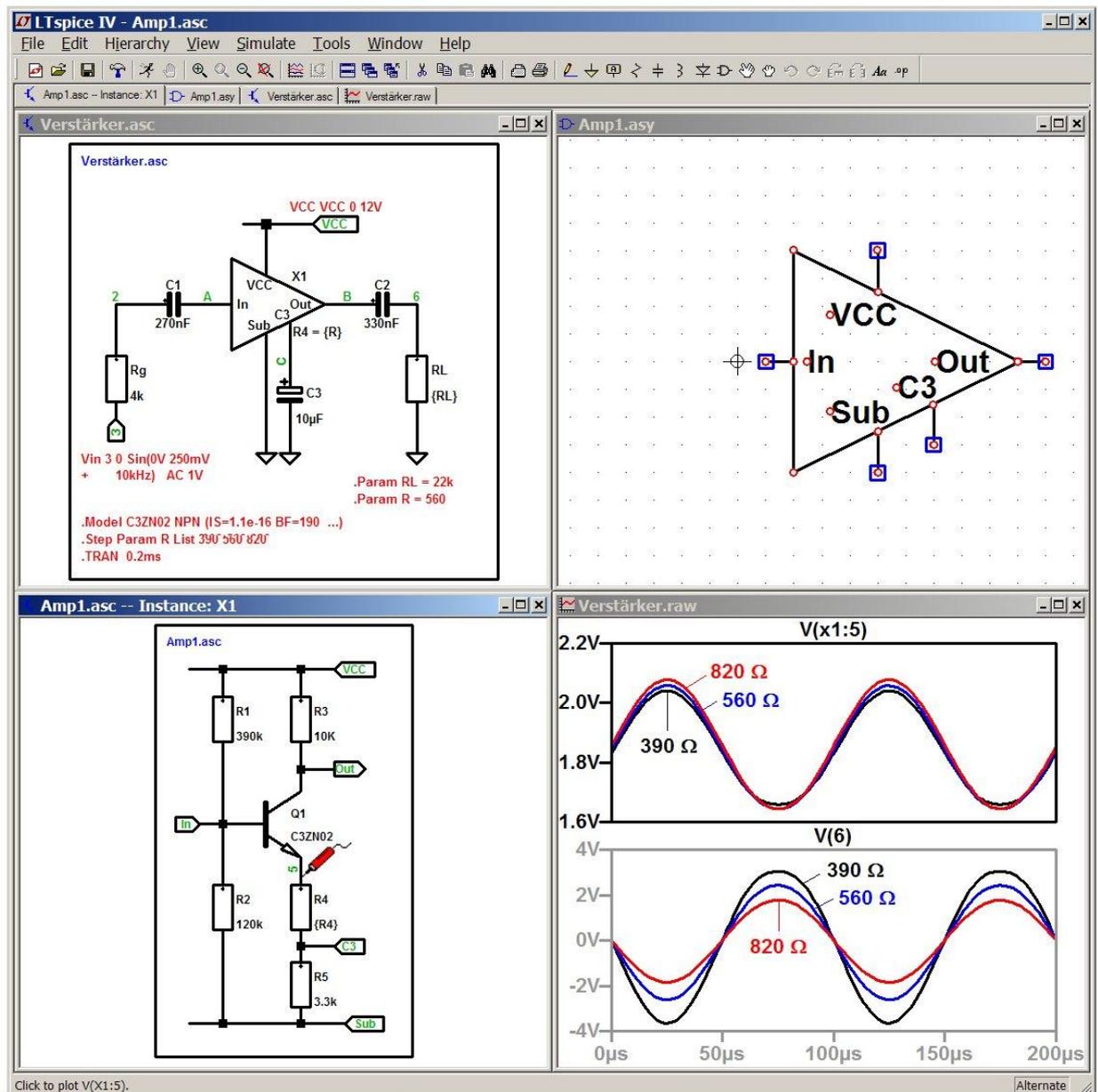


Bild 31: Hauptschaltung „Verstärker.asc“ mit Symbol, Teilschaltung und Plot-Fenster.

