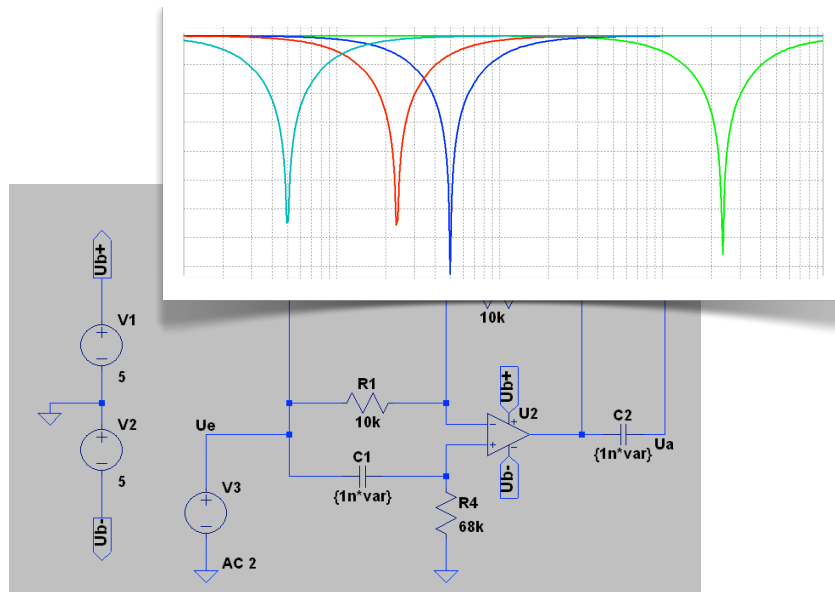


Walther Schulze, Tobias Baas

Einführung in LTspice/Switcher CAD

für Studierende der Fakultät ETIT

Vorlesung: Lineare Elektrische Netze



Stand: 5. Januar 2013



INSTITUT FÜR BIOMEDIZINISCHE TECHNIK
PROF. DR. RER. NAT. OLAF DÖSSEL
KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Vorwort	1
1.2	Kurzbeschreibung LTspice/SwitcherCAD	1
2	Simulationen	3
2.1	Erstellen eines Schaltplans ("Schematic")	3
2.2	Kurzbefehle	4
2.3	Bauteile eines typischen Schaltplans	4
2.4	Simulationseinstellungen	6
2.4.1	Wechselspannungs-/Kleinsignalanalyse ("AC Analysis") – Frequenzganganalyse	6
2.4.2	Transientenanalyse ("Transient") – Analyse im Zeitbereich	7
2.4.3	Gleichstromberechnungen ("DC op pnt")	7
2.4.4	Ortskurven über Bauteilwerte	8
2.5	Simulationsdurchführung	9

Einleitung

1.1 Vorwort

Das vorliegende SPICE-Skript soll als Hilfestellung für die Studierenden des ersten Semesters Elektrotechnik und Informationstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) dienen. Es bezieht sich dabei zum einen hauptsächlich auf die SPICE-Grundlagen, die während der Vorlesung "Lineare Elektrische Netze" (LEN) benötigt werden.

Elektronische Schaltungen werden während der Entwicklung mit Hilfe von Schaltungssimulationsprogrammen auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft (SPICE: Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Da der Aufbau eines Schaltkreises in der Regel sehr zeitaufwändig ist, können auf diesem Wege Entwicklungszeit und -kosten deutlich gesenkt werden. Im besonderen Maße gilt dieses auch für integrierte Schaltungen. Ihre Herstellung ist besonders zeit- und kostenintensiv, so dass gerade in diesem Bereich die Unterstützung der Entwicklung durch Simulationsprogramme unverzichtbar geworden ist. In der SPICE-Aufgabe der Vorlesung "Lineare Elektrische Netze" (LEN) werden einige einfache Schaltungen mit der Simulationssoftware LTspice/Switcher CAD simuliert, die wichtigsten Schaltungsanalysen durchgeführt und somit die Grundlagen von SPICE vermittelt.

Das Skript basiert in Teilen auf einer Dokumentation des Instituts für Nanoelektronik der Universität Hamburg-Harburg, dem wir an dieser Stelle für die Bereitstellung ihrer Dokumentation danken wollen, und auf dem SwitcherCAD III/LTspice Getting Started Guide¹.

