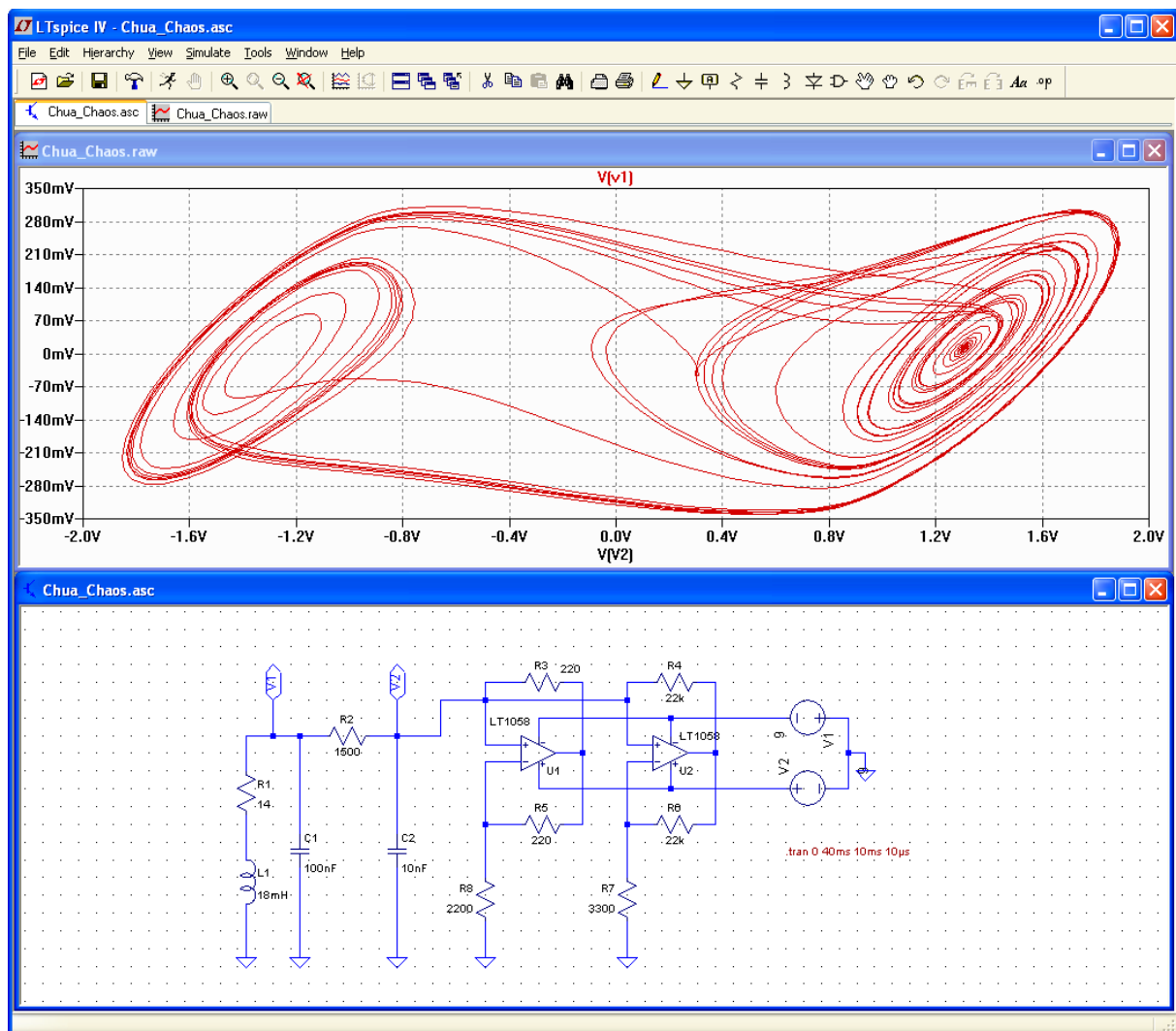




Schaltungssimulation mit LTspice (IV)



Physical implementation of chaos (Prof. Leon Chua, University of California, Berkeley)



