

Kurzanleitung
zur Laborsoftware
L T s p i c e I V
(SwitcherCAD III)



Prof. Dipl. Ing. H.W. Neuschwander
Dipl. Ing. (FH) R. Hingsamer

Stand: 31.05.2010



**Fachhochschule
Kaiserslautern**
University of Applied Sciences

**Angewandte
Ingenieurwissenschaften**
Kaiserslautern

Einleitung

Das Simulationsprogramm „LTspice IV“ (bis zum Herbst 2008 hieß das Programm „SwitcherCAD III“) wurde von der Firma Linear Technology Corporation (LTC) ursprünglich zur Simulation von Schaltnetzteilen entwickelt. Durch seine hohe Flexibilität kann das Programm aber auch zur Simulation vieler anderer Schaltkreise eingesetzt werden.

LTC stellt dieses Programm kostenlos auf seiner Homepage zur Verfügung:

<http://www.linear.com>

(Design Support ⇔ Design Simulation ⇔ LTspice IV)

Der Download besteht aus einer ca. 8-9 MByte großen Datei LTspiceIV.exe. Durch Starten dieser exe-Datei erfolgt die Installation unter Windows standardmäßig in den Ordner C:\Programme\LTC\LTspiceIV.

Ein Update auf die jeweils aktuelle Version sowie auf die aktuellen Bauteiledaten erfolgt aus dem laufenden Programm heraus über den Menüpunkt „*Tools* ⇔ *Sync Release*“.

LTspice IV wird relativ häufig aktualisiert. Nach Möglichkeit arbeiten wir im Labor mit der jeweils aktuellsten Version.

Nach Durcharbeiten dieses Dokuments sollten Sie

- einfache analoge Schaltungen simulieren können,
- die verschiedenen Simulationsarten verstehen und anwenden können
- und Simulationsergebnisse fachlich korrekt interpretieren können.

Das Durcharbeiten der Beispiele aus diesem Dokument bildet die Grundlage für das Labor „Bauelemente und Schaltungstechnik“ an der Fachhochschule Kaiserslautern.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung in LTspice IV	1
1.1. Einleitung	1
1.2. Einführungsbeispiel.....	1
1.2.1. Erstellung der Schaltung und Festlegung der Bauteilewerte	1
1.2.2. Auswahl der Simulationsart	7
1.2.3. Durchführung der Simulation	8
1.2.4. Einbinden eines neuen Bauteiles	12
1.2.5. Zusammenfassung	14
1.3. Daten der Standardbauelemente	17
1.3.1. Der Widerstand.....	17
1.3.2. Der Kondensator.....	17
1.3.3. Die Spule.....	18
1.4. Strom- und Spannungsquellen	19
1.4.1. Die Pulsquelle (PULSE)	20
1.4.2. Die Sinusquelle (SINE).....	21
1.4.3. Die Exponentialquelle (EXP).....	22
1.4.4. Die Frequenzmodulationsquelle (SFFM)	23
1.4.5. Die PWL-Quelle (PWL).....	24
1.5. Simulationsarten	25
1.5.1. Transientenanalyse.....	26
1.5.2. AC Analyse.....	27
1.5.3. DC Sweep.....	28
1.5.4. Die Gleichstrom-Arbeitspunktanalyse (DC op pnt)	29
1.6. Spice-Kommandos	30
1.6.1. Ermittlung einzelner Messwerte	31
1.6.2. Ermittlung von Messreihen (Temperatur, Toleranzen)	33
1.7. Simulation eines Transformators.....	36
1.8. Verschiedene weitere Quellen.....	37
1.8.1. Gesteuerte Strom- und Spannungsquellen	37
1.8.2. Formelgesteuerte Quellen.....	40
1.8.3. FM und AM - Quellen.....	42
1.9. Laplace-Übertragungsfunktion.....	45
1.10. Wave in und Wave out.....	47
1.10.1. Einspeisen eines Klages aus einer Wavedatei	47
1.10.2. Speichern einer Knotenspannung in eine Wavedatei.....	48
1.11. SPICE-Netzlisten	51

1.12.Subcircuits (SPICE-Modelle)	55
1.12.1. Übersicht	55
1.12.2. Beispiel der Modellierung eines zeitabhängigen Widerstandes	59
2. Literaturverzeichnis	65
3. Stichwortverzeichnis	67

1. Einführung in LTspice IV

1.1. Einleitung

Die allgemeine Bedienung von LTspice IV wird hier anhand eines einfachen Beispiels erklärt. Dabei beschränken wir uns auf die Eingabe des Schaltplans (da LTspice IV auf Spice basiert, wird der Schaltplan vor der Simulation in eine Netzliste gewandelt - es wäre also auch möglich, die Netzliste direkt einzugeben).

Anschließend werden die wichtigsten Bearbeitungsvorgänge in tabellarischer Zusammenfassung aufgelistet.

Untenstehende Abbildung zeigt die Hauptmenüleiste von LTspice IV und die Bedeutung der dort vorhandenen Symbole.

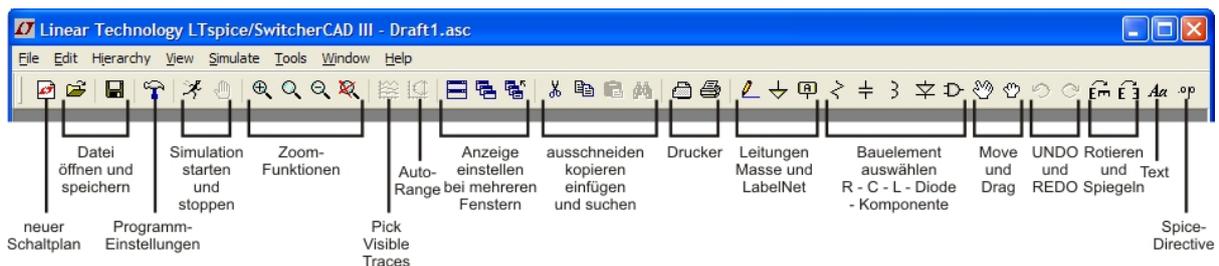


Abbildung 1: die Hauptmenüleiste

1.2. Einführungsbeispiel

1.2.1. Erstellung der Schaltung und Festlegung der Bauteilwerte

Starten sie LTspice IV. Um eine neue Schaltung zu erstellen, klicken Sie auf das Symbol am linken Rand der Hauptmenüleiste oder wählen sie das Menü-Kommando *File* ⇒ *New Schematic*.



Das Programm erstellt nun einen leeren Schaltplan. In diesen möchten wir eine Schaltung mit einem Widerstand, einem Kondensator und einer Spannungsquelle einfügen.



Zuerst platzieren wir den Widerstand und klicken dazu auf das Symbol „*Resistor*“ in der Hauptmenueleiste (LTspice IV verwendet standardmäßig die amerikanischen Symbole - das deutsche Symbol für einen Widerstand finden sie nach einem Klick auf das Symbol „*Component*“ im Unterverzeichnis *MISC* unter dem Namen „*EuropeanResistor*“).

Der Widerstand „hängt“ nun an dem Mauscursor. Mit „*STRG+R*“ lässt er sich drehen, mit „*STRG+E*“ lässt er sich spiegeln.

Nun klicken wir einfach die gewünschte Stelle im Schaltplan an. Der Widerstand wird dort platziert und erhält automatisch die Bezeichnung R1. Wir könnten bei Bedarf weitere Widerstände platzieren, diese erhielten dann automatisch fortlaufende Bezeichnungen, also R2, R3 usw.

Den Platziermodus der Widerstände beenden wir durch Drücken der rechten Maustaste oder durch Betätigen der Taste „*ESC*“.



Als nächstes platzieren wir mit dem Symbol „*Capacitor*“ den Kondensator. Unser Schaltplan sollte nun so aussehen:

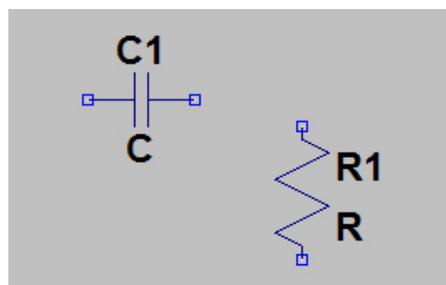


Abbildung 2: Platzieren der ersten Bauelemente



Widerstände, Kapazitäten, Induktivitäten und Dioden sind über Symbole der Hauptmenueleiste direkt platzierbar. Alle anderen Bauteilsymbole sind zusammengefasst unter dem Symbol „*Component*“. Klicken wir dieses an, öffnet sich ein Fenster, in dem wir aus allen zur Verfügung stehenden Symbolen das Gewünschte auswählen können. Hier finden wir Symbole für Transistoren, MOSFETs, LEDs, Operationsverstärker usw.

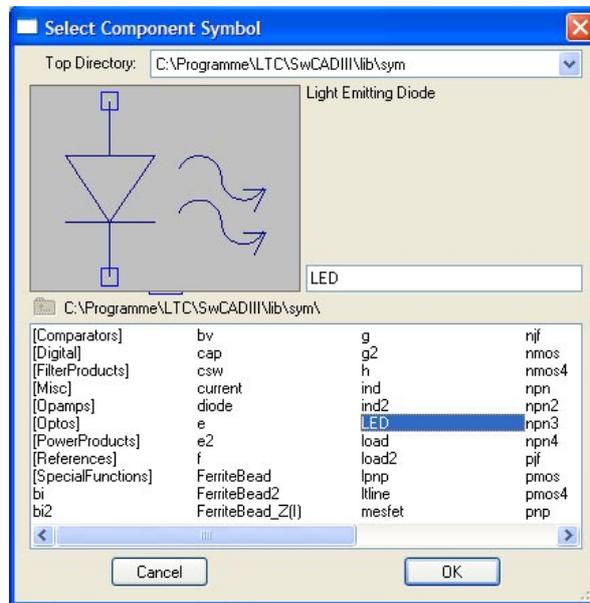


Abbildung 3: Component-Auswahl

Soll ein Bauteil gelöscht werden, klicken wir das Symbol „*Schere*“ an oder drücken die Taste „*Entf*“. Der Cursor nimmt dann das Aussehen einer Schere an und das zu löschende Bauteil wird damit einfach angeklickt.



Um ein vorhandenes Bauteil zu verschieben, klicken wir auf das Symbol „*Drag*“ (kleines Handsymbol, rechts). Der Cursor nimmt dann das Aussehen einer Hand an. Mit diesem Cursor klicken wir das gewünschte Bauteil an und können es anschließend zusammen mit seiner Bauteilnummer und Bauteilebezeichnung frei bewegen. Ein weiteres Klicken platziert das Bauteil an seiner neuen Stelle.



Wollen wir nur die Bauteilnummer oder nur die Bauteilebezeichnung verschieben, klicken wir einfach Nummer oder Bezeichnung an und verschieben diese dann einzeln.

Bereits bestehende elektrische Verbindungen werden beim Drag-Verschieben mitgezogen.

Beim Symbol „*Move*“ (großes Handsymbol, links) werden beim Verschieben einzelner Komponenten bestehende elektrische Verbindungen **nicht** mitgezogen.



Wollen wir ein bereits platziertes Bauteil drehen oder spiegeln, arbeiten wir ebenfalls mit „*Drag*“ oder „*Move*“. Anschließend klicken wir auf das Bauteil und drehen es mit „*STRG+R*“ bzw. spiegeln es mit „*STRG+E*“.

Wir können auch mehrere Bauteile gleichzeitig bearbeiten. Dazu wählen wir zuerst wieder „*Drag*“ oder „*Move*“ und ziehen dann um die gewünschten Bauteile mit dem Mauscursor einen Rahmen. Anschließend können wir alle in dem Rahmen enthaltenen Bauteile gemeinsam verschieben, drehen oder spiegeln.

Nun integrieren wir noch eine Spannungsquelle in unseren Schaltplan. Dazu wählen wir „*Component*“ und klicken dann in der Liste auf „*Voltage*“. Nach Bestätigen mit „*OK*“ können wir die Spannungsquelle platzieren.



Als nächstes benötigen wir noch ein Bezugspotential. Dazu klicken wir auf das Symbol „*Ground*“ und platzieren das nun erscheinende Symbol unterhalb des Minuspols der Spannungsquelle.



ACHTUNG:

Es ist wichtig, dass in jeder Schaltung das Ground Symbol eingebunden wird, da es sonst zu einem undefinierten Verhalten der Software kommt!



Nachdem alle Bauteile platziert sind, müssen wir diese noch verbinden. Dazu wählen wir das Symbol „*Wire*“ für die Leitungen aus. Durch Klicken an den Anschlusskontakten der Bauteile können wir nun Verbindungslinien zwischen den einzelnen Bauteilen ziehen. Bei verbundenen Leitungen erscheint automatisch ein quadratischer Punkt.

Der Schaltplan sollte nun folgendermaßen aussehen:

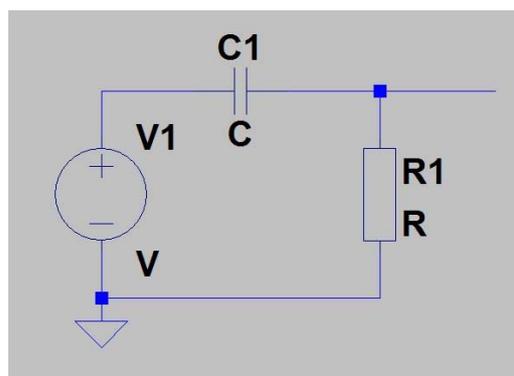


Abbildung 4: der erste Schaltplan

Die von uns platzierten Bauteile wurden bereits automatisch benannt (C1, R1, V1). Diese Benennung können wir auch ändern, indem wir mit der rechten Maustaste auf einen der Namen klicken und dann einen neuen Namen eingeben.

Nun müssen den Bauteilen noch Werte zugewiesen werden. Dazu klicken wir mit der rechten Maustaste auf das Symbol des Widerstandes. In dem sich nun öffnenden Menü können wir den Widerstandswert in Ohm (*Resistance*), die Toleranz in % und die erlaubte Leistung (*Power Rating*) eingeben. Alternativ können wir auch aus einer Bibliothek von vorgegebenen Widerständen wählen, bei denen diese Werte schon vorgegeben sind. Dazu klicken wir auf „*Select Resistor*“ und wählen dort einen gewünschten Widerstand aus. In unserem Beispiel geben wir den Wert selbst ein. Dazu ersetzen wir das „*R*“ bei Resistance mit „*2k*“ = **2kOhm**. Die anderen beiden Werte lassen wir hier außer Acht. Genauso verfahren wir auch mit dem Kondensator. Hier geben wir bei „*Capacitance*“ den Wert „*100μ*“ = **100μF** ein. Das Zeichen „μ“ erzeugen wir dabei durch gleichzeitiges Drücken der Tasten „*Alt Gr*“ und „*M*“.

Bei der Eingabe der Werte gelten grundsätzlich die gängigen Abkürzungen wie z.B. „*p*“ für Pico oder „*n*“ für Nano. Bei Eingabe eines Wertes im Mega-Bereich ist allerdings zu beachten, dass „*Meg*“ und nicht „*M*“ eingegeben wird - „*M*“ wird von LTspice IV nämlich als „*Milli*“ interpretiert.

Nun müssen wir der Spannungsquelle noch eine Spannung zuweisen. Dazu klicken wir mit der rechten Maustaste auf das Symbol der Spannungsquelle und geben dort bei „*DC value*“ den Wert „*10V*“ ein (entspricht 10 Volt). Den Innenwiderstand (*Series Resistance*) vernachlässigen wir hier. Genauere Informationen über die verschiedenen Quellen erhalten sie im Kapitel „Strom- und Spannungsquellen“.

Als nächstes versehen wir noch eine der Leitungen mit einem Signalnamen, um später die Auswahl des darzustellenden Signals zu erleichtern. Dazu wählen wir das Symbol „*Label Net*“ aus und geben bei „*ABC*“ die Bezeichnung „*out*“ ein. Danach klicken wir auf „*OK*“ und platzieren das Label an der Leitung, die zwischen Kondensator und Widerstand liegt (achten sie darauf, dass die kleine rechteckige Markierung auf der Linie liegt). Klicken sie erneut rechts, um aus dem Label-Modus herauszukommen.

Wenn wir nun den Mauszeiger über die Leitung zwischen dem Kondensator und dem Widerstand bewegen, steht unten links in der Statusleiste „**This is node out**“. Daran erkennen wir, dass das Benennen der Leitung erfolgreich war. Auf die gleiche Weise platzieren wir ein Label „*in*“ am Schaltungseingang (links vom Kondensator).



Der Schaltplan sollte jetzt so aussehen:

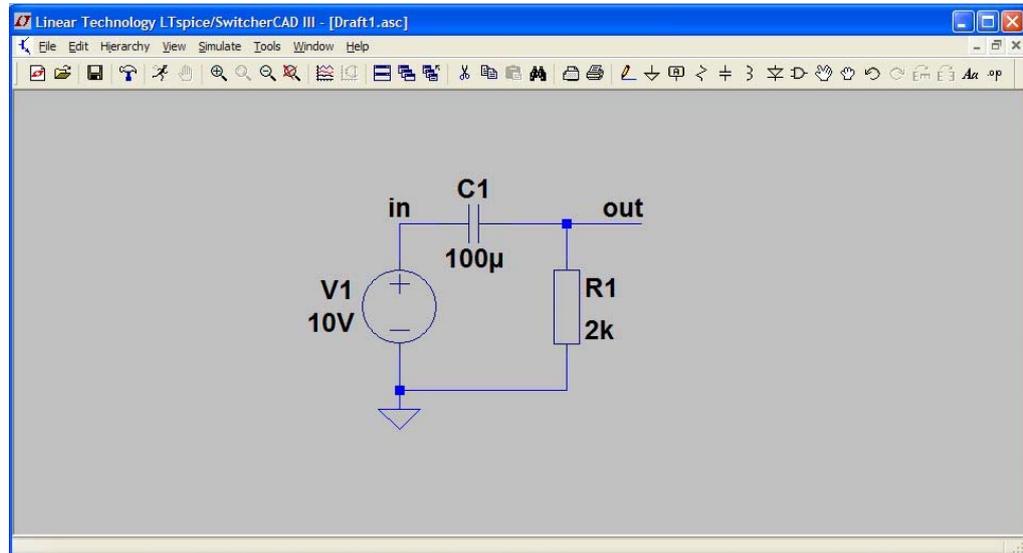


Abbildung 5: Schaltplan mit Bauteilewerten und Signalnamen

In Abbildung 5 sind die Felder mit den Namen und den Werten der Bauteile durch manuelles Verschieben bereits etwas übersichtlicher angeordnet.

Bevor wir nun mit der Simulation beginnen, speichern wir zuerst unseren Schaltplan auf der Festplatte ab. Wenn wir nicht selbst einen Dateinamen festlegen, verwendet LTspice IV automatisch den Namen „Draftx“, x ist dabei eine fortlaufende Nummer. Der Dateityp ist „ASC“, dies ist eine einfache ASCII-codierte Textdatei.

1.2.2. Auswahl der Simulationsart

Um die Art der Simulation auszuwählen, klicken wir auf *Simulate* ⇒ *Edit Simulation Cmd.* Es öffnet sich ein Fenster „*Edit Simulation Command*“ mit den Registerkarten der sechs zur Verfügung stehenden Simulationsarten.

Transient - AC Analysis - DC sweep - Noise - DC Transfer - DC op pnt

Für jede Simulationsart können wir eine Anzahl von Parametern einstellen. Jede Parametereingabe wird dabei in einen SPICE-Befehl umgesetzt, der direkt im unteren Anzeigefeld des Fensters angezeigt wird.