1.2 Kurzbeschreibung LTspice/SwitcherCAD

Das für die Aufgabe benötigte Schaltungssimulationsprogramm LTspice/Switcher CAD IV Version 4.17q kann auf der Internetseite der Firma Linear Technology² kostenlos heruntergeladen werden. Es basiert auf dem Programm SPICE2, welches an der University of California in Berkeley in der Mitte der siebziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts entwickelt wurde. Seitdem ist es durch seine weite Verbreitung zu einem Quasi-Standard geworden. Das SPICE-Eingabeformat der Schaltungsnetzliste wird inzwischen von vielen anderen Programmen benutzt.

¹ <http://ltspice.linear.com/software/LTspiceGettingStartedGuide.pdf>

² <http://www.linear.com/designtools/software/>

Simulationen

2.1 Erstellen eines Schaltplans ("Schematic")

Nach dem Start von LTspice/Switcher CAD muss zunächst ein neuer Schaltplan ("Schematic") erstellt oder ein alter Schaltplan geladen werden. Ersteres geschieht durch Klicken auf "File" und "New Schematic" (Abb. 2.1).

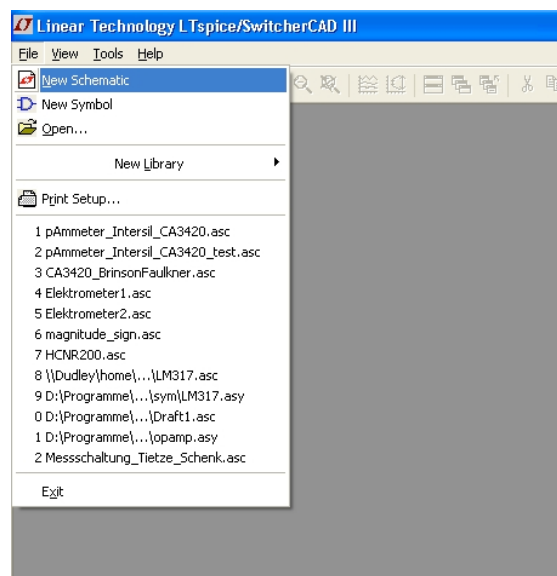


Abb. 2.1. Erstellen eines neuen Schaltplans.

In der leeren Arbeitsfläche können dann durch Klicken auf die entsprechenden Symbole oder durch Verwendung der Tastenkürzel (Abb. 2.2) die gewünschten Bauelemente platziert und verbunden werden. Verbindungsleitungen (= Netze, "Wire" [F3]) werden automatisch durchnummeriert, können jedoch auch von Hand mit beliebigen Bezeichnungen versehen werden (Netzbezeichnung, "Label" [F4]). Reserviert ist lediglich die Bezeichnung "0" für die Masse ("Ground" [G]). Die Definition dieser Masse durch **Hinzufügen des Massesymbols für jeden Schaltplan** ist ganz besonders wichtig. Der Simulator bezieht nämlich später sämtliche Spannungen auf diese Masse. Ohne Masse können keine Berechnungen durchgeführt werden.

2.2 Kurzbefehle

Symbole lassen sich mit [STRG]+[R] ("Rotate") drehen und innerhalb eines Schaltplans ohne Verbindungsleitungen ausschneiden ("Move" [F7]) oder mit Verbindungsleitungen verschieben ("Drag" [F8]). SPICE-Befehle für den Simulator können direkt im Schaltplan eingegeben werden ("SPICE Directive" [S]). Darüber hinaus ist es möglich, zur Erläuterung der Schaltung im Schaltplan Kommentare zu platzieren ("Text" [T]), die der Simulator ignoriert. Regelmäßiges Speichern beugt Datenverlust im Falle eines Program Absturzes vor ("File" → "Save"/"Save As").

Die SPICE-Netzliste der Schaltung kann jederzeit durch Klicken auf "View" und "SPICE Netlist" eingesehen werden. Fehlermeldungen werden unter "View" und "SPICE Error Log" angezeigt.