• Inhaltsverzeichnis

Schaltungssimulation mit LTspice (IV).....	1
1 Vorbemerkungen.....	3
1.1 LTspice - Lizenz und Distribution (Herstellerangaben).....	3
1.2 Anregungen und Verbesserungsvorschläge.....	3
2 Überblick über die wichtigsten Simulationsarten.....	5
3 Oberfläche - Erstellen einer neuen Simulation.....	6
4 Schaltplan zeichnen.....	7
4.1 Bibliotheken.....	7
4.2 Bauteile.....	7
4.3 Signalquellen.....	8
4.4 Verbindungen.....	8
4.5 Bezugspotentiale.....	8
4.6 Elemente entfernen (löschen).....	8
4.7 Bauteil-Attribute, Namen und Werte.....	9
4.8 Netz-Namen (Labels).....	10
4.9 Einfügen von Kommentaren und Zeichnungselementen.....	10
4.10 Einbinden von zusätzlichen Simulations-Modellen.....	10
4.11 Benutzerdefinierte Parameter und funktionen.....	10
5 Schaltungen simulieren.....	11
5.1 Anlegen eines Simulations-Kommandos.....	11
5.2 Simulation (Berechnung) starten.....	11
6 Simulationsergebnisse graphisch darstellen.....	11
6.1 Im Schaltplan auswählbare Signale.....	12
6.2 Darstellung von Funktionen (Übertragungsf. , Impedanzen).....	12
6.3 Darstellungsmodi einfacher Signale (DC Signale).....	13
6.4 Darstellung komplexer Signale (AC Signale).....	13
6.5 Benutzerdefinierte Funktionen und Parameter / Plot Definitions File	13
7 Ausmessen der graphischen Ausgabe (Cursor).....	14
7.1 Mess Cursor.....	14
7.2 Maus Cursor.....	14
8 Formatieren der Ausgabe.....	14
8.1 Achsenskalierung.....	14
8.2 Zusätzliche Plots.....	14
8.3 Einfügen von Kommentaren und Zeichnungselementen.....	15
8.4 Abspeichern der Einstellungen des Ausgabefensters.....	15
9 Dokumentation / Übername in externe Dokumente.....	15
10 Beispiele.....	16
10.1 Arbeitspunkt / Operating Point.....	16
10.2 DC Sweep	17
10.3 AC Sweep (Klein-Signal-Analyse).....	18
10.4 Time Domain (Transient) (Groß-Signal-Analyse).....	19
10.5 Messreihen - Parametrische Analysen.....	21



1 Vorbemerkungen

LTspice ist eine Weiterentwicklung des SPICE-Programms (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), das an der University of California in Berkeley, USA 1972 entwickelt wurde. Das führende „LT“ steht für den Hersteller „Linear Technology“, der diese Software kostenfrei zur Verfügung stellt. Die Bibliotheken enthalten vornehmlich Bauteile dieses Herstellers und Standardtypen wie Widerstände, Kondensatoren, Spulen, Dioden ...

Die Software hat prinzipiell keine Einschränkungen bezüglich der Komplexität der zu simulierenden Schaltung. Zusätzliche „SPICE“ Bauteil Bibliotheken (anderer Hersteller) können eingebunden werden.

1.1 LTspice - Lizenz und Distribution (Herstellerangaben)

1.1.1 Can I re-distribute the software?

Yes, you can distribute the software freely whether you are a Linear Technology customer or not. See the license section for more details.

Technical support for non-Linear Technology customers is purely discretionary.

1.1.2 Is it a shareware, freeware or demo?

This program is not a shareware or a demo.

It is fully functional freeware.

The purpose of this software is to help our customers use our products.

It can also be used as a general-purpose circuit design package with schematic capture and SPICE simulation.

We do encourage students using the program to become familiar with the analog design process.

We cannot guarantee support for non Linear Technology related program usage, but we'll fix all general program bugs and appreciate such reports.

We do extensive in-house testing and believe the program has superior convergence capability.

There are no known outstanding bugs.

1.2 Anregungen und Verbesserungsvorschläge

Ziel dieser Kurzreferenz ist es, eine leicht verständliche Anleitung für Studenten zur Verfügung zu stellen. Diese sollen sich damit „selbstständig“ in die Schaltungs-Simulation einarbeiten können.

Vorschläge wie dies weiter verbessert werden könnte sind höchst willkommen.

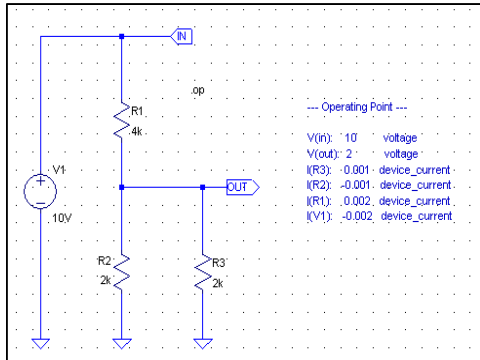
Am besten entsprechend dem hier vorliegenden Layout ausarbeiten und per e-mail an:

schilling@hs-ulm.de



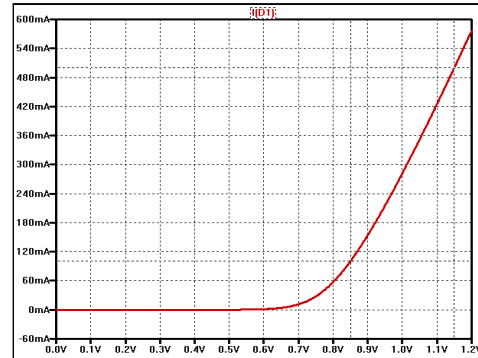
2 Überblick über die wichtigsten Simulationsarten

SPICE bietet verschieden Simulationsarten um Schaltungen zu untersuchen. In dieser Kurzreferenz werden die wichtigsten Basisarten anhand von Beispielen vorgestellt.