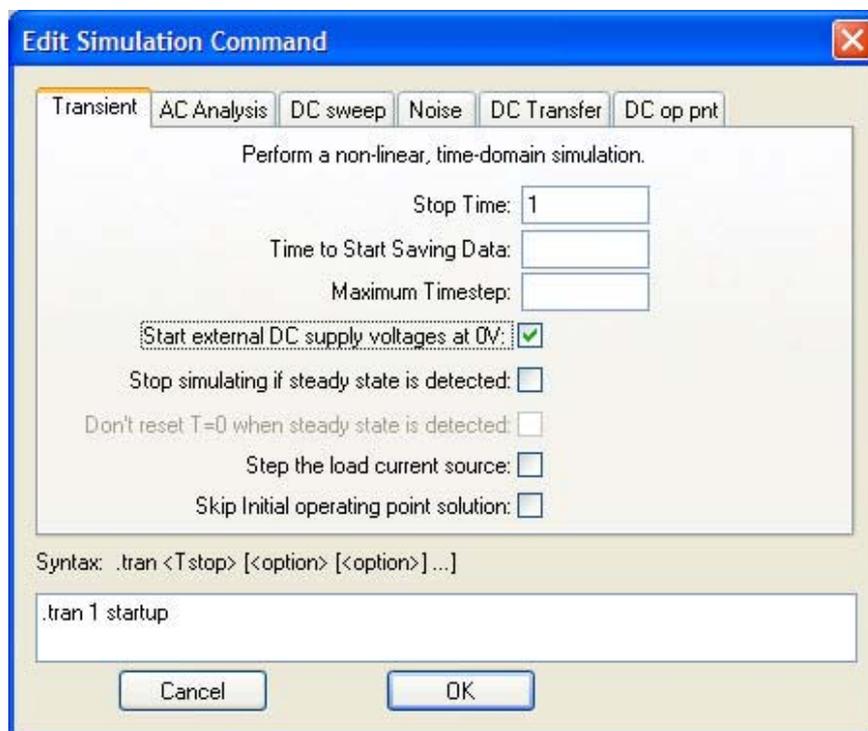


Abbildung 6: Fenster der Simulationsarten und ihrer Parameter

Da uns besonders der Zeitverlauf der Spannung am Widerstand interessiert, benutzen wir die Simulationsart „Transient“ (die Transientenanalyse dient zur Untersuchung zeitabhängiger elektrischer Vorgänge, z.B. dem Laden und Entladen eines Kondensators).

Auf der Registerkarte „Transient“ geben wir nun folgende Parameter ein:

Bei „Stop Time“ geben wir 1 ein. Das bedeutet, dass die Simulation 1 Sekunde lang andauert. Da uns außerdem der Einschwingvorgang interessiert, klicken wir die Option „Start external DC supply voltages at 0V“ an. Dadurch wird die Spannungsquelle zum Zeitpunkt 0 (Simulationsstart) von 0 auf +10V gesetzt. Diesen Sprung differenziert die Schaltung aus C1 und R1.

Diese Parameterwahl wird im unteren Anzeigefeld als Spice-Kommando folgendermaßen dargestellt:

```
.tran 1 startup
```

Die Parametereingabe beenden wir durch Anklicken der Taste „OK“. Dann erscheint ein Rechteck mit schwarzem Rahmen, darin enthalten ist das vollständige Spice-Kommando. Dieses Rechteck platzieren wir unterhalb unseres Schaltplanes, dort erscheint dann das Spice-Kommando als Text.

1.2.3. Durchführung der Simulation



Die Simulation starten wir nun durch Anklicken des Symbols „Run“ oder durch Wahl des Menüpunktes *Simulate* ⇒ *Run*.

Es öffnet sich ein neues Fenster mit einem auf unsere eingegebenen Werte bezogenen Koordinatensystem, in dem alle darstellbaren Ströme, Spannungen, Leistungen und sonstigen Messwerte grafisch angezeigt werden können. Gleichzeitig entstehen neue Dateien:

- eine *RAW-Datei* – diese enthält die grafischen Darstellungen der Simulation (Spannungs- und Stromverläufe, Frequenzverlauf u.a.)
- eine *LOG-Datei* – dies ist eine einfache Textdatei, in der die Werte der anzuzeigenden Größen (Spannungen, Ströme, Frequenzen, Bandbreite u.a.) enthalten sind

Wenn wir nun den Mauszeiger über die Schaltung bewegen, nimmt er verschiedene Formen an:

- eine Mess-Spitze für Spannungsmessung
- eine Stromzange für Strommessung
- ein Thermometer für Leistungsmessung



Abbildung 7: Formen des Mauszeigers

Wir können also

- über Leitungen entweder Spannung oder Strom messen
- über Bauteilen entweder Strom oder Leistung messen

Die Umschaltung zwischen den Messmöglichkeiten erfolgt über die Taste „ALT“.

Jeder Klick an einem Spannungs-, Strom- oder Leistungsmesspunkt innerhalb des Schaltplanes erzeugt eine entsprechende Kurve im Koordinatensystem. Natürlich sind auch mehrere Kurven zugleich darstellbar. In Verbindung mit der Taste „STRG“ lassen sich auch einzelne Kurven entfernen bzw. hinzufügen. Zur besseren Unterscheidung werden die Kurven in verschiedenen Farben dargestellt.

Wir klicken nun nacheinander die entsprechenden Stellen im Schaltplan an, um $V(out)$, $V(in)$ sowie die Ströme durch den Kondensator $I(C1)$ und die Spannungsquelle $I(V1)$ anzuzeigen. Dabei erhalten wir folgende Darstellung:

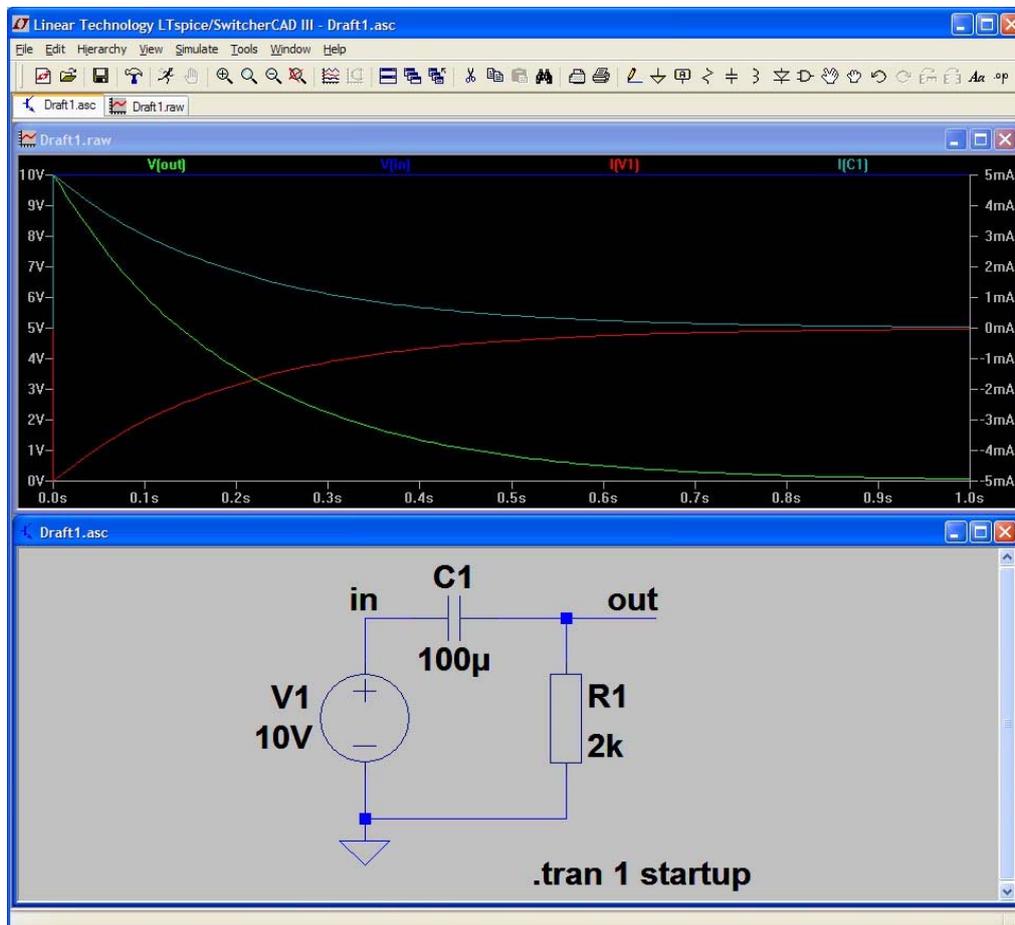


Abbildung 8: Resultierende Kurvendarstellung bei transienter Simulation

Einzelne Kurven lassen sich auch folgendermaßen entfernen: wir aktivieren das Fenster, in dem die Kurven dargestellt sind und drücken dann die Taste „Entf“. Die Cursorform wird zu einer Schere. Mit dieser Schere zeigen wir auf den Namen der zu entfernenden Kurve am oberen Fensterrand und klicken dann mit links.

Um den Spannungsverlauf genauer zu untersuchen, bewegen wir den Mauscursor auf den Namen im Bild über dem Diagramm der zu untersuchenden Größe (hier V(out)). Sobald aus dem Cursor eine weiße Hand wird, klicken wir mit links. Es erscheint ein Fadenkreuz und ein neues Fenster, in dem die x- und y-Werte dieses Fadenkreuzes angegeben werden. Klicken wir nun in der Nähe des Fadenkreuzes mit der linken Maustaste (der Cursor der Maus wird zu einer „I“) und halten diese gedrückt, so können wir das Fadenkreuz entlang des Graphen verschieben und die Werte an den einzelnen Stellen ablesen (siehe nachfolgende Darstellung).

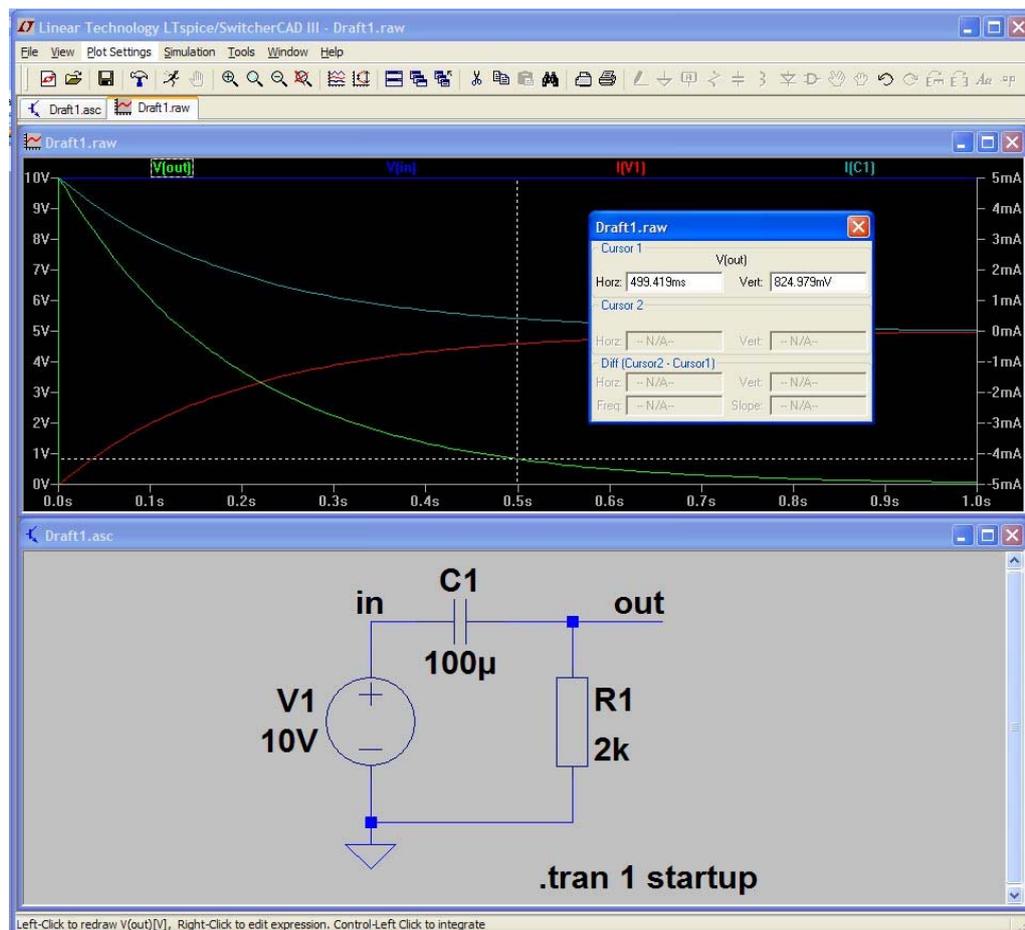


Abbildung 9: Einblenden eines Fadenkreuzes und von Anzeigewerten

Wenn man einen Strom- oder Spannungsverlauf mit falschem Vorzeichen im Signal-Zeitverlauf feststellt, ist das Bauteil mit dem falschen Stromvorzeichen verkehrt herum eingebaut. Dies ist ein Fehlverhalten von LTspice IV. Es stellt nämlich einen Strom, der in einen definierten Bauteileanschluss hineinfließt, immer positiv dar, auch wenn der Bauteileanschluss optisch nicht erkennbar ist. Zur Abhilfe dreht man dann das Bauteil einfach um 180 Grad.



In unserer Schaltung muss z.B. der Strom durch den Kondensator zum Zeitpunkt 0 auf +5mA springen und anschließend nach einer e-Funktion abklingen. Springt er dagegen von 0mA auf -5mA, ist C1 verpolt.

Werden bei der Darstellung von zwei Signal-Zeitverläufen beide Signale direkt übereinander dargestellt, so sieht man nur einen Zeitverlauf. Dies kann man ändern, indem man die Skalierung einer der beiden Signalachsen ändert. Dazu bewegt man den Mauscursor auf die linke vertikale Achse mit den Spannungswerten, bis ein kleines Lineal am Cursor erscheint. Nun klickt man rechts und wählt den Menüpunkt „*Manual Limits*“ aus. Dann ändert man den Wert unter „*Top*“ z.B. in 15V. Es erscheinen nun die beiden verschiedenfarbigen Achsen für Strom und Spannung.

Wir können Graphen auch nach folgender Methode darstellen: wir klicken mit der rechten Maustaste auf eine leere Stelle im Graphen-Fenster und wählen „*Add Trace*“ oder klicken im Menü auf *Plot Settings* ⇒ *Add Trace*.

In dem sich nun öffnenden Fenster wählen wir nun einen der angezeigten Werte, z.B. $I(R1)$ und klicken auf Taste „*OK*“.

Ein Vorteil dieser Methode besteht darin, dass man im Eingabefeld am unteren Rand von *Add Trace* auch Größen, die nicht direkt auswählbar sind, eingeben kann. Wenn man z.B. bei älteren Programmversionen die Leistung am Widerstand anzeigen wollte, konnte man dort direkt die Berechnungsformel $V(out) * I(R1)$ eingeben.

In den neueren Programmversionen ist die Leistungsanzeige mittlerweile direkt eingebaut, aber es gibt sicher noch andere Anzeigewerte, deren Anzeige nur durch eigene Formeleingabe möglich ist.

1.2.4. Einbinden eines neuen Bauteiles

Obwohl LTspice IV bereits eine große Auswahl gängiger Bauelemente beinhaltet, ist es oft erforderlich, weitere Bauteile mit ihren Kerndaten einzubinden. Dies geschieht mit Hilfe von Textdateien, die in ihrem Aufbau einer SPICE-Modelldatei entsprechen und das Verhalten eines Bauteiles beschreiben. Diese Textdateien kann man selbst erstellen, man erhält sie aber auch schon fertig konfiguriert im Internet. Das Einbinden erfolgt über ein Spice-Kommando (diese Kommandos werden in einem nachfolgenden Abschnitt noch ausführlicher erklärt. An dieser Stelle wollen wir uns auf das Einbinden neuer Bauteile beschränken).

Wir nehmen nun folgenden Fall an: wir wollen eine Schaltung mit dem CMOS-Operationsverstärker OPA336 aufbauen. In den Schaltplan haben wir zu diesem Zweck das OP-Symbol „opamp2“ eingezeichnet. Da der OPA336 aber nicht in der Grundausstattung von LTspice IV enthalten ist, besorgen wir uns die passende Modelldatei *OPA336.mod* aus dem Internet und kopieren sie in den aktuellen Projekteordner. Dann klicken wir auf den Menüpunkt „*Edit ⇒ SPICE Directive*“. Es öffnet sich ein Fenster mit einem Eingabefeld. Hier geben wir folgendes Einfügekommmando ein:

```
.inc OPA336.mod
```

Die *.inc*-Funktion (...steht für Include) ermöglicht also das Einbinden von SPICE-Modellen oder von kompletten Spice-Bibliotheken (Sammlungen mehrerer Modelle), welche im Lieferumfang von LTspice IV nicht enthalten sind.

Nun müssen wir unserem eingezeichneten OP-Symbol noch die OP336-Modelldatei zuweisen. Dazu gehen wir folgendermaßen vor:

1. mit der rechten Maustaste klicken wir auf das OP-Symbol, es öffnet sich das Änderungsmenü
2. in der Spalte „Attribute“ klicken wir auf „*SpiceModel*“, es öffnet sich das Fenster aus Abbildung 10
3. Im Feld „*SpiceModel*=“ geben wir ein: *OPA336*
4. Das Optionskästchen „*Visible*“ lassen wir frei, d.h. das Spice-Modell erscheint nicht mit Namen im Schaltplan.
5. in der Spalte „Attribute“ klicken wir auf „*Value*“
6. Im Feld „*Value*=“ geben wir ein: *OPA336*
7. Bei „*Visible*“ setzen wir jetzt einen Haken durch anklicken => der Text aus dem Feld „*Value*“ erscheint dann im Schaltplan

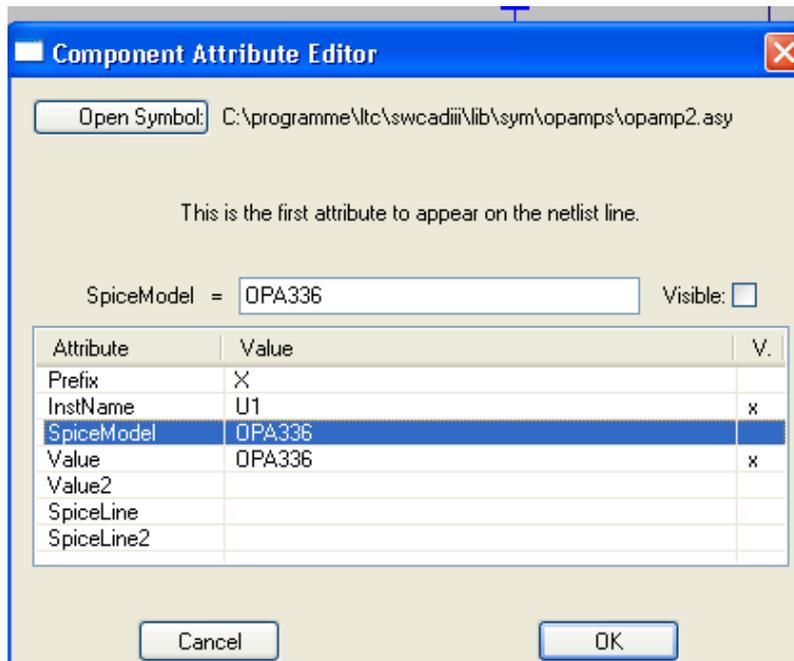


Abbildung 10: Menue zum Ändern von OP-Parametern nach Anklicken von Attribute „SpiceModel“

1.2.5. Zusammenfassung

Neuen Schaltplan anlegen:

- *File* ⇒ *New Schematic* auswählen
- oder das Symbol am linken Rand der Symbolleiste anklicken

Bauelemente auswählen:

- R, L, C, Diode und das Ground-Symbol kann man direkt anklicken
- Durch Anklicken des Symbols Component öffnet sich ein Auswahlfenster, hier kann man zahlreiche weitere Komponenten auswählen
- R, L, C, Diode und Component erreicht man auch über den Hauptmenuepunkt *Edit*

Bauelemente oder Symbole platzieren, verschieben, drehen, spiegeln:

- Das am Cursor „hängende“ Bauelement einfach zur gewünschten Stelle bewegen und dann links klicken
- Bauelement vor dem Platzieren drehen: *Strg-R* eingeben
- Bauelement vor dem Platzieren spiegeln: *Strg-E* eingeben
- Mehrere Platzierungen hintereinander sind möglich
- *Move (F7)* und *Drag (F8)* verschieben bereits vorhandene Elemente, bei Drag werden die Verbindungsleitungen mitgezogen

Bauelemente mit Leitungen (Wire) verbinden:

- Wiresymbol anklicken – dann im Schaltplan durch Klicken einfach einen Leitungsstrang einfügen.
- Rechtsklick beendet den Strang, man kann dann an einem neuen Startpunkt eine weitere Leitung beginnen.
- Startet oder beendet man eine Leitung auf einer bereits bestehenden Leitung, werden diese Leitungen verbunden (Knotenpunkt).
- Die Taste „ESC“ beendet den Wire-Modus.
- Alle Bauelemente müssen an ihren Enden innerhalb der Schaltung angeschlossen sein.