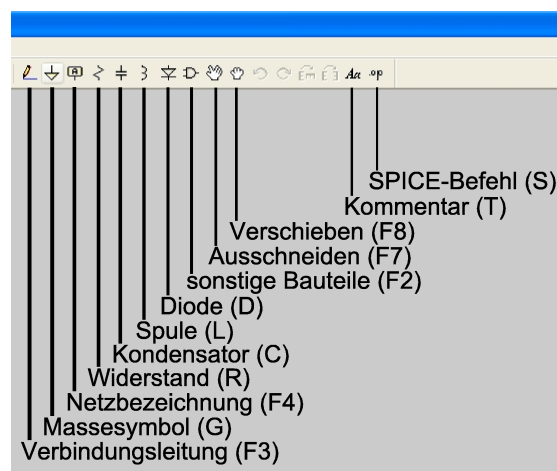


Abb. 2.2. Symbole und Tastenkürzel.

2.3 Bauteile eines typischen Schaltplans

Zum Aufbau eines linearen elektrischen Netzes lassen sich die Komponenten "Resistor", "Capacitor" und "Inductor" aus der Symbolleiste verwenden (Abb. 2.3).



Abb. 2.3. Symbolleiste der Komponenten.

Zur vereinfachten Angabe der Bauteilwerte eignen sich dabei folgende Abkürzungen:

K=k=kilo= 10^3	MEG=meg= 10^6	G=g=giga= 10^9	T=t=tera= 10^{12}
M=m=milli= 10^{-3}	U=u=micro= 10^{-6}	N=n=nano= 10^{-9}	P=p=pico= 10^{-12}

Damit Simulationen mit einem Schaltplan durchgeführt werden können, muss dieser neben dem oben erwähnten Massesymbol eine Quelle haben. Unter dem Symbol "Component" findet sich dazu eine Komponente "voltage". Nach Einfügen in den Schaltplan kann

über die rechte Maustaste eine Gleichspannung eingestellt werden (Abb. 2.4). Sinusförmige Wechselspannungen können über die Taste "Advanced" erstellt werden (Abb. 2.5). Um später eine Frequenzganganalyse durchführen zu können (Abschnitt 2.4.1), muss außerdem eine "AC Amplitude" für die "Small signal AC analysis" eingestellt werden.

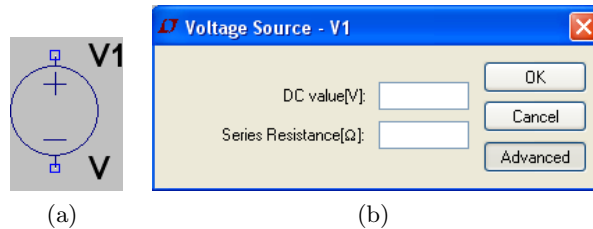


Abb. 2.4. Parametrisieren einer Spannungsquelle.