In der Teilschaltung „Amp1.asc“ kann z.B. das Potential des Knotens „5“ durch Links-Klick auf den Knoten geplottet werden: `V(X1 : 5)`. Beschriftung: Plot Settings → Notes & Annotations →

- In einer hierarchischen Schaltung können Potentiale und Ströme in gewohnter Weise geplottet werden. Dies gilt auch für Teilschaltungen. In **Bild 31** ist z.B. gezeigt, wie das Potential des Knotens „5“ der Teilschaltung dargestellt werden kann: Zuerst wird die Teilschaltung durch einen **Doppel-Klick** auf das Symbol in der Hauptschaltung geöffnet und dadurch das Teilschaltungs-Fenster *aktiviert*. Dann kann durch Zeigen auf den Knoten und **Links-Klick** dessen Potential angezeigt werden: `V(X1 : 5)`. Im Argument der dargestellten Größe, z.B. des Potentials „V“, wird zuerst das Bauteil genannt – hier „X1“ – und nach einem Doppelpunkt der Knoten-Name „5“.

- **Synchronisation der x-Achsen:** Werden zwei Plots in getrennten Feldern dargestellt, haben normalerweise beide dieselbe x -Variable. Diese Synchronisation kann ausgeschaltet werden: Durch **Rechts**-Klick in das *Plot-Fenster* (nicht auf die Titel-Leiste des Plot-Fensters) öffnet sich ein „Werkzeug-Menü“, siehe **Bild 14 a**). Dort kann durch **Links**-Klick auf das Werkzeug **Sync. Horiz. Axes** das Häkchen weggenommen werden. Anschließend können unterschiedliche Variablen gewählt werden. Dies soll am Beispiel der Verstärker-Schaltung durch **Bild 32** verdeutlicht werden:

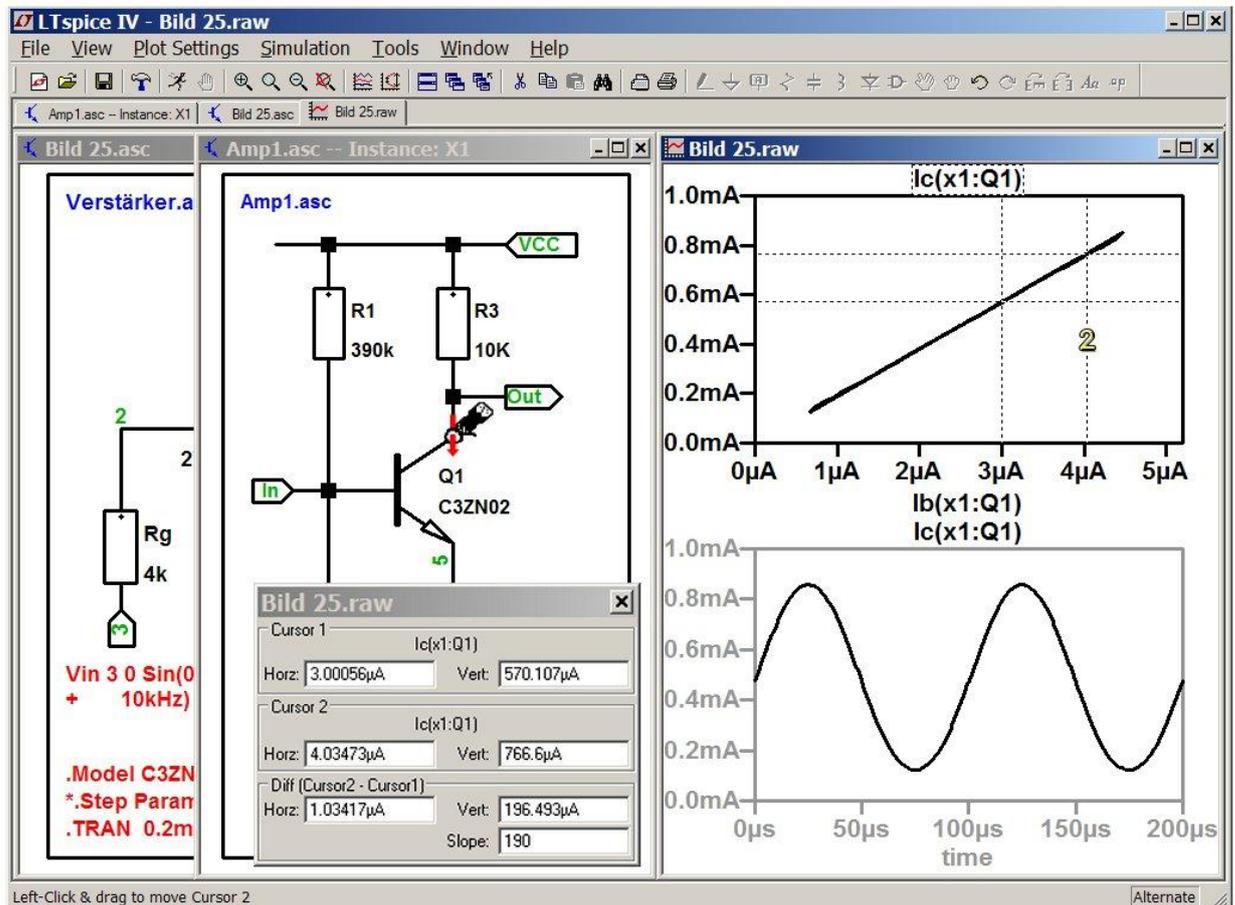


Bild 32: Zur Ausschaltung der x-Achsen-Synchronisation

Im Plot-Fenster werden zwei Fenster geöffnet (**Rechts**-Klick im Plot-Fenster \rightarrow Add Plot Pane oder Shortcut Ctrl A). In beiden Fenstern wird z.B. der Kollektor-Strom des Transistors Q1 der Teilschaltung dargestellt (IC (X1 : Q1)).

Im nächsten Schritt wird, wie oben schon beschrieben, die Synchronisation der x-Achsen *ausgeschaltet*.

Durch einen **Links**-Klick auf die x-Achse des oberen Plot-Fensters wird das Dialogfeld **Horizontal Axis** geöffnet. Im Fenster **Quantity Plotted** kann anschließend die neue x-Variable eingegeben werden: In diesem Beispiel der Basis-Strom des Transistors Q1: IB (X1 : Q1) . Nach Bestätigung durch OK wird im oberen Plot-Fenster der Kollektor-Strom in Abhängigkeit vom Basis-Strom dargestellt. Im unteren Fenster bleibt weiterhin die Zeit (time) die x -Variable. Auch hier könnte eine andere Variable gewählt werden.

Werden z.B. im oberen Plot-Fenster der erste und der zweite Cursor aktiviert, kann aus dem Differenzen-Quotienten die Stromverstärkung abgelesen werden: Slope = 190 (vergl. Modell).

8 LT-SPICE-Einstellungen (Control Panel)

Die Grundeinstellungen für LT-SPICE werden über das Dialogfeld **Control Panel** vorgenommen. Dieses kann über eine Schaltfläche (als Hammer dargestellt) der Werkzeugleiste geöffnet werden, siehe nebenstehendes Bild. Auf



eine detaillierte Beschreibung wird hier verzichtet und stattdessen auf die im Programm eingebaute Hilfe verwiesen. Die Hilfe-Themen sind über die Schaltfläche **Help** oder die Funktionstaste **F1** zu erreichen. Einzelne Einstellungen sollen im Folgenden dennoch kurz erläutert werden.

8.1 Operation

Hier können unter anderem einige Einstellungen vorgenommen werden, die das Speichern von Dateien betrifft, die LT-SPICE während der Simulation erzeugt. Es kann angegeben werden, ob solche Dateien nach Schließen des Simulators gespeichert werden sollen oder nicht. Damit nicht zu viel Datenmüll entsteht, bevorzuge ich das Löschen dieser Dateien.