Ground-Symbol verwenden:

- Mindestens ein Punkt innerhalb der Schaltung muss mit dem Ground-Symbol (Masse) verbunden sein.

Namen und Werte von Bauelementen zuweisen bzw. ändern:

- Cursor auf dem Symbol platzieren und Rechtsklick: Eigenschaften ändern
- Cursor auf dem Namen platzieren und Rechtsklick: Name ändern
- Cursor auf dem Wert platzieren und Rechtsklick: Wert ändern

Eingabe von Bauelementewerten:

Suffix	f	p	n	u (=μ)	m	k	Meg	G	T
Name	Femto	Pico	Nano	Mikro	Milli	Kilo	Mega	Giga	Tera
Wert	10 ⁻¹⁵	10 ⁻¹²	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶	10 ⁻³	10 ³	10 ⁶	10 ⁹	10 ¹²

WICHTIG:

- Zahlen nur mit Dezimalpunkt eingeben (kein Komma)
- Skalierfaktoren direkt hinter den Wert schreiben (ohne Leerzeichen)
- Milli (m) und Mega (meg) nicht verwechseln
- Groß- oder Kleinschreibung ... beides ist zulässig

**Bearbeitungsschritte rückgängig machen bzw. wiederherstellen:**

- *Undo (F9)* = rückgängig machen, mehrere Schritte sind möglich
- *Redo (Shift-F9)* = wiederherstellen, mehrere Schritte sind möglich

Elemente löschen:

- Scherensymbol wählen, dann zu löschende Elemente nacheinander mit dem Cursor anklicken, die Taste „ESC“ beendet den Löschmodus

Knotenpunkte oder Ein- und Ausgänge mit einem Namen versehen:

Das Symbol „Label Net“ anklicken – es öffnet sich ein Fenster, in dem man im Feld ABC eine Bezeichnung eingeben kann. Dann „OK“ anklicken, die Bezeichnung erscheint jetzt in einem kleinen Rechteck, das man an den gewünschten Knoten anhängt. Sobald ein Knoten so gekennzeichnet ist, kann man sich z.B. später den Spannungsverlauf an dieser Stelle anschauen.

Simulationsmodus auswählen:

Simulationsart auswählen über *Simulate* ⇔ *Edit Simulation Cmd.* Folgende Simulationsarten stehen zur Verfügung:

- Transient Modus für *zeitabhängige Vorgänge*, z.B. für das Einschwingverhalten einer Schaltung
- AC Analysis Modus für Frequenzgänge (*Bode-Diagramme* mit Amplituden- und Phasengang)
- DC sweep Modus zur Ermittlung *statischer Kennlinien*
- Noise
- DC Transfer
- DC op pnt Modus zur *Arbeitspunktberechnung* (DC operating point)

Für die Laborversuche der Analogelektronik benötigen wir die Simulationsarten Transient, AC Analysis und DC op pnt.

Nach Auswahl der Simulationsart bestimmt man die zugehörigen Parameter.

Simulation starten und Ergebnisse darstellen:

Die Simulation startet man über *Simulate* \Rightarrow *Run* oder über das Symbol „*Run*“. Daraufhin öffnet sich ein Fenster zur grafischen Darstellung der Messwerte. Die Auswahl der Messwerte erfolgt durch Anklicken der gewünschten Messpunkte innerhalb der Schaltung und die Auswahl von Strom, Spannung oder Leistung (Wechsel über die Taste „*ALT*“).

Aktionen im Fenster der grafischen Darstellung:

Im Fenster der grafischen Darstellung mit rechts klicken \Rightarrow man erhält ein Auswahlmeneue mit zahlreichen Aktionen.

Cursor über eine Messwertbezeichnung bewegen \Rightarrow Cursor wird zur Hand.
Ein Linksklick erzeugt nun ein Fadenkreuz und ein Fenster, welches die x- und y-Werte des Messwertes anzeigt. Das Fadenkreuz kann entlang der Messwertekurve verschoben werden, die zugehörigen Werte werden exakt angezeigt.

Cursor über die X- oder Y-Achse bewegen \Rightarrow Cursor wird zu einem Kamm.
Ein Linksklick öffnet ein Fenster, in dem man die Achsenskalierung ändern kann.

LTspice IV-Dateitypen:

- *ASC-Datei* - dies ist eine einfache Textdatei, in der alle Daten zur Darstellung des Schaltplanes enthalten sind
- *RAW-Datei* – diese enthält grafische Darstellungen der Simulation (Spannungs- und Stromverläufe, Frequenzverlauf u.a.)
- *LOG-Datei* - dies ist eine einfache Textdatei, in der die Werte der anzuzeigenden Größen (Spannungen, Ströme, Frequenzen, Bandbreite u.a.) enthalten sind
- *MOD-Datei* – einfache Textdatei, deren Inhalt das elektrische Verhalten eines Bauteiles beschreibt.

1.3. Daten der Standardbauelemente

Bei den Standardbauelementen von LTspice IV (Widerstand, Spule, Kondensator) lassen sich noch weitere spezifische Daten angeben. Dazu klicken sie einfach mit der rechten Maustaste auf das Bauelement. Daraufhin öffnet sich ein Fenster mit weiteren Eingabemöglichkeiten. Im folgenden Abschnitt wollen wir kurz auf diese eingehen.

1.3.1. Der Widerstand

Folgende Daten können für einen Widerstand angegeben werden:

Resistance:	Widerstandswert in Ohm
Tolerance:	Toleranz des Widerstandswertes in %
Power Rating:	Nennleistung in Watt

1.3.2. Der Kondensator

In LTspice IV wird ein Kondensator mit folgendem Ersatzschaltbild simuliert:

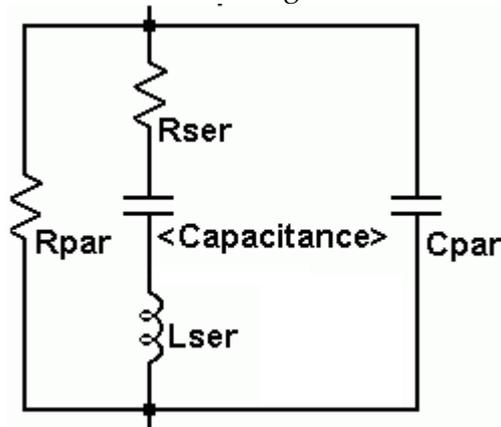


Abbildung 11: Ersatzschaltbild (ESB) eines Kondensators in LTspice IV

Folgende Daten können für einen Kondensator angegeben werden:

Capacitance:	Kapazität in F (entspricht <Capacitance> im ESB)
Voltage Rating:	Spannungsbelastbarkeit in V
RMS Current Rating:	Effektivstrombelastbarkeit in A
Equiv. Series Resistance:	Rser (siehe ESB) in Ω
Equiv. Series Inductance:	Lser (siehe ESB) in H

Equiv. Parallel Resistance:	R_{par} (siehe ESB) in Ω
Equiv. Parallel Capacitance:	C_{par} (siehe ESB) in F
Mean Time between Failures:	mittlere störungsfreie Zeit in Stunden
Parts per Package:	Teile pro Gehäuse

Werden R_{ser} , R_{par} , C_{par} und L_{ser} nicht angegeben, so benutzt LTspice IV folgende Standardwerte: $R_{ser} = 0 \Omega$, $R_{par} = \infty \Omega$, $C_{par} = 0 \text{ F}$, $L_{ser} = 0 \text{ H}$

1.3.3. Die Spule

In LTspice IV wird eine Spule mit folgendem Ersatzschaltbild simuliert:

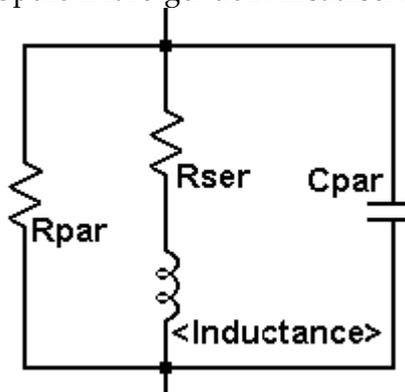


Abbildung 12: Ersatzschaltbild (ESB) einer Spule in LTspice IV

Folgende Daten können für eine Spule angegeben werden:

Inductance:	Induktivität in H (entspricht <Inductance> im ESB)
Peak Current:	Basis Spitzenstrom in A
Series Resistance:	R_{ser} (siehe ESB) in Ω
Parallel Resistance:	R_{par} (siehe ESB) in Ω
Parallel Capacitance:	C_{par} (siehe ESB) in F

Werden R_{ser} , R_{par} und C_{par} nicht angegeben, so benutzt LTspice IV folgende Standardwerte: $R_{ser} = 1 \text{ m}\Omega$, $R_{par} = \infty \Omega$, $C_{par} = 0 \text{ F}$

1.4. Strom- und Spannungsquellen

Für die verschiedenen Simulationsarten benötigen wir verschiedene Spannungsquellen. In diesem Kapitel beschränken wir uns nur auf die Strom- und Spannungsquellen in der Transient Analyse, da man hierfür verschiedene Funktionen von Spannungen nutzen kann (z.B. Sinus, Puls usw.) die auch noch weitere Parameter besitzen. Dabei beziehen wir uns hier nur auf die Spannungsquellen. Bei den Stromquellen verhält es sich analog.

Klickt man mit der rechten Maustaste auf die Spannungsquelle, öffnet sich ein Fenster, in dem man einen DC-Wert eingeben kann. Klickt man hier auf „Advanced“, gelangt man in ein Fenster, in dem man die Art der Spannungsquelle (Pulsquelle, Sinusquelle u.a.) und die zugehörigen Parameter einstellen kann.

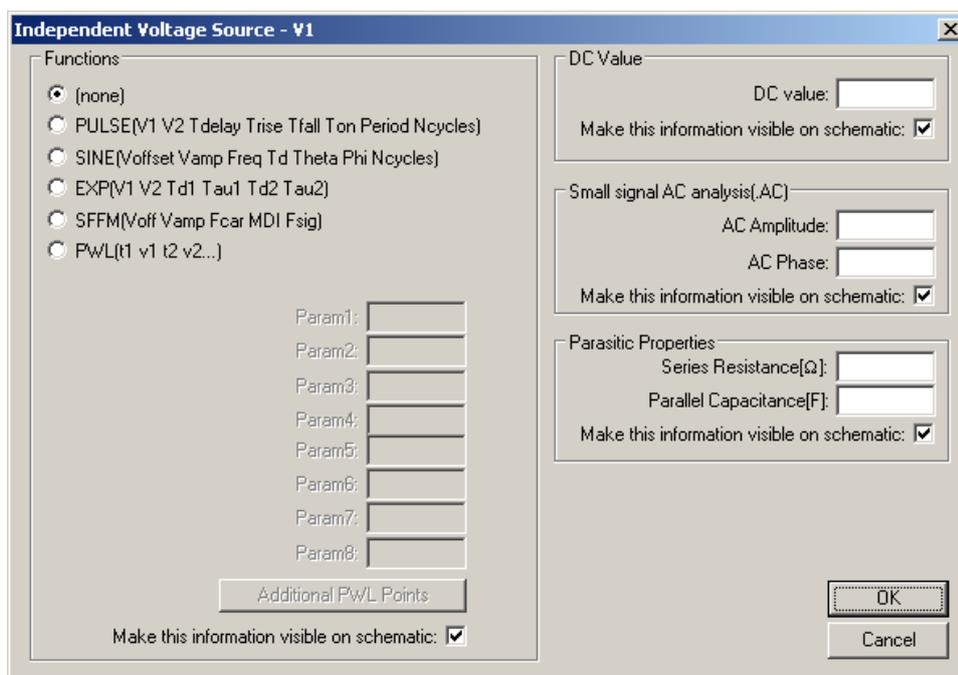


Abbildung 13: Menue der Spannungsquellen

Im Folgenden werden die einzelnen Arten der Spannungsquellen und ihre Parameter beschrieben. Bei den Spannungswerten handelt es sich immer um den Scheitelwert.

1.4.1. Die Pulsquelle (PULSE)

Mit einer Pulsquelle kann man rechteck- oder trapezförmige periodische Signale erzeugen.

Bedeutung der Bezeichnungen:

Vinitial[V]:	Spannungswert für „Off“
Von[V]:	Spannungswert für „On“
Tdelay[s]:	Wartezeit ab Anfang, bis das Signal beginnt (Spannung hat dabei den Wert von Vinitial)
Trise[s]:	Anstiegszeit
Tfall[s]:	Abfallszeit
Ton[s]:	Dauer des Spannungswertes „On“
Tperiode[s]:	Gesamtperiodendauer
Ncycles:	Anzahl der Perioden (für unendlich diesen Wert auslassen)

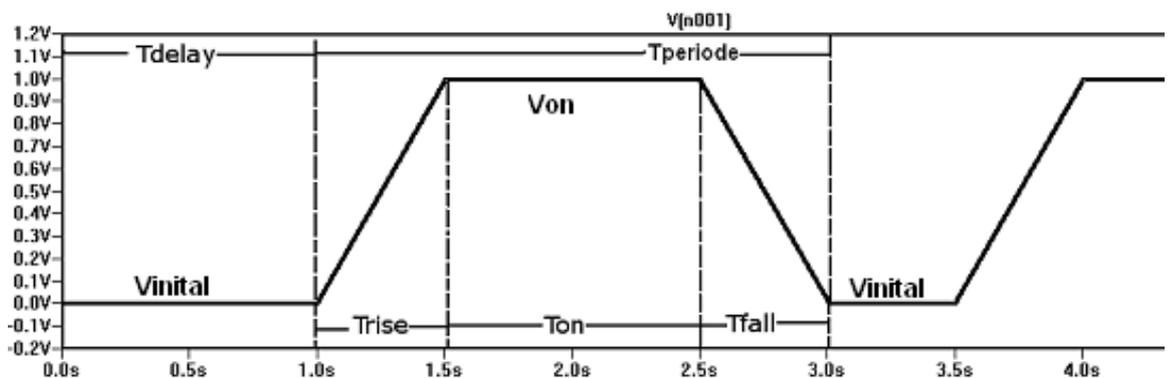


Abbildung 14: Beispiel für Pulse mit Vinitial=0; Von=1; Tdelay=1; Trise=0.5; Tfall=0.5, Ton=1; Tperiode=2.5

1.4.2. Die Sinusquelle (SINE)

Mit der Sinusquelle erzeugt man ein sinusförmiges Signal. Das Signal kann über der Zeit nach einer e-Funktion abklingen.

Bedeutung der Bezeichnungen:

DC offset[V]:	Gleichanteil
Amplitude[V]:	Amplitude (Scheitelwert)
Freq[Hz]:	Frequenz
Tdelay[s]:	Wartezeit ab Anfang, bis das Signal beginnt
Theta[1/s]:	Dämpfungsfaktor (Amplitude klingt mit $e^{-\text{Theta} \cdot t}$ ab)
Phi[deg]:	Phasenverschiebung
Ncycles:	Anzahl der Perioden

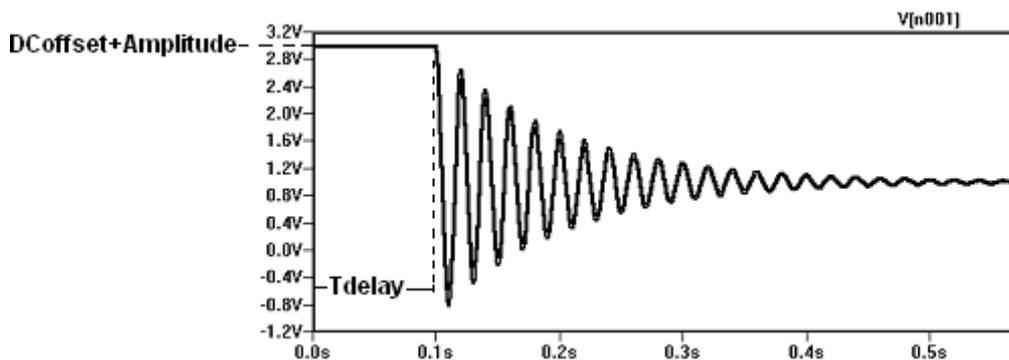


Abbildung 15: Beispiel für Sine mit DCoffset=1; Amplitude=2; Freq=50; Tdelay=0.1; Theta=10; Phi=90

1.4.3. Die Exponentialquelle (EXP)

Eine Exponentialquelle besitzt einen Signalverlauf nach der e-Funktion.

Bedeutung der Bezeichnungen:

- Vinitial[V]: Anfangswert der Spannung
- Vpulsed[V]: Endwert der Spannung
- Rise Delay[s]: Wartezeit ab Anfang, bis die ansteigende e-Funktion beginnt
- Rise Tau[s]: Tau der ansteigenden e-Funktion
- Fall Delay[s]: Wartezeit ab Anfang, bis die abklingende e-Funktion beginnt
- Fall Tay[s]: Tau der abfallenden e-Funktion

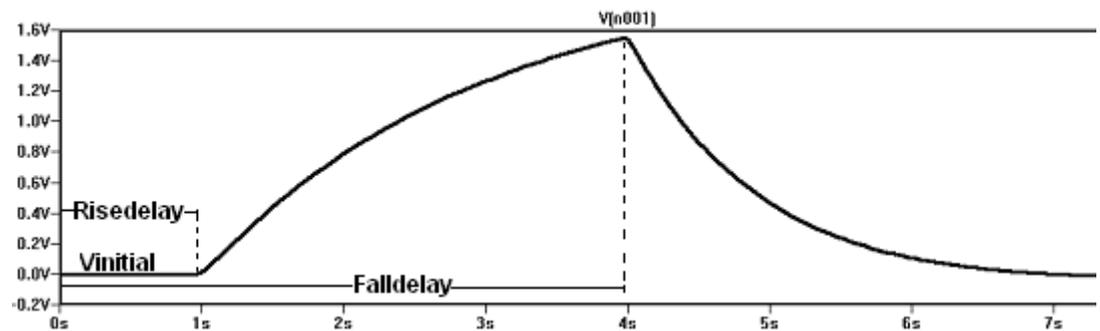


Abbildung 16: Beispiel für Exp mit Vinitial=0; Vpulsed=2; Rise Delay=1; Rise Tau=2; Fall Delay=4; Fall Tau=1

1.4.4. Die Frequenzmodulationsquelle (SFFM)

Bei der SFFM Quelle handelt es sich um eine Signal Frequency Frequency Modulation. Dabei wird eine sinusförmige Trägerspannung mit einer weiteren sinusförmigen Spannung mit geringerer Frequenz moduliert. Die Spannung verläuft dabei nach folgender Funktion:

$$V_{\text{SFFM}} = \text{DCoffset} + \text{Amplitude} * \sin((2 * \text{PI} * \text{CarrierFreq} * t) + \text{ModulationIndex} * \sin(2 * \text{PI} * \text{SignalFreq} * t))$$

Bedeutung der Bezeichnungen:

DC offset[V]:	Gleichanteil
Amplitude[V]:	Amplitude des Trägers
Carrier Freq[Hz]:	Frequenz des Trägers
Modulation Index:	Modulationsindex
Signal Freq[Hz]:	Frequenz des Signals

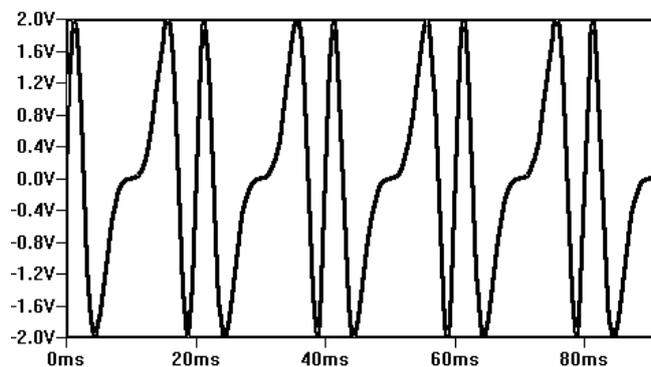


Abbildung 17: Beispiel für SFFM mit DC offset=0; Amplitude=2; Carrier Freq=100;
Modulation Index=2; Signal Freq=50

1.4.5. Die PWL-Quelle (PWL)

Bei der PWL-Funktion (PWL = Piece Wise Linear Points) können mehrere Spannungswerte bei gewünschten Zeitpunkten angegeben werden. Zwischen den verschiedenen Punkten wird dann eine Gerade gezogen.