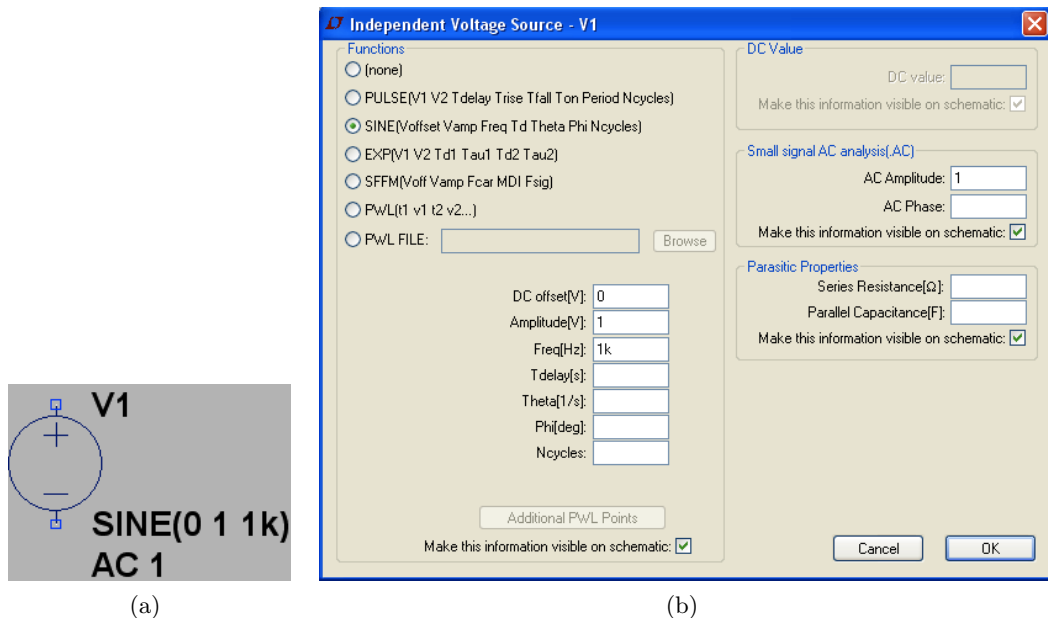


Abb. 2.5. Sinusförmige Wechselspannungsquelle, DC offset: 0 V, Amplitude: 1 V, Frequenz: 1 kHz. "AC Amplitude" für "Small signal AC analysis": 1.

Operationsverstärker lassen sich ebenfalls über das Symbol "Component" auswählen und dort im Unterpunkt "Opamps". Wir empfehlen die Nutzung des "UniversalOpamp2". Um die Versorgungsspannung anzulegen, empfiehlt sich eine Kombination aus zwei Gleichspannungsquellen (Abb. 2.6(a)) und das Anlegen der Spannung an den Operationsverstärker mit Hilfe von Labels (Abb. 2.6(b)). Diese können über das Symbol "Label Net" erzeugt werden. Sie verlinken die Spannungen $Ub+$ und $Ub-$ am Ausgang der Spannungsversorgung (Label vom "Port Type" "Output") mit den Eingängen am Operationsverstärker (Label vom "Port Type" "Input").

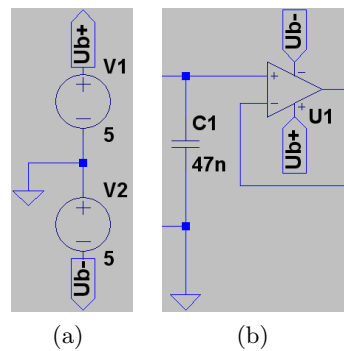


Abb. 2.6. Versorgungsspannung am Operationsverstärker. (a): Spannungsquelle. (b): Anlegen der Spannung mit Labels.

2.4 Simulationseinstellungen

Nach der Erstellung des Schaltplans folgt die Simulation. Hierzu müssen zuerst die Einstellungen des Simulators durch Klicken auf "Simulate" und "Edit Simulation Cmd" aufgerufen werden (Abb. 2.14). In dem sich öffnenden Fenster (Abb. 2.7) erfolgt die Auswahl der Simulationsart und die Eingabe der zugehörigen Simulationsparameter. Nach der Bestätigung der Eingaben mit "OK" generiert LTSpice/Switcher CAD einen SPICE-Befehl, der mittels Linksklick im Schaltplan an geeigneter Stelle abzulegen ist. Die Simulationsarten und deren Einstellungen werden in den folgenden Punkten beschrieben.

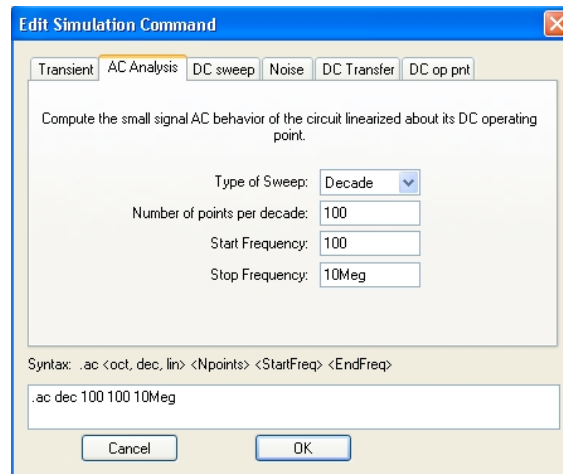


Abb. 2.7. Auswählen der Simulationsart und Eingeben der Parameter.