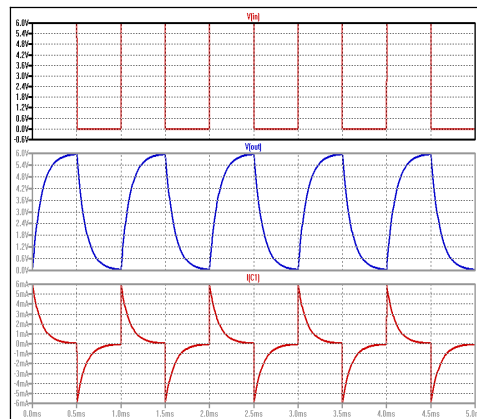
DC op pnt:

- Arbeitspunktanalyse (operation point) bei fixen Werten aller DC Quellen.



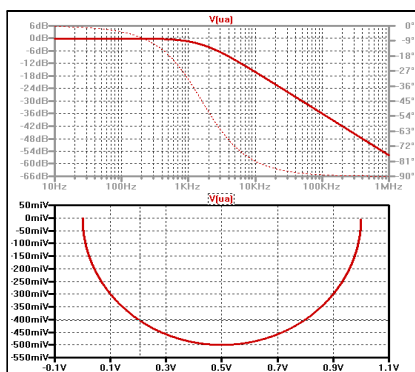
DC Sweep:

- Serie von Arbeitspunktanalysen durch Variation einer oder mehrerer Quellen.
- Erzeugung von Kennlinien (z.B. Diode)



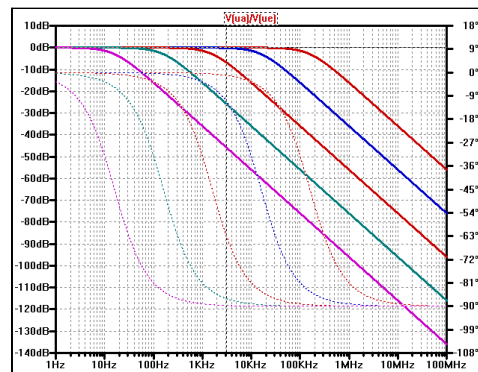
Transienten Analyse:

- für Vorgänge im Zeitbereich



AC Analyse:

- Kleinsignal-Wechselstrom-Analyse
- für frequenzabhängiges Verhalten




Parametrische Analysen:

- Mehrfache Ausführung einer Analyse bei Variation eines Parameters

3 Oberfläche - Erstellen einer neuen Simulation

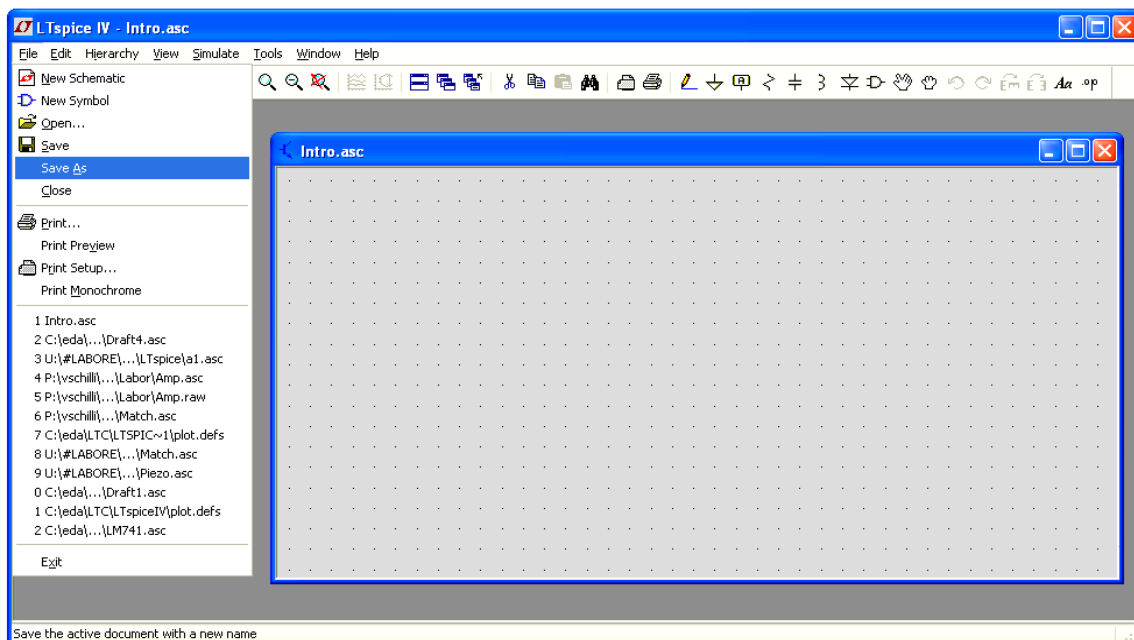
Das Programm wird mit | **Start** | **Programme** | **LTspiceIV** | **LTspiceIV v.4.xxx** | gestartet. Die Oberfläche enthält die Menüleiste, die Tool-leiste für die wichtigsten Funktionen sowie eine Statusleiste (unten) zur Anzeige von zusätzlichen nützlichen Informationen.