Bedeutung der Bezeichnungen:

time1[s]:	Zeitpunkt1
value1[V]:	Spannungswert im Zeitpunkt1
...	
time4[s]:	Zeitpunkt4
value4[V]:	Spannungswert im Zeitpunkt4

Mit Hilfe des Buttons „*Additional PWL Points*“ können weitere Punkte angegeben werden.

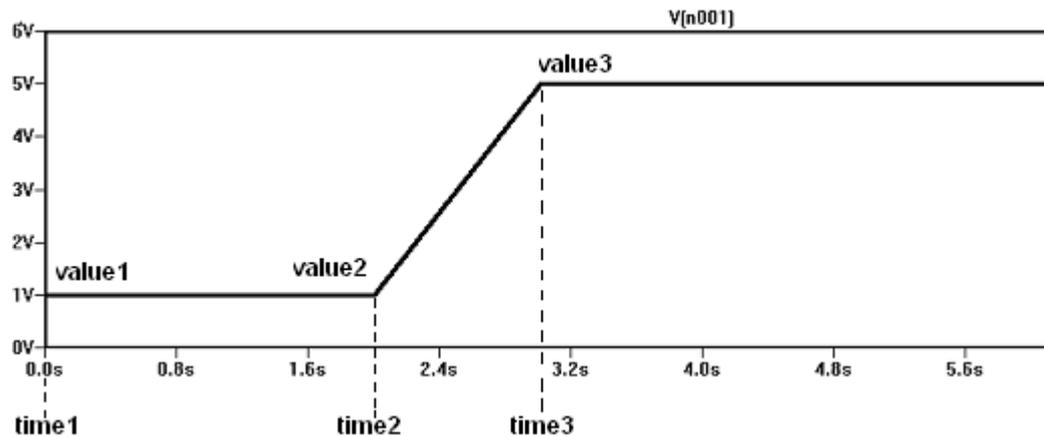


Abbildung 18: Beispiel für PWL mit time1=0; value1=1; time2=2; value2=1; time3=3; value3=5

1.5. Simulationsarten

Die verschiedenen Simulationsarten erreicht man unter dem Hauptmenuepunkt *Simulate* \Rightarrow *Edit Simulation Cmd.* Auf den Registerkarten der einzelnen Simulationsarten sind zahlreiche Parameter einstellbar, die nachfolgend vorgestellt werden.

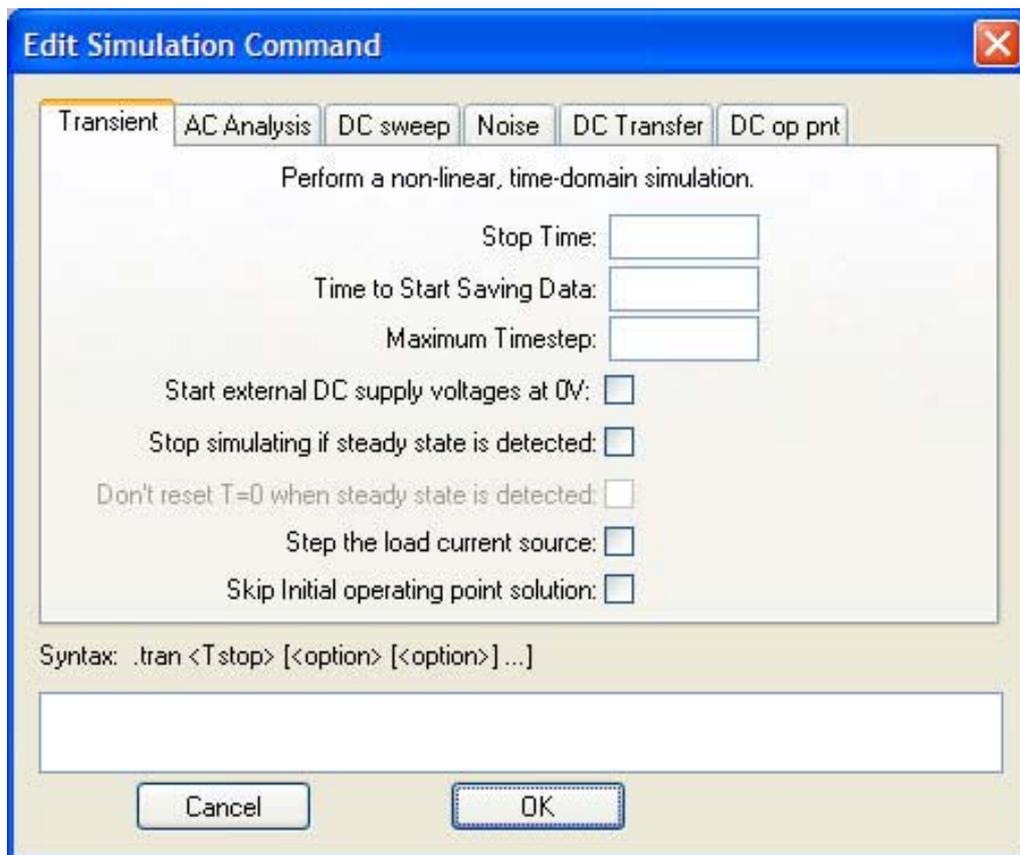


Abbildung 19: Fenster zur Auswahl der verschiedenen Simulationsarten

1.5.1. Transientenanalyse

Die Transientenanalyse dient zur Untersuchung von Einschwingvorgängen oder zeitabhängiger elektrischer Vorgänge (z.B. Laden und Entladen eines Kondensators).

Die wichtigsten Einstellungen der Transientenanalyse sind:

- Stop Time:** Zeitpunkt, zu dem die Simulation beendet werden soll.
- Time to Start Saving Data:** Zeitpunkt, ab dem die Simulation die Daten anzeigen soll. Dadurch lassen sich z.B. Einschwingvorgänge ausblenden (Default = 0).
- Maximum Timestep:** Max. Zeit zwischen den einzelnen berechneten Werten (wird nichts eingetragen, nutzt das Programm einen automatisch eingestellten Wert).
- Start external DC supply voltages at 0V:** hier ein Häkchen setzen, damit die Spannungsquelle bei Simulationsstart eingeschaltet wird. Dies ermöglicht ein praxisnahes sprungförmiges Verhalten der Versorgungsspannung.

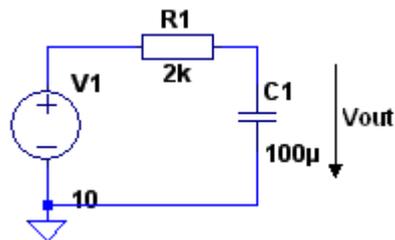


Abbildung 20: Schaltungsbeispiel

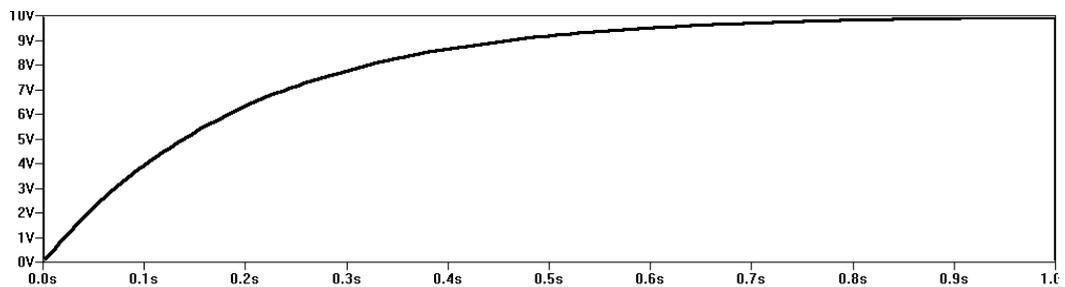


Abbildung 21: Beispiel des Spannungsverlaufs an C1 bei einer Transient-Simulation

1.5.2. AC Analyse

Die AC-Analyse ist die Kleinsignal-Wechselstrom-Analyse, der Standardmodus zur Berechnung von Frequenzgängen (Bode-Diagramme). Dabei ist wichtig, dass eine vorhandene Spannungs- oder Stromquelle in ihrer Frequenz veränderlich ist, also auf AC eingestellt ist (durch Rechtsklick auf die vorhandene Quelle und auswählen von „Advanced“ kann man nun im folgenden Fenster unter dem Punkt „small signal AC analysis“ die Amplitude und die Phase angeben).

Die wichtigsten Einstellungen der AC-Analyse sind:

<i>Type of Sweep:</i>	Art des Durchlaufs (Octave, Decade, Linear, List) der hier gewählte Typ erscheint auch unten (Number of points)
<i>Number of points per Octave:</i>	Anzahl der zu berechnenden Stellen pro Oktave (Frequenzabstand 1:2)
<i>Number of points per Decade:</i>	Anzahl der zu berechnenden Stellen pro Decade (Frequenzabstand 1:10)
<i>Number of points per Linear:</i>	Anzahl der zu berechnenden Stellen zwischen Start- und Stop-Frequenz
<i>Start/ Stop Frequency:</i>	Anfangs- bzw. Endfrequenz der Frequenzganganalyse

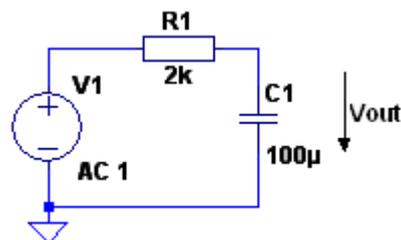


Abbildung 22: Schaltungsbeispiel

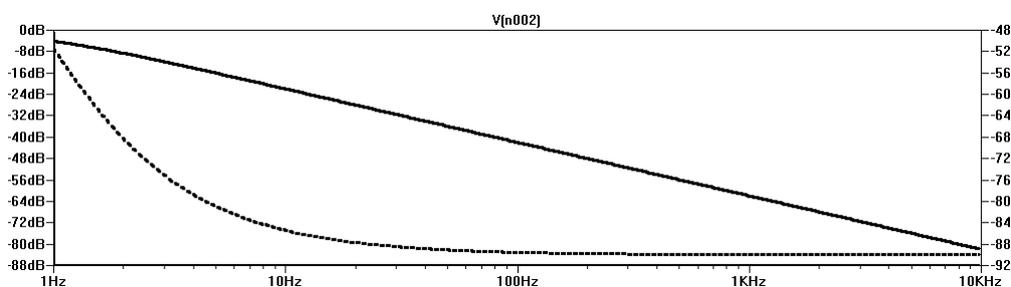


Abbildung 23: AC-Analyse mit Amplituden- und Phasengang (Punktlinie)

Typische Werte für Bodediagramme:

Type of Sweep = Decade und Number of Points per Decade = 20 bis 50

Wählt man Type of Sweep = List, muss man in der Befehlszeile unten im Menu eine Liste von diskreten Simulationsfrequenzen angeben, bei welchen die Übertragungsfunktion der Schaltung berechnet wird.

Beispiel: .ac list 1k 2k 3k 4k

1.5.3. DC Sweep

Der DC Sweep gibt ihnen die Möglichkeit, die Spannung bzw. den Strom einzelner Quellen von einem Start- zu einem Endwert zu ändern und dann die einzelnen Ergebnisse anzuzeigen. Dies ist auch für mehrere Quellen (bis zu drei) möglich. So lässt sich z.B. die Kennlinie eines Transistors anzeigen (siehe dazu die bei LTspice IV mitgelieferte Beispieldatei „curvetrace.asc“).

Die wichtigsten Einstellungen des DC Sweep sind:

- Name of Source to Sweep: Name der Strom / Spannungsquelle
- Type of Sweep: Art des Durchlaufs (Octave, Decade, Linear, List)
- Start/Stop Value: Start- bzw. Endwert
- Increment: Erhöhung des Stroms bzw. der Spannung pro Schritt

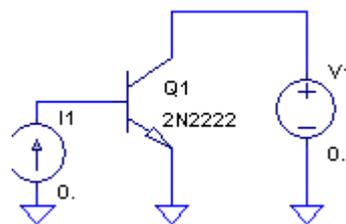


Abbildung 24: Schaltungsbeispiel

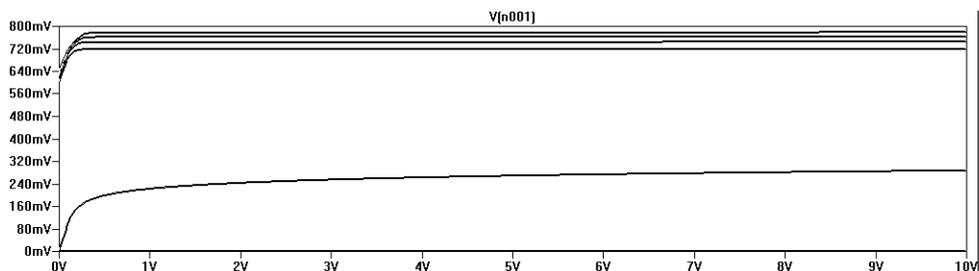


Abbildung 25: DC-Analyse, bei der I1 und V1 per DC Sweep geändert werden

1.5.4. Die Gleichstrom-Arbeitspunktanalyse (DC op pnt)

Die „DC op pnt“ Simulation (DC operating point) dient zur Ermittlung des Arbeitspunktes einer Schaltung. Dies ist vor allem bei Schaltungen mit Transistoren, Operationsverstärkern usw. sehr hilfreich. Nachdem die Simulation durchgeführt ist, wird ein Fenster mit allen ermittelten Strömen und Spannungen angezeigt. Außerdem kann man direkt im Schaltbild durch einfaches darüberbewegen des Mauscurors die Spannungen und Ströme ermitteln. Diese werden unten in der Statusleiste angezeigt.

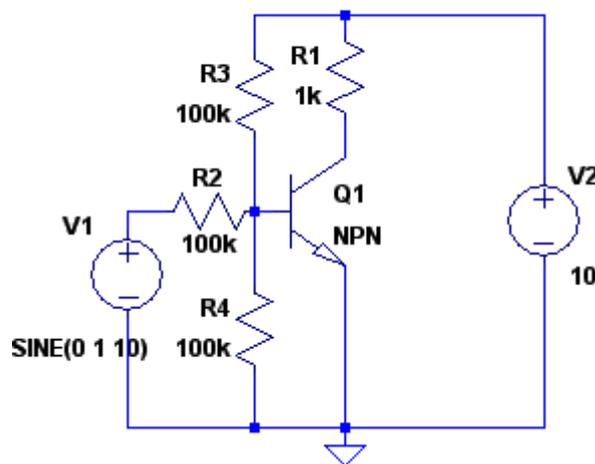


Abbildung 26: Schaltungsbeispiel

```

* C:\ELEK\SWCADIII\examples\Educational\Draft2.asc
--- Operating Point ---
V(n004):      2.47925      voltage
V(n003):      0.826418    voltage
V(n001):      0          voltage
V(n002):      10         voltage
Ic(Q1):       0.00752075  device_current
Ib(Q1):       7.52075e-005 device_current
Ie(Q1):       -0.00759596 device_current
I(R4):        -8.26418e-006 device_current
I(R3):        -9.17358e-005 device_current
I(R2):        8.26418e-006 device_current
I(R1):        -0.00752075  device_current
I(V2):        -0.00761248  device_current
I(V1):        8.26418e-006  device_current

```

Abbildung 27: Beispielausgabe bei der „DC op pnt“- Simulation

1.6. Spice-Kommandos



Spice-Kommandos sind Befehle, um besondere Funktionen auszuführen, z.B. Berechnungen mit Werten aus einem Diagramm. Um diese Befehle verwenden zu können, müssen sie als Spice Direktive in die Schaltung eingefügt werden. Alle folgenden Versuche zum Erläutern dieser Spice-Kommandos werden mit der Grundschaltung des nichtinvertierenden OP-Verstärkers durchgeführt.

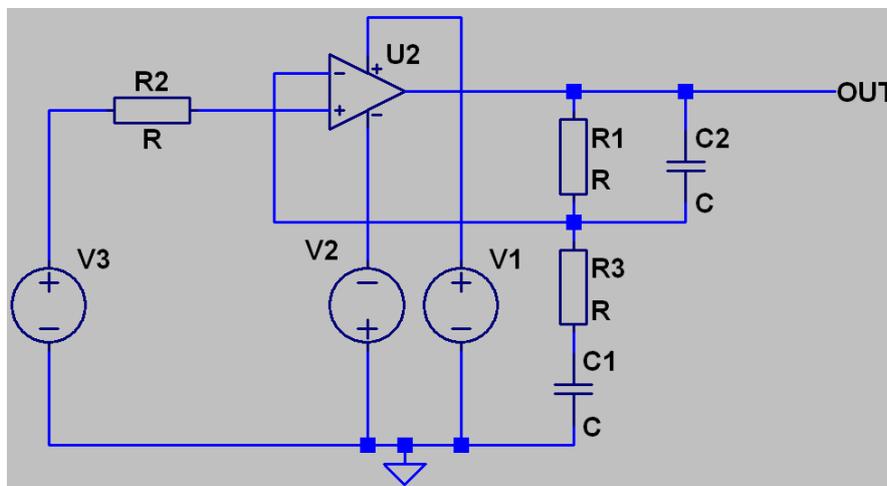


Abbildung 28: Schaltbild zu den Spice-Kommandos

Die Eingabe der Spice-Kommandos erfolgt durch Anklicken des Spice-Symbols oder durch Wahl des Menüpunktes „Edit ⇒ SPICE Directive“. In das nun erscheinende Fenster tippt man den Text einer Zeile ein. Am Zeilenende schaltet man bei Bedarf durch Drücken der Tasten „CTRL-M“ in die zweite oder weitere Zeilen um.

1.6.1. Ermittlung einzelner Messwerte

Die SPICE-Direktive „*MEASURE*“ dient dem Messen bestimmter nachfolgend erläuteter Messwerte.

1.6.1.1. Bandbreite im Frequenzgang (Bodediagramm) messen

Um die Bandbreite eines mit der AC-Analyse gemessenen Frequenzganges bestimmen zu können, geben wir folgendes in das Spice Kommandofenster ein:

```
.MEASURE tmp max mag(V(out))    => hier CTRL-M für nächste Zeile  
.MEASURE BW trig mag(V(out))=tmp/sqrt(2) rise=1 targ mag(V(out))=tmp/sqrt(2)  
fall=last
```

Die erste Zeile speichert in der Variablen tmp den Maximalwert des Ausgangssignals.

Die zweite Zeile speichert die Frequenzen, an denen der Ausgang jeweils den Wert [tmp/Wurzel(2)] erreicht (dies sind die Frequenzen bei -3dB).

Die errechnete Differenz ist die 3dB Bandbreite.

Das Ergebnis dieser Messung (also die Bandbreite und die zugehörigen Grenzfrequenzen) wird angezeigt durch Anwahl des Menüepunktes „*View* ⇔ *SPICE Error Log-Datei*“.

z.B.:

```
bw=101849 FROM 98.8481 TO 101948
```

In diesem Fall ist die Bandbreite 101849 Hz groß, die untere Grenzfrequenz liegt bei 98,8481 Hz, die obere Grenzfrequenz bei 101948 Hz (=101,948 kHz).

1.6.1.2. Einzelmesswerte aus der Transientenanalyse ermitteln

Um Messwerte aus den Signal-Zeitdiagrammen der Transientenanalyse anzuzeigen bzw. zu berechnen, verwendet man im Spice-Kommandofenster die Direktive „MEAS TRAN“.