2.4.1 Wechselspannungs-/Kleinsignalanalyse ("AC Analysis") – Frequenzganganalyse

Das Programm berechnet alle Spannungen und Ströme für verschiedene Frequenzen innerhalb des angegebenen Intervalls. Damit lassen sich in dieser Simulationsart Bodediagramme anzeigen. Es müssen die Startfrequenz, die Endfrequenz und die Anzahl der Berechnungspunkte innerhalb einer Dekade angegeben werden.

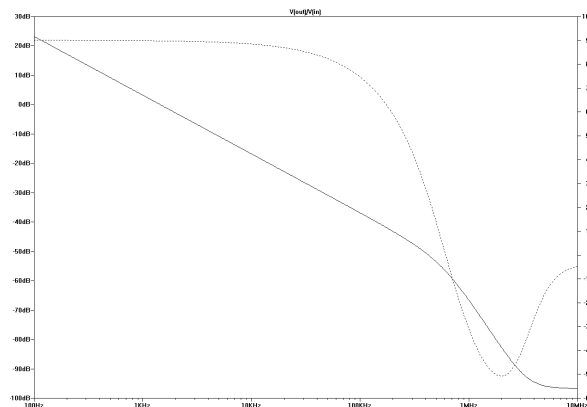


Abb. 2.8. Bodediagramm als Ergebnis der AC-Analyse. Durchgezogene Linie: Amplitude, gestrichelte Linie: Phase

2.4.2 Transientenanalyse ("Transient") – Analyse im Zeitbereich

Hier müssen die Angaben Startzeit, Endzeit und maximaler Zeitschritt für die Analyse gesetzt werden. Diese Analyse dient eigentlich der Beobachtung des Verhaltens einer Schaltung innerhalb eines Zeitintervalls, zum Beispiel, um Einschwingvorgänge sichtbar zu machen. Hier können Spannungs- und Stromverläufe einzelner Punkte in der Schaltung über der Zeit sichtbar gemacht werden (Abb. 2.9).

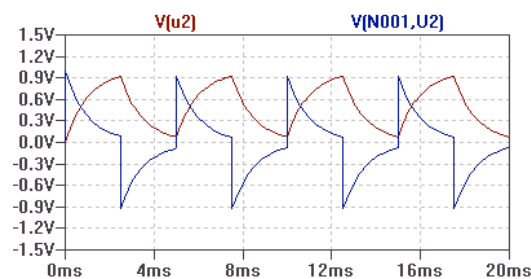


Abb. 2.9. Spannungsverlauf.

2.4.3 Gleichstromberechnungen ("DC op pnt")

Hier wird der Gleichstromarbeitspunkt berechnet. Die Spannungen und Ströme werden in einer Tabelle angezeigt (Abb. 2.10).

V(n001):	12	voltage
V(u2):	6	voltage
I(R2):	0.006	device_current
I(R1):	0.006	device_current
I(V1):	-0.006	device_current

Abb. 2.10. Tabelle mit Spannungen und Strömen im Operating Point.

2.4.4 Ortskurven über Bauteilwerte

Sollen Ortskurven über die Frequenz generiert werden, so muss die Frequenz variiert werden, wie in Abschnitt 2.4.1 beschrieben. Hinweise zum Erstellen des gewünschten Ortskurven-Plots gibt Abschnitt 2.5 ($\rightarrow$ Nyquist). In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie man LTspice instruiert, die Schaltung für verschiedene Variablenwerte von Bauteilgrößen zu simulieren.

Genau wie man mit der oben beschriebenen "AC Analysis" verschiedene Frequenzen für die Spannungsquelle vorgibt (das User-Interface generiert einen "SPICE directive" wie z.B. den Befehl "ac. dec 100 1 10Meg" für eine Startfrequenz von 1 Hz, eine Endfrequenz von 10 MHz und 100 Berechnungspunkten pro Dekade), so kann man auch für den Variablenwert eines Bauteils einen "SPICE directive" erstellen.

Dazu muss der Bauteilgröße zunächst ein Variablenname zugeordnet werden (Abb. 2.11).