Die durch einen Stern (*) gekennzeichneten *Einstellungen* werden in der LT-SPICE-INI-Datei „LTspiceIV.ini“ gespeichert; Pfad: C:\Benutzer\...\LTspiceIV.ini (abhängig vom Betriebssystem). Die INI-Datei steht nicht mehr (wie früher) im Windows-Ordner!

8.2 Compression

Die Simulationsergebnisse werden als RAW-Daten gespeichert und können im Anschluss an die Simulation durch das Plot-Programm zur Anzeige gebracht werden. Damit die Datenmenge nicht zu groß wird, nimmt LT-SPICE eine Kompression vor. Ein komprimiertes File ist etwa fünfzigmal kleiner als ein nicht komprimiertes. Im Dialogfeld **Compression** kann dies näher spezifiziert werden.

Für viele Anwendungen können die Default-Einstellungen beibehalten werden, doch bei Filter-Schaltungen hoher Güte oder Quarz-Oszillatoren kann es zu Problemen kommen, wenn zu stark komprimiert wird. Dies probiert man am besten aus.

Die Einstellungen werden *nicht* in der INI-Datei festgehalten. Man kann allerdings im Schaltplan eine Options-Anweisung aufnehmen, die die gewünschten Plot-Einstellungen enthält. Z.B.:

```
.Options Plotwinsize = 0 zum Ausschalten der Datenkompression.
```

8.3 SPICE

Es ist ein Kompromiss zu finden zwischen der Rechengenauigkeit und der Rechenzeit. Für viele Anwendungen können die Default-Einstellungen beibehalten werden, doch in manchen Fällen müssen die Toleranzen verringert werden. Dies gilt besonders für Filter-Schaltungen hoher Güte oder Quarz-Oszillatoren. Hierfür sind oft sogar erheblich höhere Rechengenauigkeiten erforderlich. Dies probiert man am besten aus. – Die Einstellungen werden *nicht* in der INI-Datei festgehalten. Man kann allerdings im Schaltplan eine Options-Anweisung aufnehmen, die die gewünschten Genauigkeiten enthält.

LT-SPICE enthält zwei verschiedene SPICE-Versionen (**Solver**). Der sogenannte *normale Solver* ist etwa doppelt so schnell wie der alternative (*Alternate Solver*), hat allerdings eine geringere innere Genauigkeit. Die gewünschte Version kann in einem Kontrollfeld ausgewählt werden. Diese Einstellung wird in der INI-Datei gespeichert. Der verwendete Solver wird in der Statuszeile rechts angezeigt.

8.4 Save Defaults

In dieser Registerkarte kann durch ein Häkchen markiert werden, welche Ströme und Spannungen im Plot-File (RAW-Datei) gespeichert werden sollen. Je mehr Größen gespeichert werden, desto umfangreicher wird die Plot-Datei. Wenn jedoch hierarchische Schaltungen simuliert werden, ist es sinnvoll,

auch die Potentiale und Ströme der Subcircuits zu speichern. – Die meisten Einstellungen werden in der INI-Datei festgehalten.

8.5 Drafting Options

In dieser Registerkarte können Optionen für das Erstellen der Schaltpläne definiert werden. Hier werden z.B. auch die Farben und Buchstaben-Größen festgelegt. – Die meisten Einstellungen werden in der INI-Datei gespeichert.

- **Farb-Einstellungen** können nach Betätigen der Schaltfläche **Color Schema** sowohl für die Schaltungen, als auch für den Plot-Bereich und die Netzlisten vorgenommen werden, vergleiche **Bild 33**. Auch die Hintergrund-Farbe wird hier eingestellt. Ein weißer Hintergrund ist z.B. dann sinnvoll, wenn viel auszudrucken ist, weil dann nicht so viel Tinte oder Toner verbraucht wird. Wenn man dagegen nur am Bildschirm arbeitet, könnte im Plot-Bereich ein schwarzer Hintergrund günstiger sein. Das probiert man am besten aus. Alle Farben können mittels der Schieberegler „rot“, „grün“ und „blau“ eingestellt werden.