Folgende Beispiele sollen dies verdeutlichen:

Beispiel 1: Spezielle Zeitpunkte (Nulldurchgangsmessung)

```
.MEAS TRAN zeit1 when V(out)=0 cross 100
```

Mit diesem Befehl wird bei der Transientenanalyse der Zeitpunkt des 100. Nulldurchganges der Spannung am Ausgang *out* in die Variable *zeit1* gespeichert.

Beispiel 2: Zeitdifferenzen (Periodendauermessung)

```
.MEAS TRAN Periode PARAM zeit2 - zeit1
```

Mit diesem Befehl wird bei der Transientenanalyse die Differenz der vorher mit einer anderen „MEAS TRAN“ berechneten Variablen *zeit2* und *zeit1* in die Variable *Periode* gespeichert.

Beispiel 3: Frequenzen

```
.MEAS TRAN Frequenz PARAM 1/(zeit2-zeit1)
```

Mit diesem Befehl wird bei der Transientenanalyse das Ergebnis der Funktion $\frac{1}{zeit2 - zeit1}$ in der Variable *Frequenz* gespeichert.



Alle Werte können, wie oben beschrieben, in der ErrorLog-Datei abgelesen werden. Weitere mögliche berechenbare Funktionen finden sie in der Hilfe-Datei unter dem Stichwort *Waveform Arithmetic*.

1.6.2. Ermittlung von Messreihen (Temperatur, Toleranzen)

Zur Ermittlung von Messreihen dient die Spice-Direktive „Step“. Bei diesem Verfahren wird ein oder mehrere Parameter schrittweise verändert und bei jedem Schritt die Schaltung neu simuliert. Im Diagramm sind anschließend alle Werte der verschiedenen Schritte abzulesen.

1.6.2.1. Temperaturgangmessung

Für viele elektronische Schaltungen wird in der Regel ein Temperaturbereich vorgegeben, innerhalb dessen Grenzen die Schaltung zuverlässig arbeitet. Zuvor ist es natürlich notwendig, eine Temperaturgangmessung durchzuführen, d.h. man testet die Schaltung bei verschiedenen Temperaturen auf korrekte Funktionsfähigkeit.

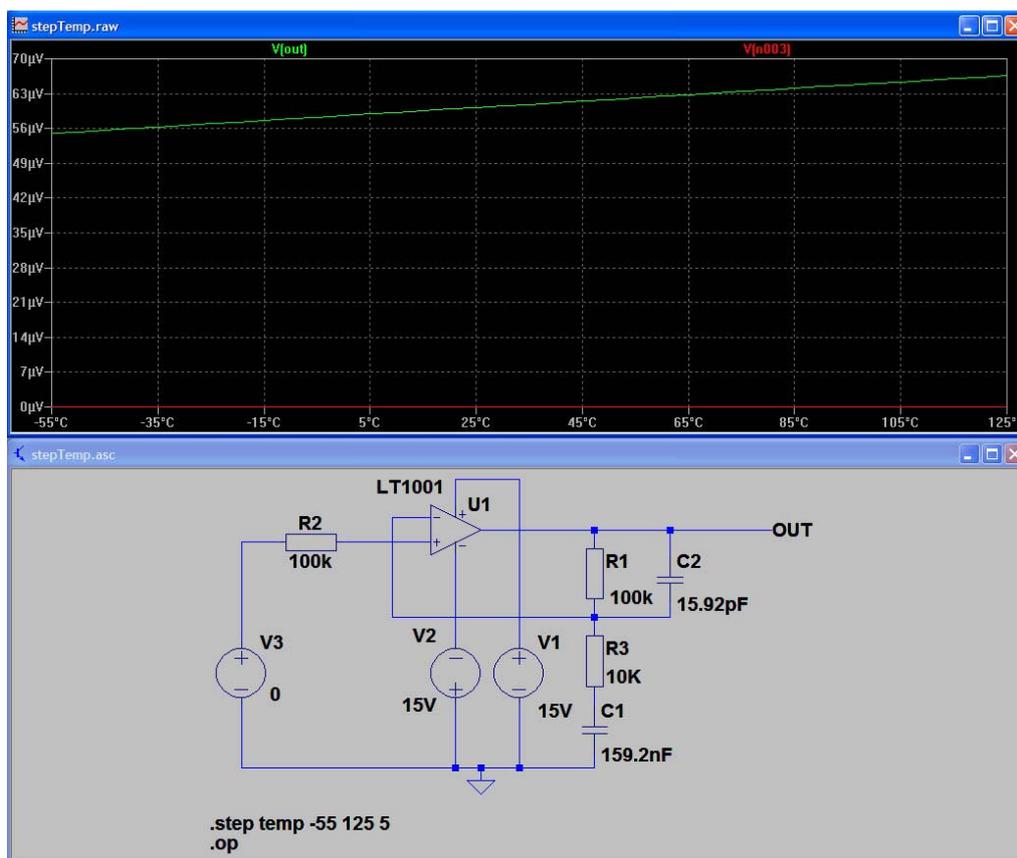


Abbildung 29: Temperaturgangmessung

Für eine simulierte Temperaturgangmessung unter LTspice IV gibt man im SPICE-Kommandofenster folgendes ein:

```
.step temp -55 125 5
```

Dadurch wird die Variable "temp", welche die aktuelle Umgebungstemperatur darstellt, zwischen -55°C und +125°C in Intervallen von 5°C variiert. Der Temperaturgang bezieht sich dabei auf die komplette Schaltung, daher muss er nicht für jedes Bauteil extra angegeben werden.

Für die signalgebende Spannungsquelle muss als Spannung 0V angegeben werden.

Als Analyseart wählt man „*op*“ (für operational point = Arbeitspunkt).

1.6.2.2. Bauteiltoleranzen berücksichtigen (Montecarlo-Analyse)

Sehr wichtig ist es auch, den Einfluss der Bauteiltoleranzen zu untersuchen. Um diese Toleranzen zu simulieren, gibt man folgende Anweisung über das Spice-Kommandofenster ein:

```
.step param a -0.1 0.1 0.05
```

Der Befehl ändert nacheinander den Parameter a von -0,1 bis +0,1 in Intervallen von 0,05.

Nun muss noch der Bauteilwert mithilfe des obigen Parameters „a“ variabel gemacht werden. Bei jedem Bauteil muss normalerweise der Bauteilwert, bei einem Widerstand z.B. 100 kΩ angegeben werden. In unserem Fall ersetzen wir den Wert durch eine Funktion. Diese Funktion muss in geschweiften Klammern angegeben werden.

z.B.: statt 100k => {100k * (1+a)}

Vorher hatte der Widerstand einen Wert von 100kΩ, jetzt hängt der Bauteilwert von der Funktion mit dem Parameter "a" ab.

Das Untersuchen dieses Verhaltens mit zufällig verteilten Werten nennt man Monte-Carlo-Analyse.

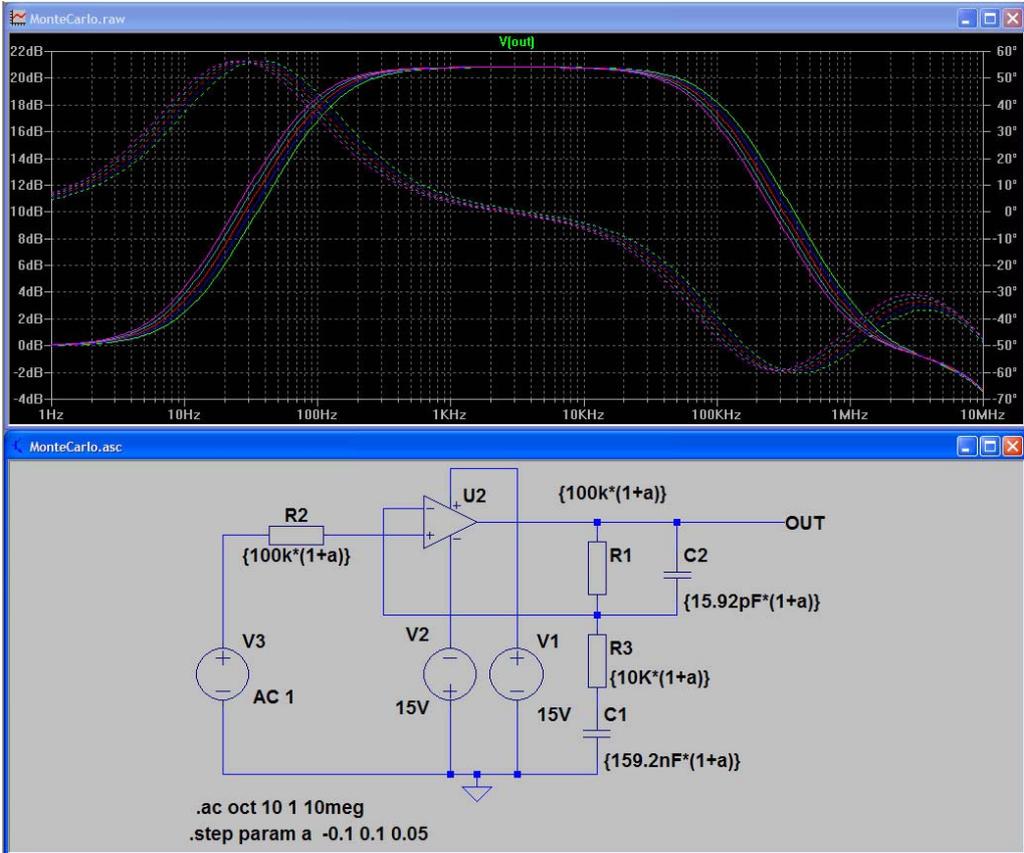


Abbildung 30: MonteCarlo-Analyse

1.7. Simulation eines Transformators

Standardmäßig kann man mit LTspice IV nur lineare Transformatoren ohne Sättigungsverhalten simulieren, außer man verwendet fertige SPICE-Transformatorenmodelle der Hersteller.

Zur Simulation eines Trafos platziert man zwei oder mehr Spulen nebeneinander. Durch Eingabe der Induktivitäten kann man das Übersetzungsverhältnis des Trafos einstellen. Mit einer Spice-Direktive definiert man die magnetische Kopplung der Transformatorwicklungen.

Beispiel einer SPICE-Direktive für einen Transformator mit 2 Wicklungen:

K1 L1 L2 1

Hier ist der Kopplungsfaktor K1 mit 1 angegeben, was bedeutet, dass keine Streuinduktivität existiert. Der gesamte magnetische Fluss umfasst L1 und L2. L1 ist die Primärwicklung und L2 die Sekundärwicklung des Trafos.

$$K1 = \frac{|M_{ab}|}{\sqrt{L1 \cdot L2}} \text{ mit } M_{12} = \text{Gegeninduktivität des Transformators}$$

Gleichung 1-1: Koppelfaktor eines Transformators

$$\dot{U} = \sqrt{\frac{L2}{L1}} = \frac{U2}{U1} \text{ mit } U1 = \text{Primärspannung und } U2 = \text{Sekundärspannung}$$

Gleichung 1-2: Spannungsübersetzungsverhältnis eines Transformators

Nach Eingabe der Spice-Direktive erscheinen an den Spulenden kleine Kreise, welche den Wicklungsanfang kennzeichnen. Somit kann man durch Umdrehen der Spule auch den Wicklungssinn ändern.

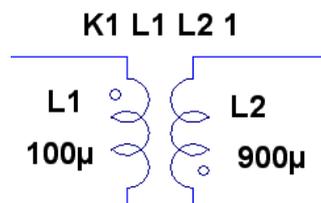


Abbildung 31: Schaltbild eines Transformators

1.8. Verschiedene weitere Quellen

1.8.1. Gesteuerte Strom- und Spannungsquellen

In LTspice IV gibt es verschiedene gesteuerte Quellen:

Art der Quelle	Component Symbol (Name im Component Menü)
Spannungsgesteuerte Spannungsquelle	e
Stromgesteuerte Spannungsquelle	h
Spannungsgesteuerte Stromquelle	g
Stromgesteuerte Stromquelle	f

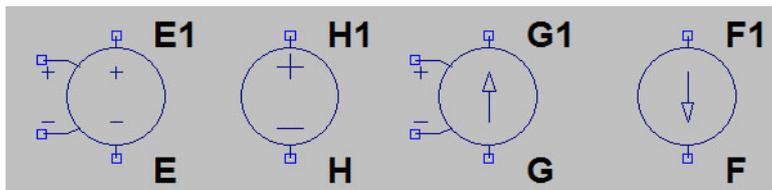


Abbildung 32: Symbole der gesteuerten Quellen

Klickt man eine Quelle mit der rechten Maustaste an, öffnet sich ein Fenster „*Component Attribute Editor*“. Hier kann man die Quelleneigenschaften festlegen.

Die *spannungsgesteuerten Quellen* werden jeweils über die beiden Anschlüsse + und – an ihrer linken Seite gesteuert. Im Eigenschaftsfenster einer solchen Quelle muss nur der Verstärkungsfaktor angegeben werden („E“ bzw. „G“ unter „Value“).

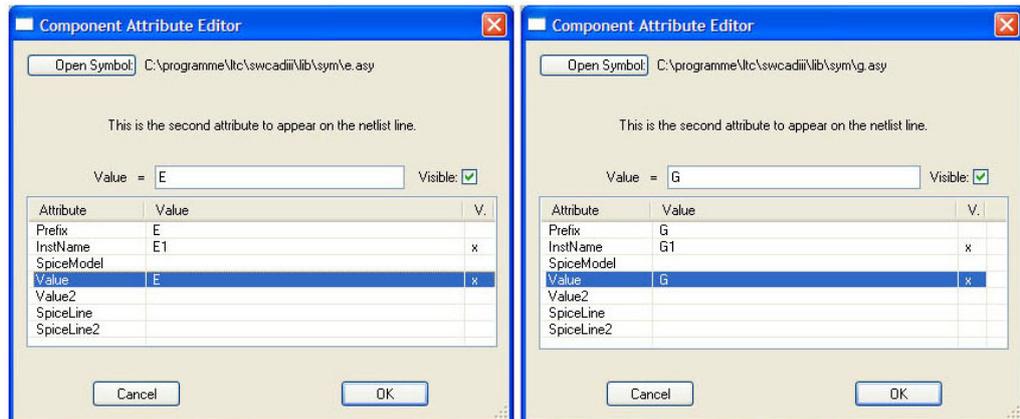


Abbildung 33: Steuerfaktoren bei der spannungsgesteuerten Spannungsquelle (e-Quelle) und bei der spannungsgesteuerten Stromquelle (g-Quelle)

Möchte man eine *spannungsgesteuerte Spannungsquelle* realisieren, die eine zehnmal so große Spannung liefert wie die anliegende Steuerspannung (d.h. 1V Steuerspannung soll 10V Ausgangsspannung erzeugen), so muss unter „Value“ anstelle des Textes „E“ die Zahl 10 eingegeben werden.

Möchte man eine *spannungsgesteuerte Stromquelle* realisieren, die einen doppelten so großen Strom liefert wie der Betrag der anliegenden Steuerspannung (d.h. 1V Steuerspannung soll 2A Ausgangsstrom erzeugen), so muss unter „Value“ anstelle des Textes „G“ die Zahl 2 eingegeben werden.

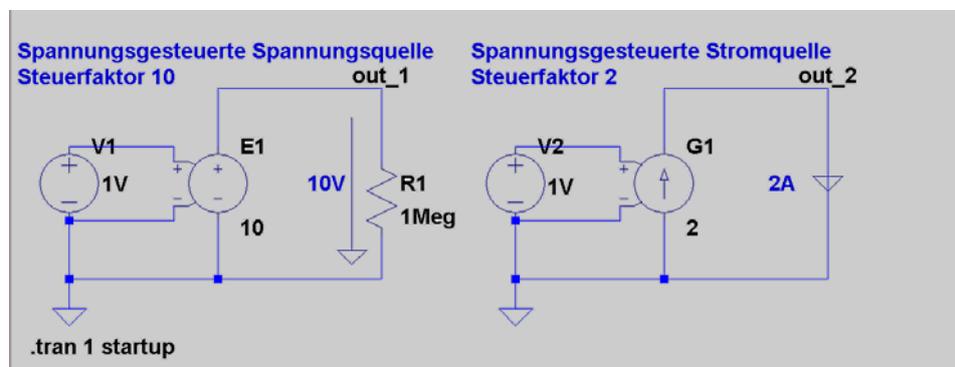


Abbildung 34: Beispiel mit spannungsgesteuerten Quellen „e“ und „g“

Bei den *stromgesteuerten Quellen* muss die Quelle des Steuerstroms (Name der steuernden Spannungsquelle) sowie der Verstärkungsfaktor (anstelle des Textes „H“ bzw. „F“ unter „Value“) angegeben werden.

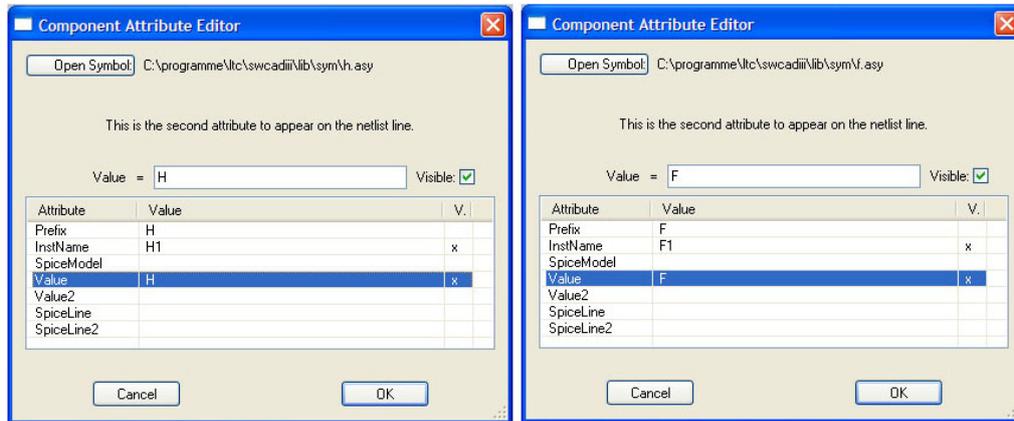


Abbildung 35: Steuerfaktoren bei der stromgesteuerten Spannungsquelle (h-Quelle) und bei der stromgesteuerten Stromquelle (f-Quelle)

Möchte man eine *stromgesteuerte Spannungsquelle* realisieren, die eine zehnmal so große Spannung liefert wie der Betrag des Stromes aus einer steuernden Spannungsquelle V1 (d.h. 1A Steuerstrom soll 10V Ausgangsspannung erzeugen), so muss unter „Value“ anstelle des Textes „H“ die Eingabe „V1 10“ stehen.

Möchte man eine *stromgesteuerte Stromquelle* realisieren, die einen zwanzigmal so großen Strom liefert wie der Betrag des Stromes aus einer steuernden Spannungsquelle V2 (d.h. 0,1A Steuerstrom soll 2A Ausgangsstrom erzeugen), so muss unter „Value“ anstelle des Textes „F“ die Eingabe „V2 20“ stehen.