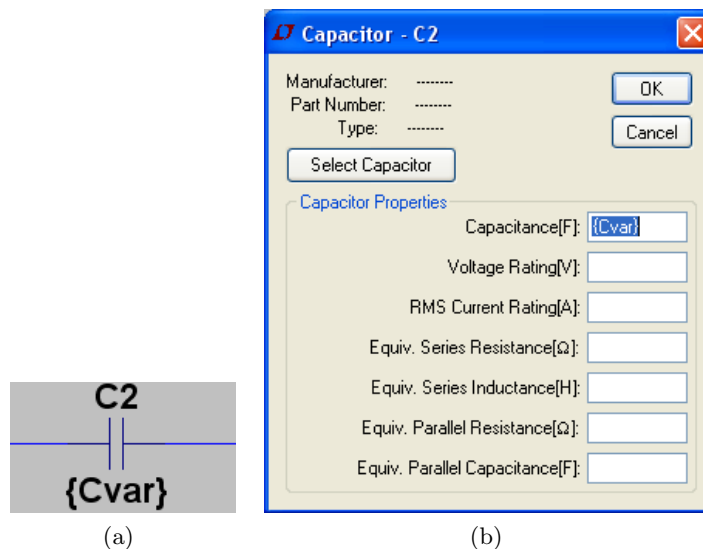


Abb. 2.11. Die Kapazität dieses Kondensators wird mit der Variable Cvar belegt.

Die Vorgabe der Variablenwerte wird in einem "SPICE directive" vorgegeben, den man über die Symbolleiste erzeugen kann (Abb. 2.12). Gibt man den Befehl ".step param Cvar 1n 2u 0.1u" ein, so simuliert LTspice die Schaltung mit Variablenwerten von 1 nF bis 2 μ F in Schritten von 0,1 μ F. Alternativ kann die Simulation auch für eine Liste ("list") von Variablenwerten durchgeführt werden: ".step param Cvar list Wert1 Wert2 Wert3 Wert4".



Abb. 2.12. SPICE directive in der Symbolleiste.

Die Simulation der Ortskurve kann wie in Abschnitt 2.4.1 im Modus "AC Analysis" durchgeführt werden. Allerdings wollen wir in diesem Abschnitt die Ortskurve über verschiedene Kapazitäten simulieren, wobei die Frequenz konstant bleibt. Dazu kann im Fenster "Edit Simulation Command" (Abb. 2.7) als "Type of Sweep" "List" ausgewählt werden. Die ge-

wünschte Frequenz kann dann manuell im Befehl ".ac list Frequenz" platziert werden. Abb. 2.13 zeigt den Schaltplan einer solchen Simulation.

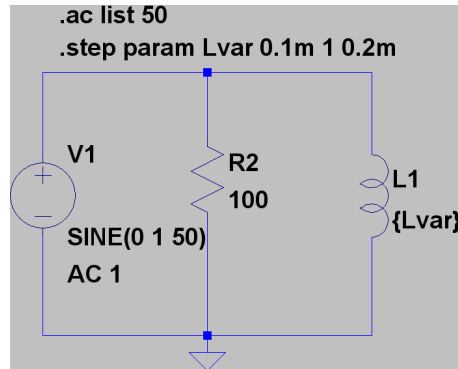


Abb. 2.13. Schaltung zur Simulation einer Ortskurve mit variierender Induktivität Lvar und fixer Frequenz von 50 Hz.

2.5 Simulationsdurchführung

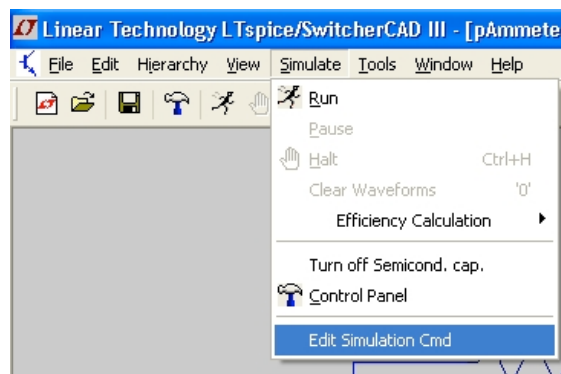


Abb. 2.14. Aufrufen der Simulatoreinstellungen.