Mit | **File** | **New Schematic** | oder  wird ein neues Fenster geöffnet, welches die Zeichenfläche für den zu simulierenden Schaltkreis darstellt. Das Fenster kann über die üblichen Steuerelemente minimiert, maximiert und verschoben werden.

Dem neu angelegten Plan wurde automatisch ein Dateiname „**Draft x .asc**“ zugewiesen. Beim einfachen Speichern würde diese Datei im Installationsverzeichnis von LTspice landen.

Deshalb bitte den (noch leeren) Plan am besten gleich unter einem sinnvollen Namen und an einem sinnvollen Ort speichern, um die Vermüllung der Programmverzeichnisse zu verringern und die Chance die Simulation gegebenenfalls wieder zu finden zu erhöhen.




Die letzten geöffneten Dokumente werden als „Historie“ unten im Menü | **File** | angezeigt. Dies erleichtert (bei sinnvoller Benennung ;-)) das Auffinden vorhergehender Simulationen.

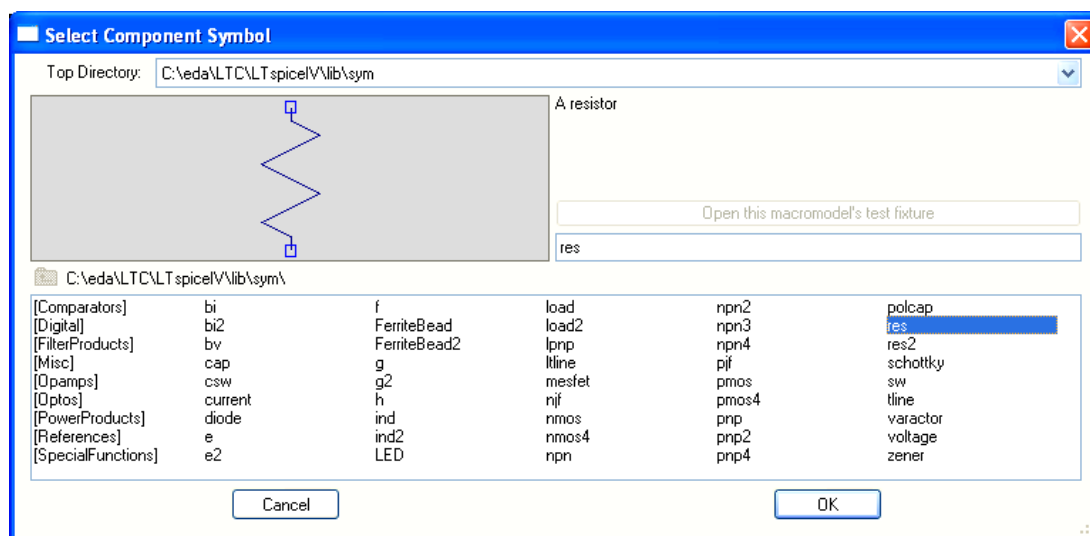
4 Schaltplan zeichnen



4.1 Bibliotheken

Die Standard Bibliotheken, aus denen Bauelemente ausgewählt werden können, liegen im **Installationsverzeichnis** von LTspice unter ...\\LTspiceIV\\lib\\sym. Als weitere Quelle kann auch noch das Verzeichnis ausgewählt werden, in welchem der Schaltplan abgespeichert wurde. Eventuelle zusätzliche Bibliotheken sollten also in einem der beiden Pfade abgelegt werden.

Zugriff auf die Bauteilbibliotheken erhält man über das Menü | **Edit** | **Component** | , die Funktionstaste **[F2]** oder das Symbol  in der Tool-leiste.







Die Bauteile und auch gegebenenfalls die Unterverzeichnisse im ausgewählten Bibliothekspfad werden unten im Bibliotheksbrowser angezeigt.



4.2 Bauteile

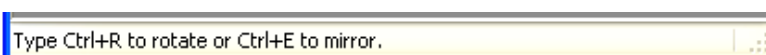
Mit der Maus das benötigte Bauteil in der Bibliothek  auswählen.

Im grauen Fensterteil erscheint dann das Symbol für die graphische Darstellung des Bauteils und rechts daneben eine kurze Beschreibung mit dem Namen des Bauteils.

Die Standardtypen für R, C, L und Dioden können auch direkt über die Symbole     in der Tool-leiste oder die Tasten **[R]**, **[L]**, **[C]**, **[D]** ausgewählt werden.)

Nach Bestätigung des Dialogs mit „OK“ kann das Bauteil auf dem Zeichenblatt abgelegt werden. Während des Bewegens kann das Bauteil mit der Tastenkombination **[Ctrl+R]** gedreht und mit **[Ctrl+E]** gespiegelt werden.