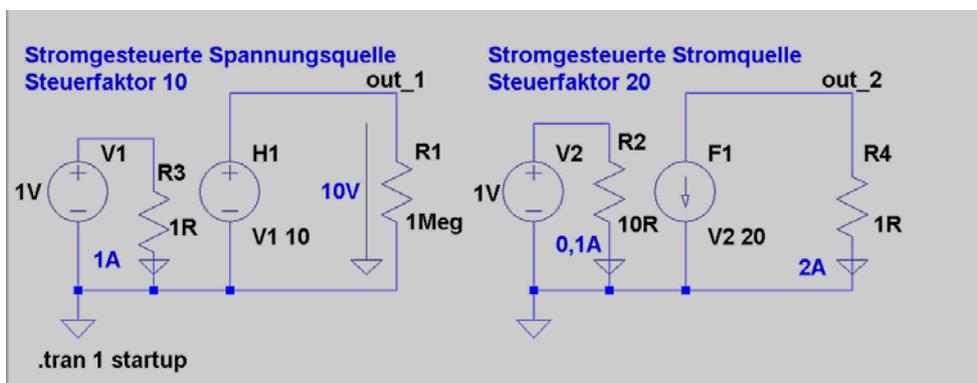


Abbildung 36: Beispiel mit stromgesteuerten Quellen „h“ und „f“

1.8.2. Formelgesteuerte Quellen

Art der Quelle	Component Symbol (Name im Component Menü)	Formel
Formelgesteuerte Spannungsquelle	Bv (Behavioral Voltage)	$V=F(\dots)$
Formelgesteuerte Stromquelle	Bi (Behavioral Current)	$I=F(\dots)$

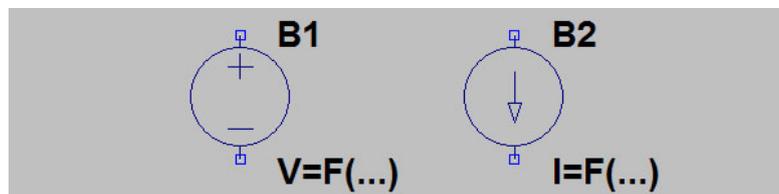


Abbildung 37: Symbole der formelgesteuerten Quellen

Ein Anwendungsbeispiel für eine formelgesteuerte Quelle ist die Summation mehrerer Quellen zu einer Summenquelle. Möchte man z.B. die Ausgangsspannungen am Knoten a (Exponentieller Spannungsverlauf) und am Knoten b (sinusförmiger Spannungsverlauf) summiert ausgeben, so gibt man bei der Quelle Bv bzw. Bi anstelle des vorhandenen Eintrags „ $V=F(\dots)$ “ die Formel „ $V=V(a)+V(b)$ “ ein. Natürlich kann man auch andere Operationen benutzen.

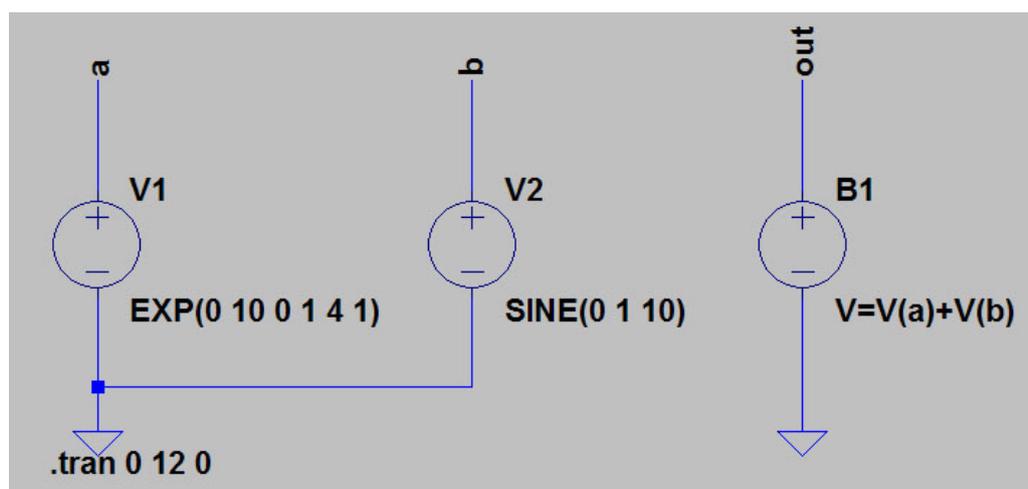


Abbildung 38: Summation zweier Spannungen in der Quelle B1

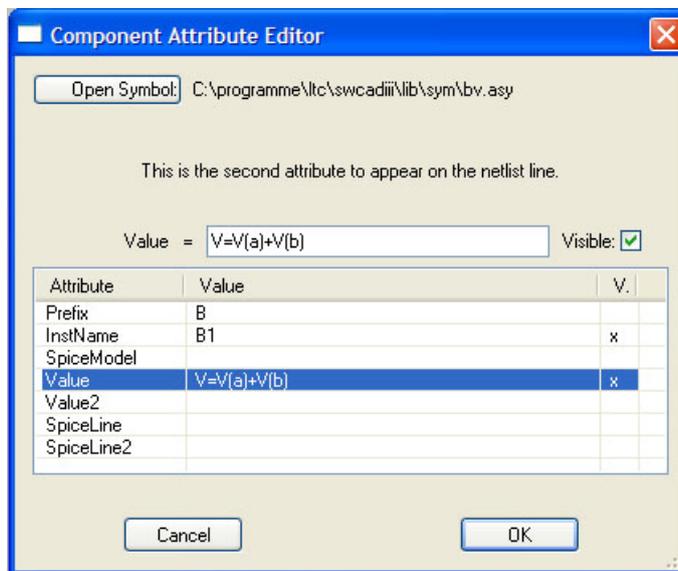


Abbildung 39: Formeleingabe im Eigenschaftsfenster der formelgesteuerten Spannungsquelle B1

Nachfolgende Abbildung zeigt die beiden Quellspannungen und die resultierende Spannung:

- Exponentialspannung am Knoten a: gelb
- Sinusspannung am Knoten b : grün
- Resultierende Spannung am Knoten out: rot



Abbildung 40: Resultierendes Ergebnis

1.8.3. FM und AM - Quellen

Eine weitere gesteuerte Quelle finden wir unter „*Component*“ im Unterverzeichnis „*SpecialFunctions*“ als Eintrag „*modulate*“.

Diese Quelle ermöglicht eine Frequenz- (FM) bzw. Amplitudenmodulation (AM) eines sinusförmigen Ausgangssignals.

Frequenzmodulation:

Das Steuersignal (Modulationssignal) zur Frequenzmodulation schließt man an den Eingang FM an. Es sind Spannungswerte zwischen 0 und 1V erlaubt.

Die Zuordnung von Steuerspannungswert zur erzeugten Frequenz erfolgt im Eigenschaftsfenster der Quelle durch folgende zwei Schlüsselwörter:

- „*space*“ (Frequenz für Steuerspannung 0V)
- „*mark*“ (Frequenz für Steuerspannung 1V)

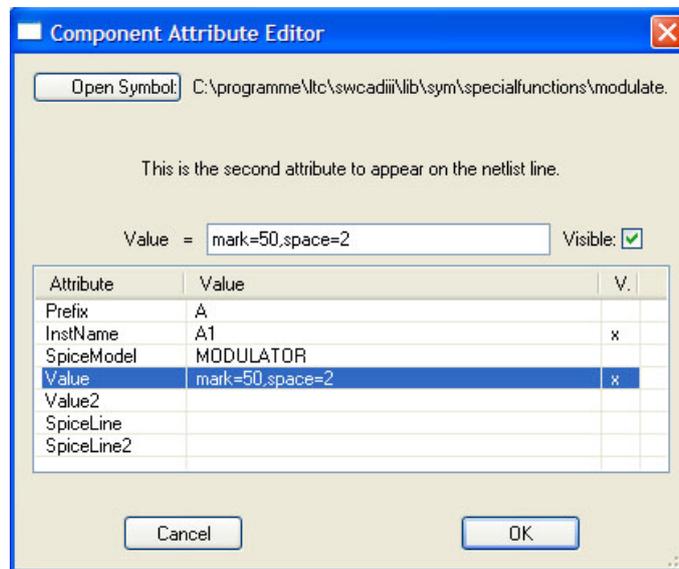


Abbildung 41: Eingabe der Steuerspannungsdaten zur FM

mark=50,space=2

Durch obige Eingabe wird bei 1V Steuerspannung eine Frequenz von 50 Hz und bei 0V eine Frequenz von 2 Hz erzeugt.

In Abbildung 42 sehen wir ein Beispiel der Erzeugung eines frequenzmodulierten Sinussignals. Das Steuersignal am FM-Eingang ist eine Dreiecksspannung, das Ausgangssignal bewegt sich im Bereich 2Hz bis 50Hz.

Mit der SPICE-Direktive „.wave“ wird das Ausgangssignal zusätzlich in einer Wave-Datei (fmmodulation.wav) gespeichert. Dadurch kann man sich den Modulationseffekt direkt nach der Simulation anhören.

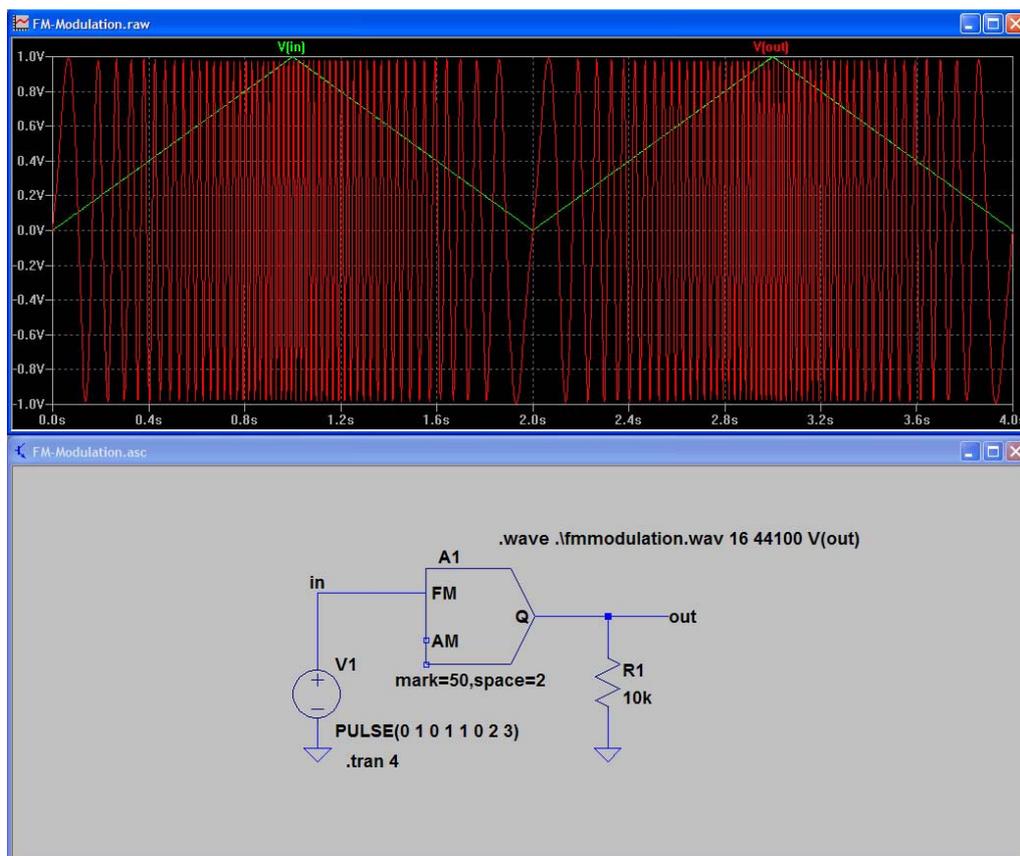


Abbildung 42: Beispiel zur FM mit Erzeugung einer Wave-Datei

Amplitudenmodulation:

Genauso wie bei der Frequenzmodulation müssen hier im Eigenschaftsfenster der Quelle die Einträge „mark“ und „space“ besetzt werden. Damit wird die Frequenz am Ausgang festgelegt, auch wenn der FM-Eingang unbeschaltet ist (unbeschaltet ist gleichbedeutend mit 0 V Steuerspannung).

Am Eingang AM liegt das Steuersignal (Modulationssignal) zur Amplitudenmodulation. Es sind Spannungswerte zwischen 0 und 1V erlaubt. Hier gibt es eine eindeutige 1 : 1 - Zuordnung von Steuerspannungswert zur erzeugten Signalamplitude:

- 0V am AM-Eingang erzeugt 0V Ausgangsamplitude
- 1V am AM-Eingang erzeugt 1V Ausgangsamplitude.

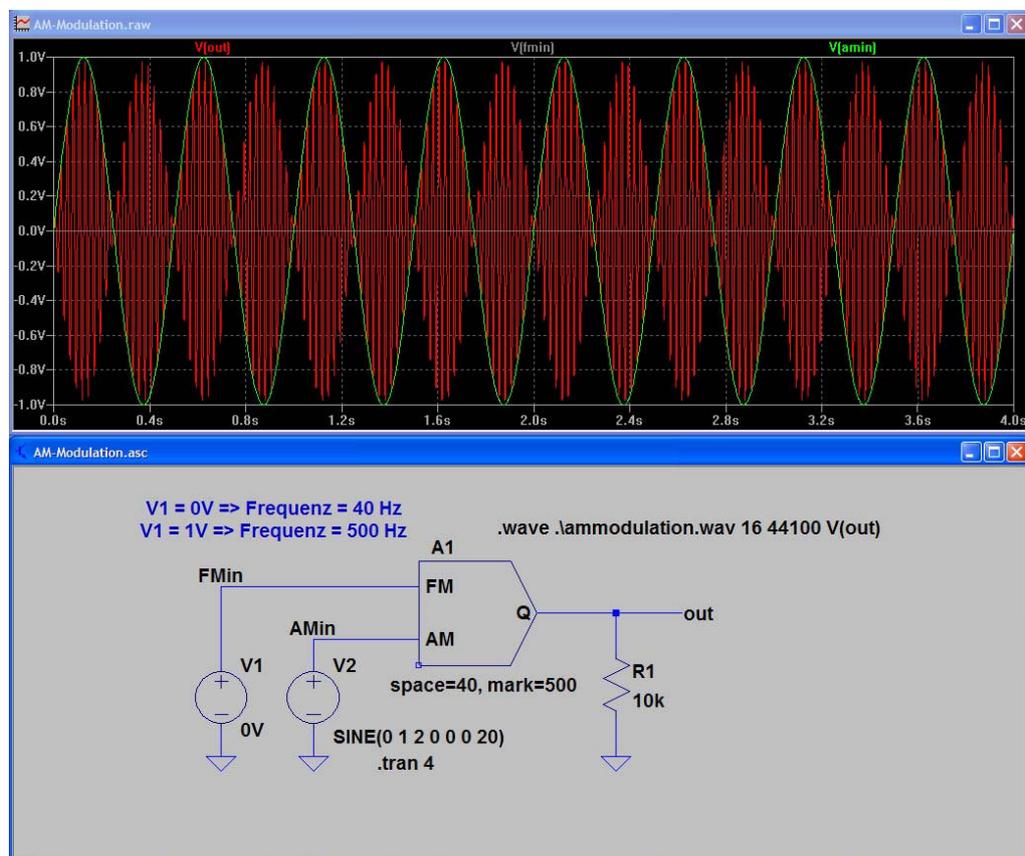


Abbildung 43: Beispiel zur AM mit Erzeugung einer Wave-Datei

In Abbildung 43 sehen wir ein Beispiel der Erzeugung eines amplitudenmodulierten Sinussignals. Das Ausgangssignal ist ein 40Hz-Sinus, dessen Amplitude über das 2Hz-Sinussignal am Eingang AM gesteuert wird.

1.9. Laplace-Übertragungsfunktion

In der Praxis kann es vorkommen, dass ein zu simulierendes Bauteil nicht als Schaltplansymbol in LTspice IV existiert. Dann kann man sich durch Verwendung der Laplace-Übertragungsfunktion des Bauteiles behelfen.

Als Beispiel betrachten wir uns dazu die Datei „*TwoTau.asc*“ aus dem LTspice IV-Ordner *\examples\Educational*.

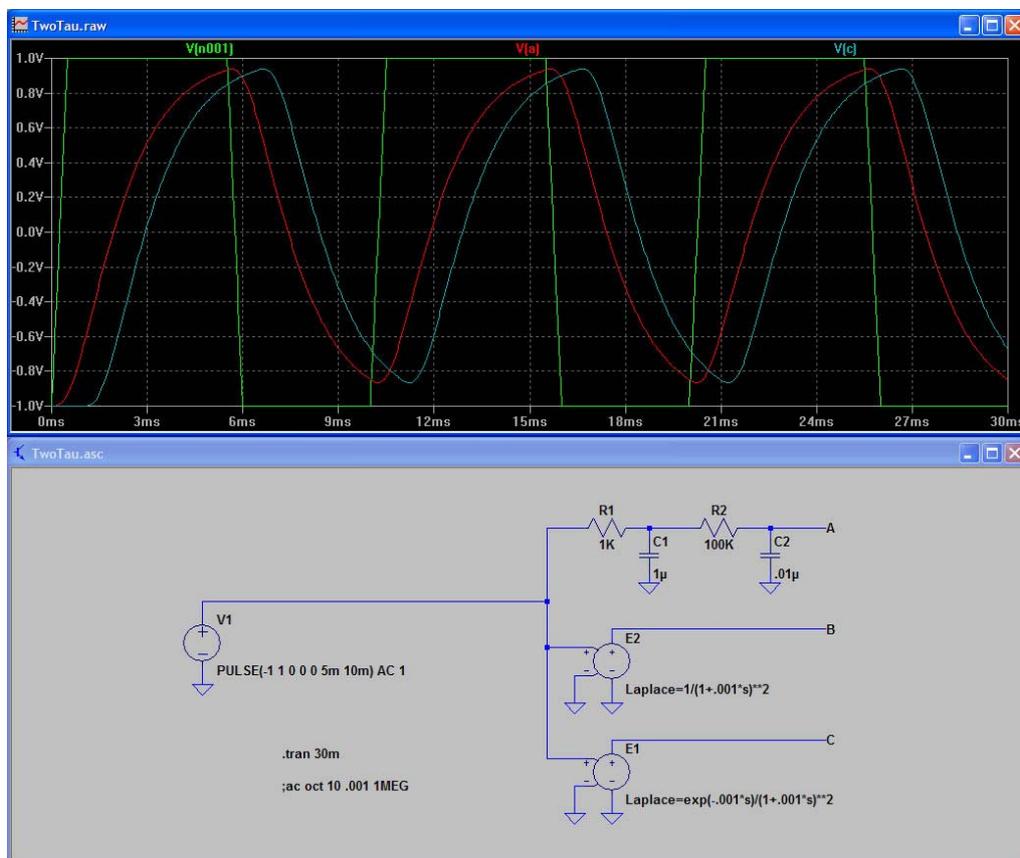


Abbildung 44: Beispiel „TwoTau.asc“ aus dem Ordner „Educational“

Als Eingangssignal der Schaltung dient ein Rechteckpuls der Quelle V1 (grünes Signal im Diagramm).

Im oberen Teil des Schaltplanes sehen wir die übliche Schaltung eines RC-Tiefpasses zweiter Ordnung mit dem Ausgang „A“ (rotes Signal im Diagramm).

Darunter ist das gleiche Systemverhalten mit einer spannungsgesteuerten Spannungsquelle realisiert. Dieser Quelle ist als Steuerfaktor die Laplace-Übertragungsfunktion des Tiefpasses zweiter Ordnung zugewiesen:

$$\text{Laplace}=1/(1+.001*s)**2$$

Das Ausgangssignal an „B“ ist im Diagramm nicht dargestellt, da es exakt dem Signal an „A“ entspricht.

Ganz unten befindet sich eine Variante mit zusätzlicher Zeitverzögerung, das Ausgangssignal des Tiefpasses wird hier etwas verzögert ausgegeben. Die Zeitverzögerung entsteht durch den Term „exp(-.001*s)“ im Zähler der Übertragungsfunktion:

$$\text{Laplace}=\exp(-.001*s)/(1+.001*s)**2$$

Das Ausgangssignal an „C“ ist im Diagramm in blau dargestellt.

1.10. Wave in und Wave out

Eine schöne Funktion von LTspice IV ist das Einspeisen einer Wavedatei in eine zu simulierende Schaltung. Auch die Ausgabe eines Ausgangssignals einer Schaltung in eine Wavedatei ist möglich.

1.10.1. Einspeisen eines Klanges aus einer Wavedatei

Zuerst kopieren wir eine beliebige Windows-Klangdatei (eine WAV-Datei aus dem Ordner C:\Windows\Media) in unser aktuelles Projektverzeichnis, in dem wir auch unsere Schaltpläne erstellen, z.B. die Datei „*tada.wav*“.

Dann erstellen wir in diesem aktuellen Projektverzeichnis einen neuen Schaltplan und fügen dort eine Spannungsquelle (*voltage*) V1 ein. Diese versehen wir mit einem Ground-Anschluss und mit einem Ausgang „*x*“.