Die Simulation wird durch Klicken auf "Simulate" und "Run" (Abb. 2.14) oder das laufende Männchen ("Run", Abb. 2.15(a)) in der Symbolleiste gestartet. Nach dem erstmaligen Start einer Simulation in einem neuen Schaltplan öffnet sich ein zunächst leeres Diagramm. Um das Diagramm zu füllen, müssen die darzustellenden Spannungen bzw. Ströme im Schaltplan ausgewählt werden. Im Falle der Spannungen geschieht dies durch Klicken auf eine Verbindungsleitung (der Mauszeiger ist dann ein Tastkopf, Abb. 2.15(b)), im Falle der Ströme durch Klicken auf den Ein- bzw. Ausgang eines Symbols (der Mauszeiger ist dann eine Stromzange, Abb. 2.15(c)). Abbildung 2.8 zeigt beispielhaft das Bode-Diagramm (Betrag/Phase) als Ergebnis einer AC-Analyse.

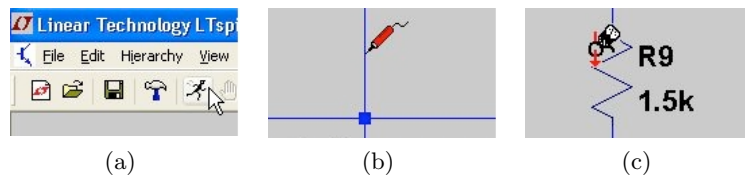


Abb. 2.15. Schritte einer Simulationsanalyse: (a): Starten der Simulation. (b): Auswählen der darzustellenden Spannung (Tastkopf). (c): Auswählen der darzustellenden Ströme (Stromzange).

Kurvenarten

Für Anwendungen wie die Erzeugung von Ortskurven sind auch andere Diagrammeinstellungen möglich. Diese lassen sich auswählen, wenn man mit der linken Maustaste auf die Y-Achse des Plots klickt:

1. Bode: Hiermit können Bodediagramme gezeichnet werden. Durchgezogene Linien zeigen die Amplitude, gestrichelte Linien die Phase. Amplitudenwerte können in dB (Standard in LEN), linear oder logarithmisch dargestellt werden. Durch Klick auf die X-Achse kann man zudem eine logarithmische (Standard in LEN) oder lineare Skalierung der Frequenzachse einstellen.
2. Nyquist: Hiermit können Ortskurven gezeichnet werden. Damit werden in dieser Diagrammart die Werte in Real- und Imaginärteil aufgespalten. Ortskurven der Impedanz oder Admittanz lassen sich in der Diagrammanzeige erzeugen, indem man komplexe Spannungen und Ströme durcheinander dividiert (typische mathematische Zeichen sind erlaubt: *, /, -, +). Eine entsprechende Kurve fügt man dem Diagramm dabei hinzu, indem man über das Menü der rechten Maustaste "Add Trace" auswählt. Das Dialogfenster zur Formeleingabe zeigt die Abb. 2.16. Es bezieht sich auf die Schaltung in Abb. 2.13.

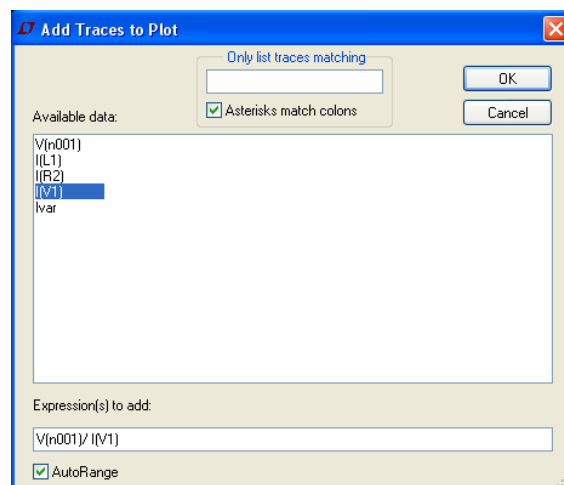


Abb. 2.16. Ortskurve der Impedanz: Quotient aus Spannung und Strom an der Quelle in Abb. 2.13.

3. Cartesian: Diese Einstellung plottet getrennt den Realteil und Imaginärteil.