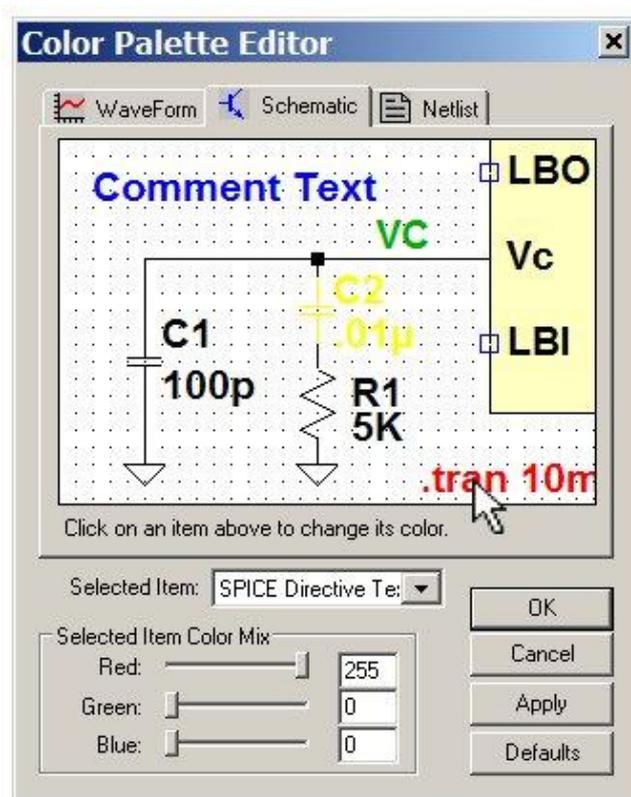


Bild 33: Farb-Einstellungen

- 1) Gewünschte Registerkarte wählen, z.B. Schematic.
- 2) Mit der Maus auf ein Objekt zeigen, z.B. das SPICE-Kommando **.tran 10m** und **Links**-Klick. Das Objekt wird im Fenster „Selected Item“ genannt.
- 3) Gewünschte Farbe durch Betätigen der Schieberegler einstellen.
- 4) Schaltfläche „Apply“ betätigen: Die Einstellung wird sofort übernommen.
- 5) Auf das nächste Objekt zeigen, z.B. den Hintergrund usw.
- 6) Zum Schluss mit „OK“ bestätigen.

- **Shortcuts** können das Arbeiten oft erheblich erleichtern. Nach dem Betätigen der Schaltfläche **Hot Keys** stehen für die verschiedenen Bereiche Registerkarten zur Auswahl. Man wählt zunächst eine Registerkarte, z.B. „Schematic“. Dort sind bereits Shortcuts grau hinterlegt eingetragen. Möchte man einen Shortcut neu definieren, zeigt man mit der Maus auf das zugehörige graue Feld und führt dort einen **Links**-Klick aus. Danach wird einfach die neue Tasten-Kombination eingetippt. Mit **OK** werden zum Schluss die Einstellungen wirksam.

Die Shortcuts werden am besten so festgelegt, dass man sie sich leicht merken kann. Oft kann man sie an andere verwendete Programme anpassen. Die von mir verwendeten Shortcuts sind in der Datei „LTspiceIV.ini“ enthalten. Diese Datei steht auf dem Hochschul-Server zur Verfügung; Pfad: „G:\docs\Etech\Cordes\SPICE\LT-SPICE\LTspiceIV.ini“.

Auf der folgenden Seite ist eine Liste der von mir verwendeten Shortcuts zu finden.