Diese Tastenkombinationen werden während des Bewegens auch unten in der Statusleiste von LTspice angezeigt !



Der Modus zum Hinzufügen von Bauteilen kann mit der **[ESC]** Taste oder der rechten Maustaste beendet werden.



4.3 Signalquellen


Signalquellen befinden sich in der gleichen Bibliothek  und werden genauso behandelt wie Bauteile. Die wichtigsten Standard Quellen haben die Namen „*voltage*“ und „*current*“.

Zusätzlich sind noch einige andere und auch gesteuerte Quellen vorhanden.
Bei Bedarf oder Gelegenheit einfach mal die Bibliothek durchstöbern und in der Beschreibung rechts nachlesen was es da so alles gibt.



4.4 Verbindungen

Wenn alle Bauteile der Schaltung platziert sind, kann man sie verdrahten.

Dazu wird der Befehl „Wire“ aus dem Menü | *Edit* | *Draw Wire* | die Funktionstaste *[F3]* oder der Button  in der Tool-leiste benutzt.

Der Mauszeiger wechselt dann zum Fadenkreuz, welches man auf einem Anschluss des Bauteils platziert und die linke Maustaste drückt um die Verbindung zu starten.

Durch jeweiliges Klicken mit der linken Maustaste kann man eine Ecke erzeugen um die Zeichnungsrichtung zu ändern.

Linke Maustaste auf einem Anschluss beendet die Verbindung am jeweiligen Anschlusspin.

Rechte Maustaste oder *[ESC]* beendet die Verbindung an der letzten Ecke.

Die freien Anschlüsse an Bauteilen sind durch ein kleines, nicht ausgefülltes Quadrat gekennzeichnet, das verschwindet sobald ein Anschluss mit einer Verbindung belegt wird. Bauteile sollten immer mit dem *Wire* Befehl verbunden werden und nicht durch das direkte Übereinanderlegen der Anschlüsse !


Verbindungen von sich kreuzenden „Wires“ werden durch ausgefüllte quadratische Symbole gekennzeichnet.



4.5 Bezugspotentiale




**Spice-Simulationen funktionieren nicht ohne Bezugspotential (Ground) !
Es ist zwingend notwendig, dass jeder analoge Knoten einen Gleichspannungspfad zu einem Bezugspotential besitzt.**

Bezugspotentiale werden über das Menü | *Edit* | *Place GND* | , die Taste *[G]* oder den Button  in der Tool-leiste hinzugefügt.



4.6 Elemente entfernen (löschen)

Das Löschen von Schaltungselementen funktioniert in gleicher Weise wie das Hinzufügen und unterscheidet sich insofern von der Bedienung in Texteditoren oder dergleichen. Das heißt, man wechselt zuerst in den entsprechenden Modus (hier das Löschen) und wählt dann das Objekt aus, welches entfernt werden soll.


In den Löschmodus gelangt man über | *Edit* | *delete* | , Die Tastenkombination *[CTRL+X]* , die Funktionstaste *[F5]* , die *[Del]* Taste auf der Tastatur oder den Button  in der Tool-leiste. Der Mauszeiger verwandelt sich dann in ein Scherensymbol um den Lösch-Modus anzuzeigen.



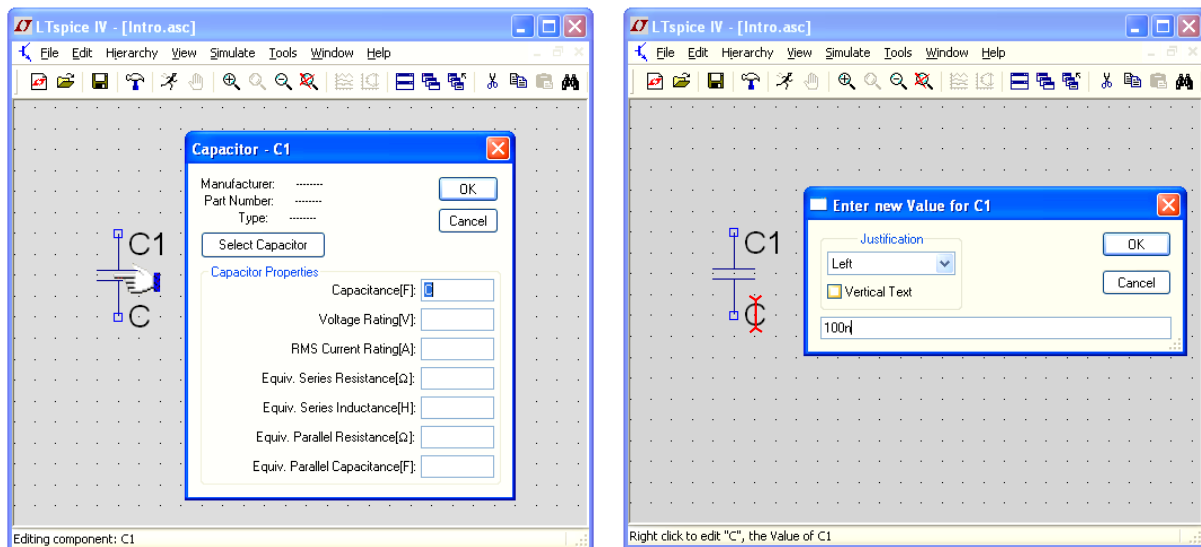
Einzelelemente können durch anklicken, Gruppen durch Aufziehen eines Fensters, mit der Maus gelöscht werden.