Durch Rechtsklick auf den Text „*V*“ unten am Symbol öffnet sich ein Fenster, in dessen unteres Feld wir den Namen der Wavedatei eintragen, aus der das Ausgangssignal der Spannungsquelle V1 kommen soll. Wir geben dort folgenden Text ein:

```
wavefile=.\tada.wav chan=0
```

Die Wavedatei „*tada.wav*“ aus dem aktuellen Projektverzeichnis wird dadurch in die Spannungsquelle eingelesen, durch „*chan=0*“ wird der linke Audiokanal bei einer Stereodatei benutzt.



Abbildung 45: Spannungsquelle „*voltage*“

Als Simulationsart wählen wir Transient mit einer Dauer von 2s.

Nun starten wir die Simulation und stellen dabei den Spannungsverlauf am Ausgang „*x*“ dar. Dieser ist identisch mit dem Frequenzverlauf der Audiodatei „*tada.wav*“.

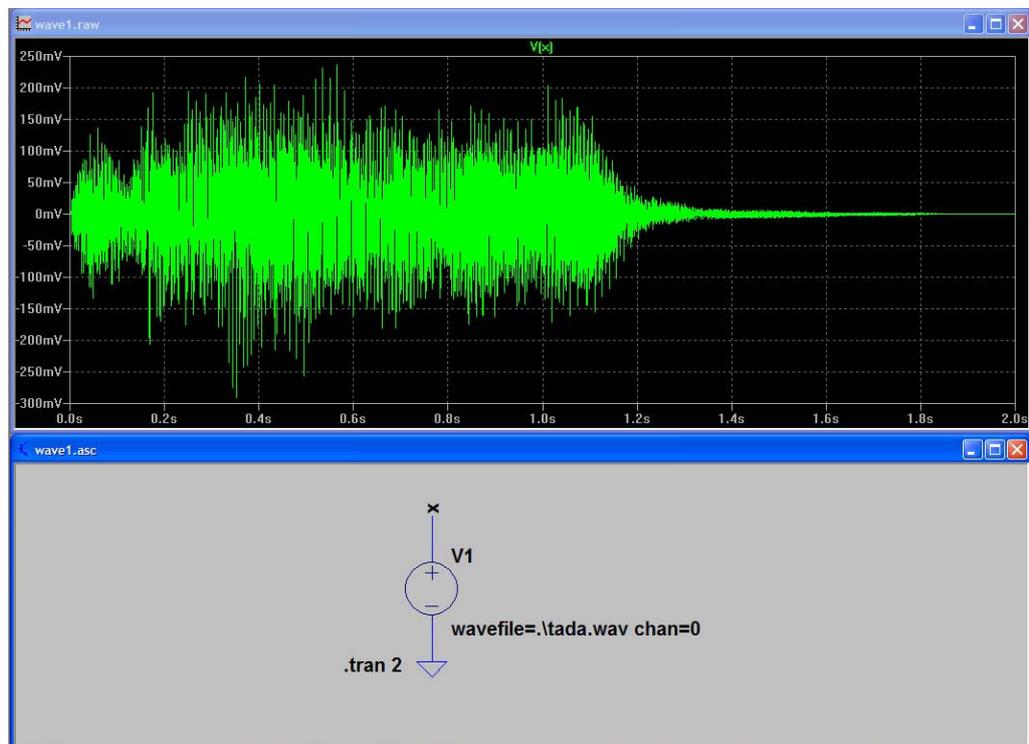


Abbildung 46: Schaltplan und Ausgangssignal

1.10.2. Speichern einer Knotenspannung in eine Wavedatei

Zuerst erstellen wir einen Schaltplan mit den drei Spannungsquellen V2, V3 und V4 und den drei Ausgängen A, B und C. Die Quellensignale definieren wir folgendermaßen:

- V(a) an Ausgang A: Sinus mit 20Hz, DC offset=0V, Ampl.=4V, Tdelay=10ms
- V(b) an Ausgang B: Sinus mit 455Hz, DC offset=0V, Ampl.=1V, Tdelay=0ms
- V(c) an Ausgang C: PWL-Signal mit folgenden Stützpunkten (ms/Volt) :
0/0 - 10/0 - 11/1 - 440/1 - 480/0
zum Ein- und Ausblenden von V(out)

Dann fügen wir eine formelgesteuerte Spannungsquelle **B1** mit dem Ausgang „out“ dazu, welche diese drei Signale mittels folgender Formel zusammenfasst ...

$$V=2*V(a)*V(b)*V(c)$$

... und sie als Spannung *V(out)* an ihrem Ausgang bereitstellt.

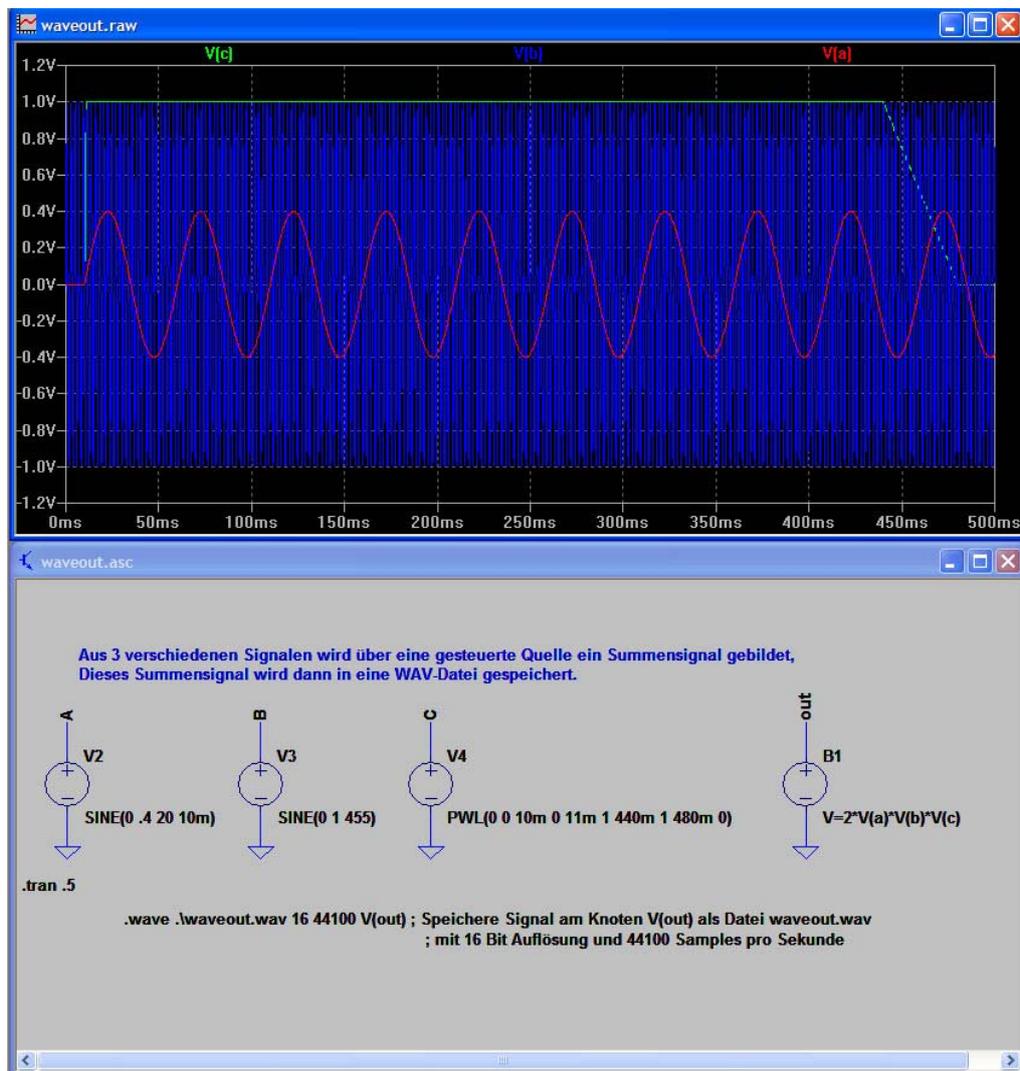


Abbildung 47: Schaltbild und die Signale der 3 speisenden Quellen

Da wir diese Ausgangsspannung in eine Wavedatei speichern möchten, müssen wir noch folgende Spice-Directive einfügen:

```
.wave .\waveout.wav 16 44100 V(out)
```

Das bedeutet, dass eine WAV-Datei erzeugt werden soll mit dem Namen *waveout.wav*, **16 Bit Auflösung** und mit einer **Abtastrate von 44100 Hz** (Abtastungen pro Sekunde). Die Datei wird von dem am Ausgang *V(out)* anliegenden Signal gespeist.

Sobald die Simulation nun gestartet wird, wird automatisch die Datei *waveout.wav* generiert und im gleichen Verzeichnis wie die Simulationsdatei abgelegt.

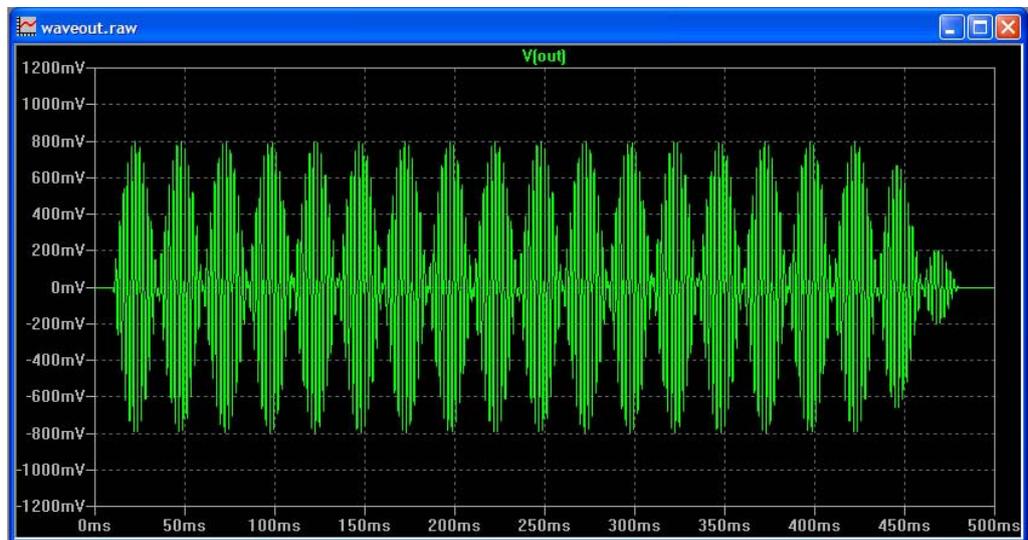


Abbildung 48: Resultierendes Ausgangssignal der formelgesteuerten Spannungsquelle, gleichzeitig Inhalt der Datei waveout.wav

1.11. SPICE-Netzlisten

Elektronische Schaltungen werden von LTspice generell in Form von Netzlisten (Textdarstellung) verarbeitet. Der grafische Schaltungsentwurf wird also zuerst in eine Netzliste umgewandelt, dann simuliert und die Simulationsergebnisse werden zum Abschluss grafisch dargestellt.

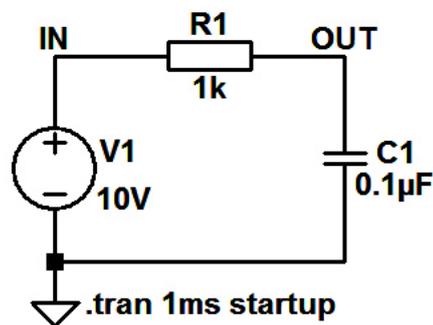


Abbildung 49: Schaltplanbeispiel in LTspice

Der einfache Schaltplan aus Abbildung 49 wird vor der Simulation automatisch in folgende Netzliste umgewandelt:

```
* Beispiel Netzliste RC-Glied.asc
V1 IN 0      10V          *Spannungsquelle 10V Gleichspannung
R1 OUT IN    1k          *Widerstand 1k
C1 OUT 0     0.1µF       *Kondensator 100nF
.tran 1ms startup      *Befehl zur Transientenanalyse
.backanno              *Befehl, für uns unwichtig!
.end                   *Befehl, „Ende der Simulation“
```

Farbenbedeutung:

Bauteilname, Knotenname, Wert, Kommentar

Diese Netzlisten verwenden die SPICE-eigene ABM-Programmiersprache. ABM steht dabei für „Analog Behavioral Model“ und beschreibt das Verhalten analoger Bauteile.

Die zu einem Schaltplan gehörige Netzliste lässt sich einfach einblenden durch Anklicken des Hauptmenuepunktes „View ⇒ SPICE Netlist“.

Bedeutung der einzelnen Zeilen:

SPICE-Netzlisten bestehen aus Bauteilenamen und Knotennamen. Einem Kommentar in einer Zeile wird ein „*“ vorangestellt.

„V1 IN 0 10V“ bedeutet, dass die Spannungsquelle V1 zwischen den Knoten „IN“ und „0“ (0V = Massedreieck im Schaltplan) angeschlossen ist und einen Wert von 10V hat.

„R1 OUT IN 1k“ bedeutet, dass der Widerstand R1 zwischen den Knoten „OUT“ und „IN“ angeschlossen ist und einen Wert von 1k-Ohm hat.

„C1 OUT 0 100nF“ bedeutet, dass der Kondensator C1 zwischen den Knoten „OUT“ und „0“ angeschlossen ist und einen Wert von 100nF hat.

Zeilen, welche mit einem Punkt „.“ beginnen, enthalten Anweisungen an SPICE. Die Zeile mit „.end“ beendet das Programm. Die Zeile mit „.tran 1ms startup“ bedeutet, dass eine Einschwinganalyse (Transientenanalyse) für die Dauer von 1 Millisekunde durchgeführt werden soll. Dabei bedeutet „startup“, dass beim Start der Simulation das Einschalten der Spannungsquelle simuliert werden soll.

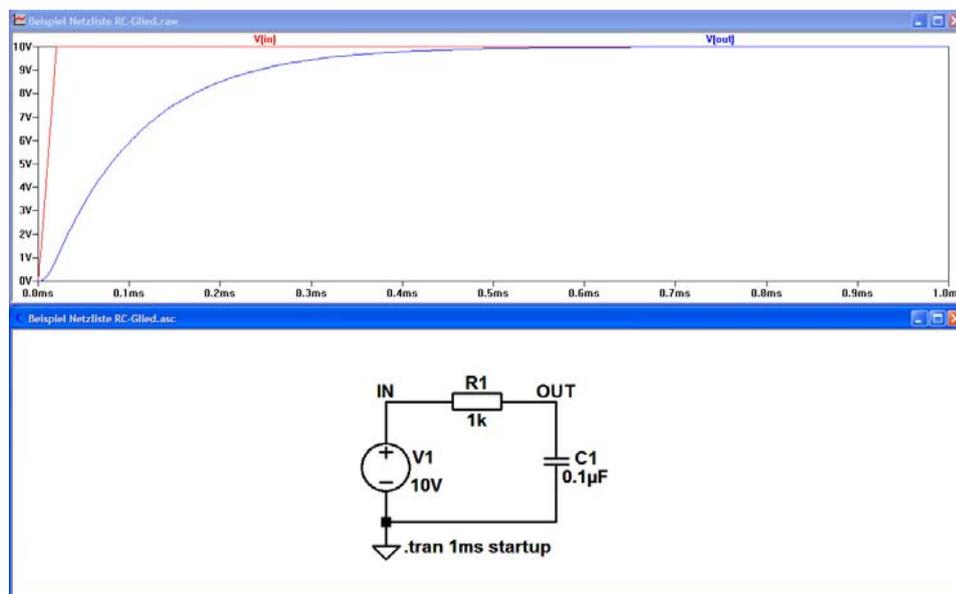


Abbildung 50: Simulationsergebnis zum Schaltplanbeispiel

Das Ergebnis der Einschwinganalyse ist der Signalverlauf in Abbildung 50.

Folgende Tabelle zeigt die festgelegten Buchstaben mit ihren zugeordneten Bauteilen sowie einige weitere Symbole innerhalb von SPICE-Netzlisten:

Symbol in SPICE	Bedeutung
A	Spez. Funktionsblöcke
B	Verhaltensgesteuerte Quelle
C	Kondensator
D	Diode
E	Spannungsgesteuerte Spannungsquelle
F	Stromgesteuerte Stromquelle
G	Spannungsgesteuerte Stromquelle
H	Stromgesteuerte Spannungsquelle
I	Unabhängige Stromquelle
J	JFET-Transistor (Sperrschicht-FET)
K	Kopplungsinduktivität zwischen zwei Induktivitäten
L	Induktivität
M	MOSFET-Transistor
O	verlustbehaftete Leitung
Q	Bipolartransistor
R	Widerstand
S	Spannungsgesteuerter Schalter
T	verlustlose Leitung
U	RC-Kettenschaltung
V	Spannungsquelle
W	Stromgesteuerter Schalter
X	Subcircuit (komplette Teilschaltung)
Z	MESFET-Transistor
*	Einleitung Kommentar
.	Anweisungskennzeichen
.MODEL	Eigenes Modell
+	Zeilenfortsetzung

Abbildung 51: Buchstaben und Zeichen in SPICE-Netzlisten (SPICE-ABM-Befehle)

Der Vollständigkeit halber hier noch einmal die Tabelle mit den Maßstabsfaktoren:

Faktor	Wert	Bezeichnung	Faktor	Wert	Bezeichnung
T	10^{12}	Tera	U	10^{-6}	mikro
G	10^9	Giga	N	10^{-9}	nano
MEG	10^6	Mega	P	10^{-12}	piko
K	10^3	kilo	F	10^{-15}	femto
M	10^{-3}	milli	MIL	$25,4 \cdot 10^{-6}$	Mil

Zahlen nur mit Dezimalpunkt eingeben (kein Komma)

Skalierfaktoren schreibt man direkt hinter den Wert (ohne Leerzeichen)

Milli (m) und Mega (meg) nicht verwechseln

Abbildung 52: Maßstabsfaktoren in SPICE

Beispiel:

1 MΩ wird in LTSpice als „1MEG“ und nicht als „1M“ (wäre 1 Milliohm) eingegeben

1.12. Subcircuits (SPICE-Modelle)

1.12.1. Übersicht

Ein „Subcircuit“ ist eine elektronische Teilschaltung, welche in Textform mit einer Netzliste (SPICE-Modelldatei) beschrieben wird. Ein Subcircuit kann wie ein normales in LTspice eingebautes Bauteil benutzt werden und man kann ihm auch ein selbst gezeichnetes Schaltplansymbol zuordnen.

Eine SPICE-Modelldatei ist folgendermaßen aufgebaut:

```
.subckt {Name des Subcircuit} {Liste der Anschlussnamen}
{mehrere Zeilen mit SPICE-ABM-Befehlen}
.....
.....
.ENDS
```

In der 1. Zeile wird der Name des SPICE-Modelles definiert. Am Ende dieser Zeile folgt eine Liste der vom aufrufenden Programm (bei uns der übergeordnete Schaltplan) benutzten Anschlussnamen.

Die zweite und die nachfolgenden Zeilen enthalten SPICE-ABM-Befehle zur Definition der Schaltung des Subcircuit. Dabei wird eine Schaltung aus SPICE-Basiselementen zusammengesetzt.

Alle elektrischen Verbindungen der Bauteile untereinander erhalten Knotennummern. Ein wichtiger Knoten ist der Bezugspunkt „0“ (Bezugspotential der Schaltung = 0V). Dieser muss in einem Subcircuit nicht immer vorhanden sein, wohl aber im übergeordneten Schaltplan.

In Abbildung 53 sehen wir die Modellbeschreibung des TL084 in der SPICE-eigenen ABM-Programmiersprache. Der ganze OP ist hier als Subcircuit definiert. Die verschiedenen Anweisungen sind farblich hervorgehoben.

Die benutzten Farben haben folgende Bedeutung:

Bauteilname, Knotenname, Wert, Kommentar

Modellspezifizierung, Modellaufruf

Wir wollen nun ein einfaches Subcircuit-Beispiel für die Schaltung eines Serienresonanzkreises selbst entwerfen. Das neu zu erstellende Bauteil soll sich dabei verhalten wie die unten angegebene diskrete Schaltung.