LT-SPICE-Shortcuts

Schaltbilder	Shortcut	Kurven	Shortcut	Symbole	Shortcut
Schaltungselement	I	Neue Kurve	A	Attribut-Editor	A
Leitung	F3	Neues Plotfenster	Ctrl+A	Attribut-Fenster	Ctrl+A
Knoten	F4				
Löschen	F5 (Delete)	Löschen	F5 (Delete)	Löschen	F5
Kopieren	Ctrl+C			Kopieren	Ctrl+C
Verschieben	M	Verschieben	M	Verschieben	M
Verschieben, einschließlich der Leitungen (Drag)	F8	Verschieben, einschließlich der Leitungen (Drag)	F8	Verschieben, einschließlich der Leitungen (Drag)	F8
Undo	Ctrl+Z	Undo	Ctrl+Z	Undo	Ctrl+Z
Redo	Ctrl+Y	Redo	Ctrl+Y	Redo	Ctrl+Y
Text	T	Text	T	Text	T
Linie	Ctrl+L	Linie	Ctrl+L	Linie	Ctrl+L
Rechteck	Alt+R	Rechteck	Alt+R	Rechteck	Alt+R
Kreis	K	Kreis	K	Kreis	K
Kreisbogen	B			Kreisbogen	B
Spice-Anweisung	S	Autorange Vertical	V		
Grid	Ctrl+G	Grid	Ctrl+G		
Drehen	Ctrl+R			Drehen	Ctrl+R
Textmarkierung	O			Objektmarkierung	O
Spiegeln	Ctrl+E			Spiegeln	Ctrl+E
Zoom Area	Z	Zoom Area	Z	Vergrößern	Z
Zoom back	-	Zoom back	-	Zoom back	-
View Fit	Home	View Fit	Home		
Simulation starten	Leertaste	Simulation starten	Leertaste		
Simulation halt	H	Simulation halt	H		
GND	G	Plot Setting öffnen	P	Neuer Pin	P
Widerstand	R	Pfeil	Alt+P	Pin-Tabelle	Ctrl+P
Kondensator	C	Cursorposition	Alt+C		
Spule	L	Redraw	X		
Diode	D	Reload Plot Setting	Y		
View Error Log	E	View Error Log	E		

Netzliste	Shortcut
Simulation starten	Ctrl+Leertaste
Simulation Pause	Ctrl+P
Simulation halt	Ctrl+H
Undo	Ctrl+Z
Redo	Ctrl+Y
View Error Log	Ctrl+E

Anmerkung:

Obwohl in der Liste große Buchstaben geschrieben sind, wird die *Shift-Taste* nicht betätigt. Es brauchen also nur *kleine* Buchstaben eingetippt zu werden!

9 Literatur

- [1] Mike Engelhardt: *LTspice Getting Started Guide*; (www.linear.com)
- [2] Mike Engelhardt: *LTspice Users Guide.pdf*; (www.linear.com)
- [3] K.-H. Cordes: *Einführung in das Simulationsprogramm SPICE*; Server der FH Hannover; Pfad: G:\docs\Etech\Cordes\SPICE\Umdrucke\SPICE.pdf
- [4] K.-H. Cordes: *Neue Symbole für LT-SPICE*; Server der FH Hannover; Pfad: G:\docs\Etech\Cordes\SPICE\LT-SPICE\Neue Symbole\sym_neu
- [5] K.-H. Cordes: „*Spicelib*“; Server der FH Hannover; Pfad: G:\docs\Etech\Cordes\Spicelib
- [6] K. S. Kundert: *The Designer's Guide to SPICE and SPECTRE*; Kluwer Academic Publishers, May 1995
- [7] Wolfgang Mües: *SPICE 3f4 für Windows, Version 1.5*; Programm-Diskette; 28. 10. 1997.
- [8] Dietmar Ehrhardt, Jürgen Schulte: *Simulieren mit PSPICE*; Vieweg Verlag 1995
- [9] G. Brocard: *Simulation in LTSPICE IV*; Würth Elektronik, DUNOT, Paris, 2011, ISBN 978-3-89929-257-2