4.7 Bauteil-Attribute, Namen und Werte

Der Aufbau der Schaltung ist abgeschlossen, wenn Namen und Werte der Bauteile korrekt eingetragen sind. Dialoge zum Ändern der Attribute werden **mit der rechten Maustaste** aufgerufen, wenn sich der Maus-Cursor über einem Objekt befindet.

Der Editor muss sich dabei im Grundmodus befinden. Zu erkennen ist dieser Modus an dem kleinen Kreuz als Maus-Cursor der sich zur Hand  ändert, wenn er über ein Graphisches Objekt geführt wird.

Bewegt man den Cursor über einen Textelement, ändert sich die Form ähnlich einem „I“



Befindet sich der Editor in einem der andern Modi (Add, Cut, Move ...) kann man mit **[ESC]** oder der rechten Maustaste in den Grundmodus gelangen.

4.7.1 Bei der Eingabe der Bauteilwerte sind einige Punkte zu beachten:

- Dezimalzahlenwerte sind mit **Punkt, nicht mit Komma** zu trennen z.B. 2.7k
- Namen und Werte dürfen **keine Leerzeichen** enthalten.
- Spice unterscheidet nicht zwischen Groß- und Kleinschreibung z.B. (M = m = Milli.)



- **Einheiten dürfen nur zugefügt werden, wenn sie nicht zu Konflikten mit den Zehnerpotenzen führen. (→ kein F für Farad ...)**


4.7.2 In LTSpice benutzte Faktoren:

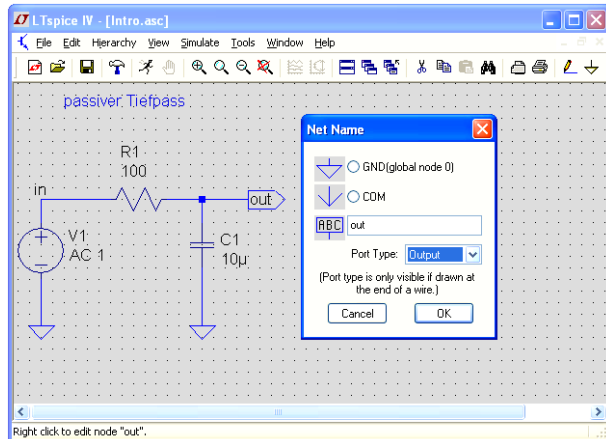
M = m = milli	= 10 ⁻³	K = k	= kilo	= 10 ³
U = u = micro	= 10 ⁻⁶	MEG = meg	= mega	= 10 ⁶
N = n = nano	= 10 ⁻⁹	G = g	= giga	= 10 ⁹
P = p = pico	= 10 ⁻¹²	T = t	= terra	= 10 ¹²
F = f = femto	= 10 ⁻¹⁵			



4.8 Netz-Namen (Labels)

Um die Funktionsweise von Schaltungen zu verdeutlichen, kann man Verbindungen mit selbsterklärenden Namen versehen. Dies erleichtert zudem enorm die spätere Zuordnung der Simulationsergebnisse.

In den Modus zur Vergabe von Netznamen gelangt man über das Menü | **Edit** | **Label Net** | , die Funktionstaste **[F4]** oder den Befehl  in der Tool-leiste.



Netznamen am freien Ende einer Verbindung können hier zudem noch mit Symbolen versehen werden, welche den Typ des Signals veranschaulichen (Eingang, Ausgang ...)

4.9 Einfügen von Kommentaren und Zeichnungselementen

Das Menü | **Edit** | **Draw** | stellt verschiedene Elemente zur Ausgestaltung des Schaltplanes zur Verfügung.