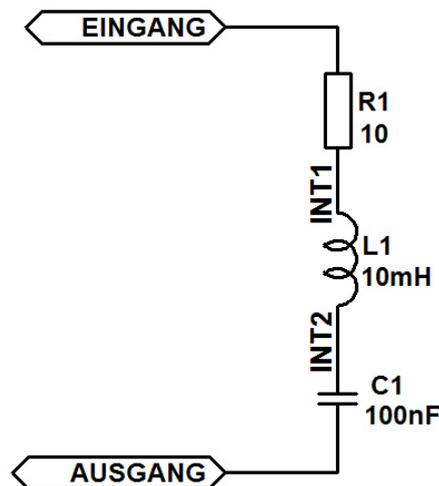


Abbildung 54: Beispielschaltung eines Subcircuit mit Serienresonanzkreis (Saugkreis)

Das Schaltbild in Abbildung 54 stellt nur ein Ersatzschaltbild des neuen Bauelementes dar, ist aber notwendig, um die Netzliste (Modelldatei) zu erstellen. Für die Simulation benutzen wir obige Schaltung nicht.

Die Netzliste zu unserem neuen Bauelement sieht dann folgendermaßen aus:

```
.subckt saugkreis Eingang Ausgang
R1  EINGANG INT1  10
L1  INT1 INT2  10mH
C1  INT2 AUSGANG  100nF
.ENDS
```

Beachten Sie, dass die internen Knoten „INT1“ und „INT2“ nach außen nicht auftauchen.

Der Netzliste kann man zum Abschluss noch ein eigenes Schaltplansymbol zuordnen. Die prinzipielle Vorgehensweise dazu sehen wir im folgenden Kapitel.

Danach sollten Sie in der Lage sein, für das obige Beispiel die Schaltung zu erstellen und das Ganze zu simulieren. Arbeiten Sie dazu aber erst den Inhalt des nächsten Kapitels durch.

Das Ergebnis sollte so aussehen:

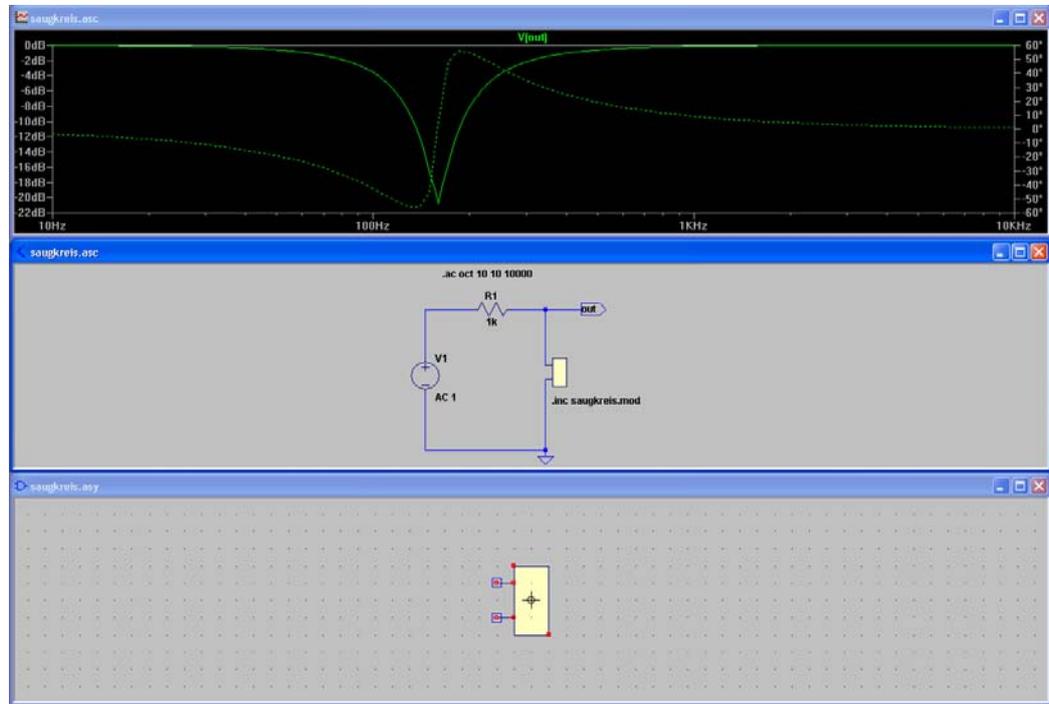


Abbildung 55: Beispielschaltung eines Serienresonanzkreises als Subcircuit

1.12.2. Beispiel der Modellierung eines zeitabhängigen Widerstandes

Als Beispiel eines in LTspice nicht vorhandenen Bauteiles wollen wir uns nun das Modell eines zeitabhängigen Widerstandes konstruieren. Ein solches Bauteil existiert in der Welt der elektronischen Bauteile nicht. Es wäre aber durch ein motorgetriebenes Potentiometer realisierbar. Mit diesem Bauteil können wir z.B. eine zeitveränderliche Last sehr schön simulieren.

Der nachfolgend konstruierte zeitabhängige Widerstand wird mit einer zeitabhängigen Spannungsquelle in seinem Widerstandswert gesteuert. Die Zeitabhängigkeit entsteht also nicht direkt durch Angabe einer Zeitfunktion sondern aus der Zeitabhängigkeit des Spannungsverlaufes der steuernden Spannungsquelle.

Wenn Strom durch einen Widerstand fließt, entsteht an ihm eine Spannung. Der gleiche Widerstand kann aber auch mit einer Stromquelle modelliert werden, deren Strom durch die Spannung an seinen Anschlüssen gesteuert wird und den Wert U/R hat.

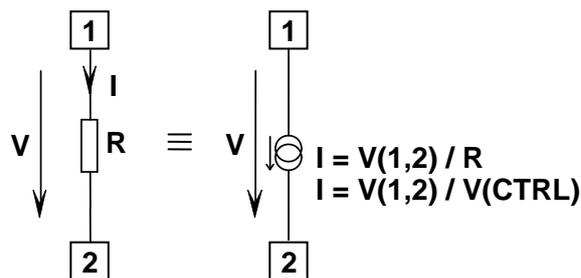


Abbildung 56: Schaltung eines Widerstandes mit spannungsgesteuerter Stromquelle

In Abbildung 56 ist links der Widerstand mit seinen Anschlussklemmen 1 und 2 (SPICE-Knoten 1,2) dargestellt.

Rechts daneben sehen wir die Realisierung als „*Subcircuit*“. Dies ist eine spannungsgesteuerte Stromquelle, deren Stromwert aus der Spannung an ihren eigenen Klemmen 1 und 2, geteilt durch den Widerstand „ R “, berechnet wird.

Schreibt man nun anstelle von „ R “ den Ausdruck $V(CTRL)$ hin, so hat man einen steuerbaren Widerstand realisiert. Der Wert „ R “ wird nun durch eine Steuerspannung $V(CTRL)$ dargestellt. Man muss nur aufpassen, dass die Steuerspannung nicht exakt 0 wird, da SPICE dann eine Division durch 0 ausführen muss und dies einen Fehler provoziert. 1V Steuerspannung entspricht dabei einem Widerstand von 1 Ohm.

Beispiele:

Steuerspannung	Widerstandswert
1V	1 Ohm
10V	10 Ohm
100V	100 Ohm
1kV	1k-Ohm
1Mega	1Meg-Ohm

Die Widerstandsfunktion erzeugt man durch Schreiben eines SPICE-Modelles. Wir nehmen hier für die Modelldatei den Namen „**VARIRES.mod**“ an. Diese Datei erstellen wir mit einem ASCII-Editor und tragen folgenden Inhalt ein:

```
.subckt VARIRES 1 2 CTRL  
G1 1 2 value = { V(1,2)/(V(CTRL)+1u) }  
.ENDS
```

In der 1. Zeile wird der Name des SPICE-Modelles als „VARIRES“ definiert. Am Ende dieser Zeile folgt eine Liste der vom aufrufenden Programm (bei uns der übergeordnete Schaltplan) benutzten Anschlussnamen. Dies sind hier Anschluss 1, 2 und der Steueranschluss „CTRL“.

Die zweite Zeile definiert eine spannungsgesteuerte Stromquelle „G1“ (G ist der zugeordnete SPICE-Name für spannungsgesteuerte Stromquellen), welche mit der Steuerspannung „ $V(1,2)/(V(CTRL)+1\mu)$ “ gesteuert wird. 1 V Steuerspannung („V(CTRL)“) erzeugt bei 1V-Spannung zwischen den Widerstandsklemmen 1 und 2 („V(1,2)“) einen Strom von 1A => 1V Steuerspannung erzeugt 1 Ohm Widerstand.

Der Summand „1 μ “ dient zur Vermeidung einer Division durch 0 bei einer Steuerspannung 0V.

Nun müssen wir nur noch ein passendes Schaltplansymbol erstellen. Dazu wählt man in LTspice den Menüpunkt „**File** ⇌ **New Symbol**“ und öffnet dadurch den **Symboleditor**.

Im Zentrum des Symboleditors befindet sich ein Fadenkreuz, dieses bildet später den Fangpunkt des neuen Symbols.

Mit der Funktion „**Draw** ⇌ **Rect**“ ziehen wir ein Rechteck um den Fangpunkt auf. Dabei achten wir darauf, dass wir mit den Eckpunkten auf den 5mm-Rasterpunkten liegen (die Rasterpunkte sind leider sehr fein und kaum erkennbar).

Mit der Funktion „**Draw** ⇌ **Line**“ fügen wir die weiteren Elemente des neuen Bauteiles hinzu.

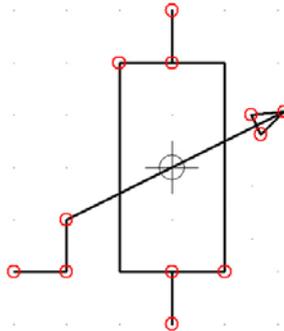


Abbildung 57: Schaltplansymbol des zeitgesteuerten Widerstands ohne Anschlüsse

Die roten Kreise in Abbildung 57 kennzeichnen die Enden der gezeichneten Elemente. Diese Kreise erscheinen später im Schaltplan nicht.

Nun müssen wir noch die elektrischen Anschlüsse erzeugen. Dazu klicken wir auf „**Edit** ⇒ **Add Pin/Port**“. Es erscheint folgendes Fenster:

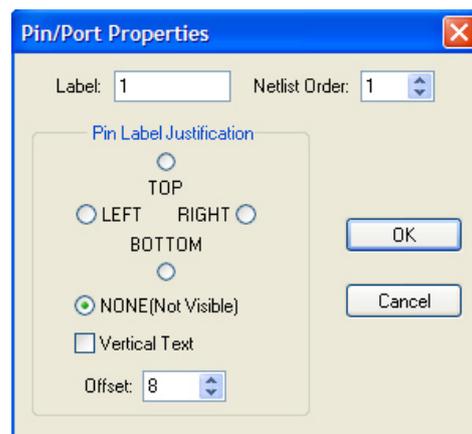


Abbildung 58: Fenster zur Eingabe der Anschlussdaten

Wir geben nur im Feld „Label“ (oben links) den Pinnamen „1“ für den oberen Widerstandanschluss ein, die restlichen Einstellungen behalten wir bei (durch Wahl von „**NONE (Not Visible)**“ erscheint der Pinnamen nicht).

Dann platzieren wir nach Anklicken von „**OK**“ das blaue, am Cursor hängende Quadrat am oberen Anschlusspunkt des Bauteiles. Im Feld „Netlist Order“ erschien dabei 1. Dieser Anschluss gilt also für den ersten ganz links stehenden Pinnamen (1) innerhalb der Zeile 1 der Modelldatei „**VARIABLES.mod**“.

Analog gehen wir beim unteren Widerstandsanschluss vor, wobei wir dort den Namen „2“ im Feld „Label“ eingeben. Bei „Netlist Order“ erscheint nun 2. Dieser Anschluss gilt also für den zweiten Pinnamen (2) im Subcircuit.

Zum Schluss geben wir den Steuerspannungsanschluss unten links am Widerstand ein, wobei wir dort den Namen „**CTRL**“ unter „Label“ eingeben.

Bei „Netlist Order“ erscheint nun 3. Dieser Anschluss gilt also für den dritten Pinnamen (CTRL) im Subcircuit.

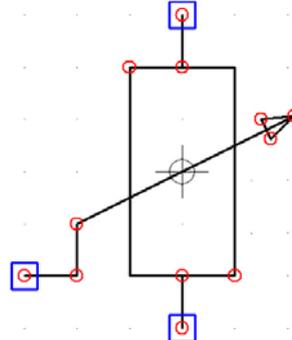


Abbildung 59: Schaltplansymbol des zeitgesteuerten Widerstands mit Anschlüssen

Wir müssen nun noch bestimmte Attribute des Bauteiles definieren. Dazu wählen wir den Menüpunkt „Edit ⇌ Attributes“ und klicken dort auf den Unterpunkt „Edit Attributes“. Es erscheint folgende Tabelle:

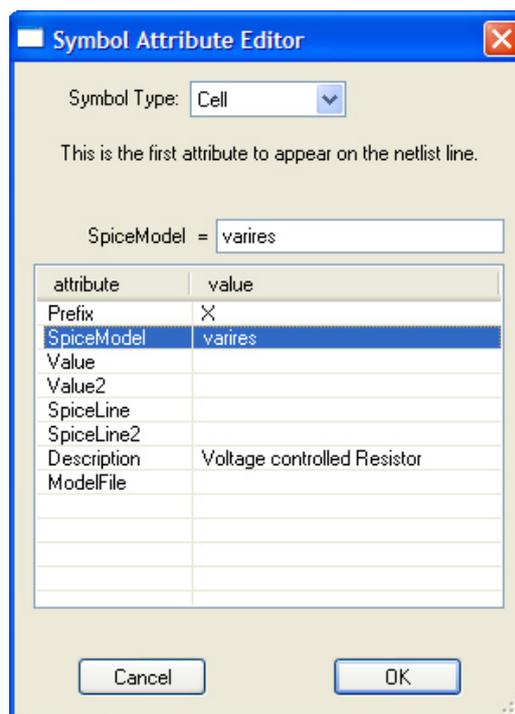


Abbildung 60: Fenster zur Eingabe der Attribute des Bauteiles

Wir geben die Werte wie in Abbildung 60 ein. Wichtig ist das „X“ bei „Prefix“ (X bedeutet „Subcircuit“).

Unter „SpiceModel“ geben wir den Namen des SPICE-Modells (ohne die Dateierweiterung „.MOD“) an. Durch diese Art der Eingabe erübrigt sich die Modelleingabe im späteren Schaltplan.

Nun speichern wir das Schaltplansymbol unter dem Namen „**varires.asy**“ ab. Die Dateierweiterung „**asy**“ ist zwingend.

Als Speicherort wählen wir den Ordner, der die Symbole in der LTspice-Installation enthält, also meistens *C:\Programme\LTC\LTspiceIV\lib\sym*.

Zum Abschluss wollen wir unser neu erstelltes Bauteil noch in einer praktischen Schaltung testen. Dazu zeichnen wir einen Schaltplan wie in Abbildung 61.

Das neue Bauelement „**varires**“ (U1) laden wir mit dem Component-Symbol. Gleichzeitig binden wir mit der SPICE-Direktive ...

```
.inc varires.mod
```

... das zugehörige SPICE-Modell ein.

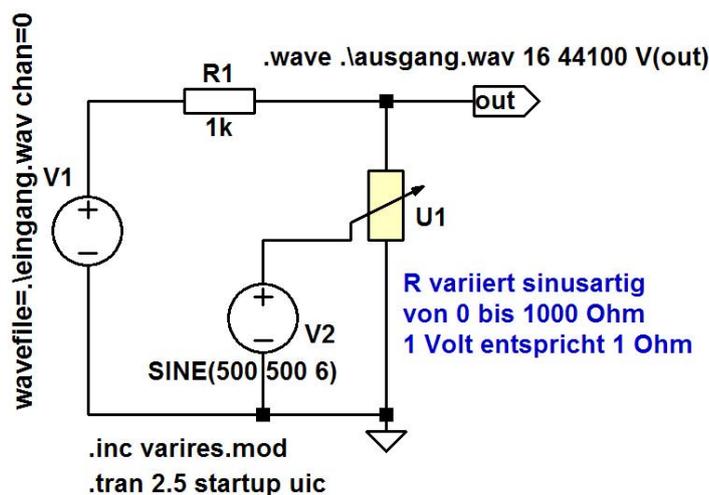


Abbildung 61: Schaltung mit zeitgesteuertem Widerstand

Unser zeitabhängiger Widerstand U1 wird mit der sinusförmigen Spannungsquelle V2 moduliert. Die Spannung hat einen Gleichanteil von 500V (entspricht 500 Ohm Grundwert von U1) und variiert mit einer Sinusamplitude von 500V. Somit variiert der Widerstand in U1 in seinem Wert zwischen 0 Ohm und 1000 Ohm

Der Signaleingang ist der Inhalt einer Wavedatei (beliebige Musik) mit dem Namen „**eingang.wav**“. Diese Datei können Sie sich selbst generieren.

Dieses Musiksignal wird mit dem zeitabhängigen Spannungsteiler geschwächt und das Ausgangssignal wird wieder in eine Wavedatei mit dem Namen „*ausgang.wav*“ gespeichert. Den Inhalt dieser Datei kann man sich nach der Simulation anhören. Man hört ein periodisch laut-leise werdendes Musiksignal (Amplitudenmodulation \Leftrightarrow Amplitudenvibrato).

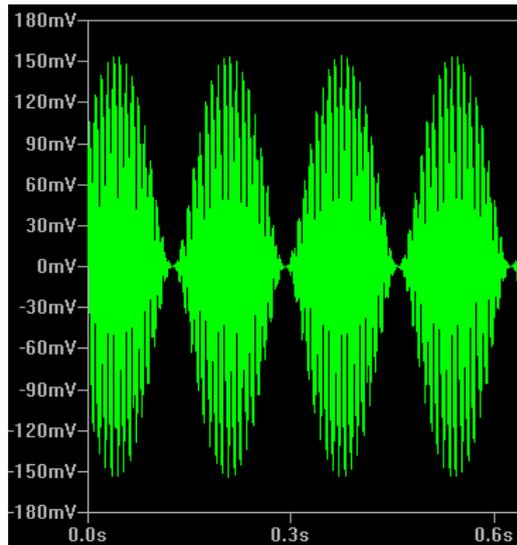


Abbildung 62: Ausgangssignal „Spannungsteiler mit zeitgesteuertem Widerstand“

2. Literaturverzeichnis



U.Tietze, Ch. Schenk
Halbleiterschaltungstechnik (Springer Verlag)
12.Auflage
ISBN 3-540-42849-6

In YAHOO gibt es auch eine sehr aktive Gruppe zu LTspice:

<http://tech.groups.yahoo.com/group/LTspice>

3. Stichwortverzeichnis

.	
.MEAS TRAN	32
.MEASURE	31
A	
AC-Analyse	27
AM-Quelle	44
B	
Bandbreitenmessung	31
D	
DC op pnt (Arbeitspunktanalyse)	29
DC-Sweep	28
F	
FM-Quelle	42
Formelgesteuerte Quellen	40
Frequenzmessung	32
G	
Gesteuerte Quellen	37
K	
Knoten	55
L	
Laplace-Übertragungsfunktion ...	45
M	
Messreihen	33
Montecarlo-Analyse	34
N	
Netzlisten	51
Nulldurchgangsmessung	32
P	
Periodendauermessung	32
Puls-Quelle	20
PWL-Quelle	24
S	
Schaltplansymbol	61
SFFM-Quelle	23
Simulationsarten	25
Sinus-Quelle	21
SPICE	
Maßstabsfaktoren	54
Modell TL-084	55
Standardbauteile	54
Subcircuit	55
Zahlenformate	54
SPICE-Direktiven	30
Standardelemente - Kondensator	
.....	17
Standardelemente - Spule	18
Standardelemente - Widerstand	17
Strom-Spannungsquellen	19
T	
Temperaturgangsmessung	33
Transformatorsimulation	36
Transientenanalyse	26
V	
varires	60
W	
Wavedatei einlesen	47
Wavedatei erzeugen	48
Widerstand	
Steuertabelle	59