4.10 Einbinden von zusätzlichen Simulations-Modellen

4.11 Benutzerdefinierte Parameter und funktionen

Syntax: `.func <name>([args]) {<expression>}`


Example: `.func Pythag(x,y) {sqrt(x*x+y*y)}`

The `.param` directive allows the creation of user-defined variables. This is useful for associating a name with a value for the sake of clarity and parameterizing subcircuits so that abstract circuits can be saved in libraries

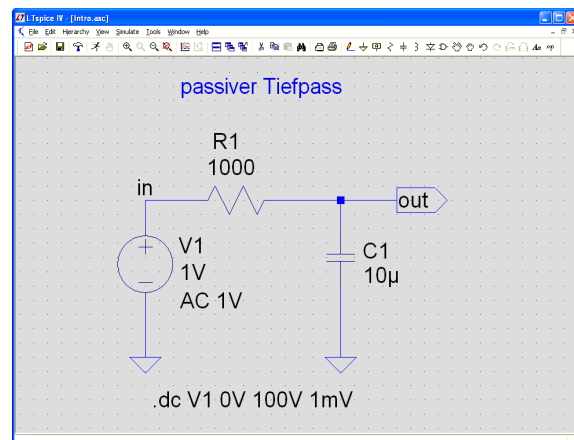
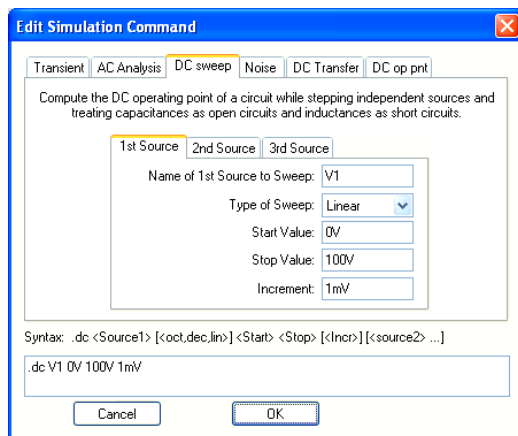
5 Schaltungen simulieren



5.1 Anlegen eines Simulations-Kommandos

Spice ermöglicht verschiedene Simulationsarten, die über Kommandos definiert werden. Diese Kommandos könnten (profunde Kenntnisse vorausgesetzt) über den Befehl , das Menü | **Edit** | **Spice Direktive** | oder die Taste **[S]** als Textzeile eingegeben werden.

Einfacher und übersichtlicher ist dies auch im Dialog | **Simulate** | **Edit Simulation Cmd** | möglich, in welchem mehrere Analysetypen mit verschiedenen Optionen zur Auswahl stehen. Aus den im Dialog eingegebenen Parameter wird das resultierende Kommando automatisch für den Benutzer erstellt und mit „OK“ zur Platzierung im Schaltplan bereitstellt.



Die verschiedenen Analysetypen werden unten kurz anhand von Beispielen beschrieben.



5.2 Simulation (Berechnung) starten

Die Simulation wird über den Befehl | **Simulate** | **Run** | oder über den Schalter  gestartet.

Von den Berechnungen der Simulation werden die Spannungen sämtlicher Knoten und die Ströme aller Maschen erfasst.

Je nach Art der Simulation können die Ergebnisse als Text oder graphisch ausgegeben werden.

5.2.1 Arbeitspunktberechnungen

Die Ergebnisse der Arbeitspunktberechnung werden nicht graphisch, sondern als Text in einem zusätzliche Fenster ausgegeben. In der Ausgabe werden die Spannungen aller Knoten gegenüber dem Bezugspotential und die Ströme durch alle Bauteile aufgelistet



In der Statusleiste werden zusätzlich die Werte für die Objekte unterm Mauszeiger angezeigt.

6 Simulationsergebnisse graphisch darstellen

Bei graphischer Ausgabe erscheint zunächst nur ein leeres Plot-Fenster, in welches dann die gewünschten Signale eingefügt werden können.

(SPICE berechnet ja „alle“ Signale, die sofortige Darstellung „aller“ wäre wenig sinnvoll)

6.1 Im Schaltplan auswählbare Signale

Die Auswahl von graphisch darzustellenden Signalen kann interaktiv durch Auswahl im Schaltplanfenster erfolgen. Nach erfolgter Simulation und einem geöffneten Fenster für die Darstellung bekommt der Mauscursor hier drei neue Erscheinungsformen.



Wird der Mauszeiger über Verbindungen bewegt, ändert sich die Darstellung in die eines Tastkopfes zur Erfassung von **Spannungen**.

Mit der linken Maustaste wird das Spannungssignal dieses Knotens in die graphische Anzeige übernommen.

Differenzsignale können dargestellt werden, wenn die Taste beim ersten Knotenpunkt gedrückt und erst dann losgelassen wird, wenn der Probe-Zeiger über dem zweiten Punkt steht.



Über einem Bauteil (oder Anschluss) wird das Symbol einer Strommesszange angezeigt. Mit der linken Maustaste wird das Signal in die Anzeige aufgenommen.

Bei gedrückter **[Alt]** Taste kann auch der Strom in einem Netzsegment erfasst werden.



Die Verlustleistung eines Bauteils wird durch das Betätigen der **[Alt]** Taste ausgewählt, wenn der Cursor über dem Bauteil steht.

6.2 Darstellung von Funktionen (Übertragungsf. , Impedanzen)

Sollen nicht nur einfache Signale angezeigt werden, sondern z.B. die Übertragungsfunktion **[Ctrl+A]** als das Verhältnis von Ausgangsspannung zu Eingangsspannung, so kann man dem Plot eine über das Menü | **Plot Settings** | **Add Trace** | oder **[Ctrl+A]** eine „Expression“ hinzufügen.

Dieser Ausdruck kann eine einfache Formel wie z.B. $V(out)/V(in)$ sein, oder auch eine bereits definierte eigene Funktion wie $F(V(out),V(in))$ (siehe auch 6.2.1)



SPICE verfügt auch über einige Standardfunktionen wie **sin()**, **cos()** ... die über die Online-Hilfe abgefragt werden können (**[F1]** ;-)

6.3 Darstellungsmodi einfacher Signale (DC Signale)

6.4 Darstellung komplexer Signale (AC Signale)

Bode

Nyquist

Kartesisch

the nature of the plot. For example, for real data, if you move the mouse to the bottom of the screen and left click, you can enter a dialog to change the horizontal quantity plotted. This lets you make parametric plots.

For complex data, you can choose to plot either phase, group delay, or nothing against the right vertical axis. You can change the representation of complex data from Bode to Nyquist or Cartesian by moving the mouse to the left vertical axis of complex data.

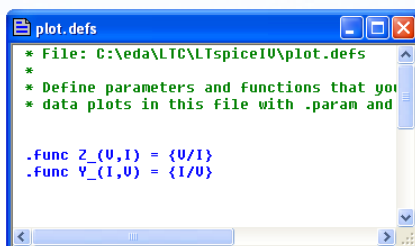
6.5 Benutzerdefinierte Funktionen und Parameter / Plot Definitions File ...

Plot defs file

Syntax: `.func <name>([args]) {<expression>}`

Example: `.func Pythag(x,y) {sqrt(x*x+y*y)}`

The `.param` directive allows the creation of user-defined variables. This is useful for associating a name with a value for the sake of clarity and parameterizing subcircuits so that abstract circuits can be saved in libraries



7 Ausmessen der graphischen Ausgabe (Cursor)

7.1 Mess Cursor

Im Plot Fenster sind bis zu zwei Messcursor vorhanden. Der erste Cursors kann einem Signal durch Klicken mit der linken Maustaste auf den Signalnamen angehängt werden.

Mit der rechten Maustaste können einem Signal über das Drop-Down Menü bei „**Attached Cursor**“ beide Cursor in beliebiger Weise zugeordnet werden (keiner, 1st, 2nd oder 1st & 2nd)

Die Cursor können mit der Maus oder auch mit den Tasten [←], [→] gesteuert werden.

Mit der Maus lassen sich die Cursor horizontal, **also nicht auf senkrechten Linien**, ziehen, wenn diese über einen Cursor bewegt wird und dann als Mauscursor die jeweilige Nummer erscheint. Dann die linke Maus-Taste drücken und halten zum ziehen.

Mit den Tasten wird der jeweils zuletzt mit der Maus bewegte Cursor zum nächsten Wert der Simulation gesteuert. (Vorsicht mit der [up] Taste ;-)

7.2 Maus Cursor

Unabhängig von der Benutzung eines speziellen Mess Cursors können auch schnelle Messungen mit der Maus durchgeführt werden.

Die Koordinaten des Mauszeigers werden immer unten links in der Statusleiste angezeigt.

Durch Aufziehen eines Fensters (wie beim Zoomen) können Differenzen gemessen werden.



Zoom wird nicht unbeabsichtigt ausgeführt, wenn vor dem Loslassen der linken Maustaste die Taste **[Esc]** oder die rechte Maustaste gedrückt wird. Die Ansicht bleibt dann unverändert.

8 Formatieren der Ausgabe

8.1 Achsenskalierung

Die Skalierung der Achsen kann über das Menü | **Plot Settings** | **Manual Limits** | global für für max. 2 Y-Achsen und die X-Achse eingestellt werden.



Wenn der Mauscursor über der Skala einer Achse steht, und sich in ein Lineal verwandelt, kann durch Klicken mit der linken Maustaste das Einstellungsmenü für diese Achse aufgerufen werden.

8.2 Zusätzliche Plots

Haben die in der Grafik gezeigten Kurvenzüge verschiedene Größen, z.B. durch wenig ausgeprägte Amplituden, dann lassen sie sich nicht richtig betrachten. Sie können dazu in einem zweiten, separaten Plot untergebracht und dadurch unabhängig voneinander skaliert werden.

Das Einfügen eines weiteren Plots geschieht über das Menü | **Plot Settings** | **Add Plot Pane** | das Löschen über | **Plot Settings** | **Delete Active Pane** |.



Signale lassen sich durch Ziehen mit der Maus zwischen den Plots verschieben. Wird beim Verschieben **[Ctrl]** gedrückt, so wird eine Kopie des Signals erzeugt.

8.2.1 Getrennte X-Achsen

Bei der Verwendung von mehreren Plots können auch unterschiedliche Skalierungen für die X-Achsen verwendet werden. Dies ist z.B. sinnvoll wenn gleichzeitig ein Signal im Überblick und im Detail (Zoom) dargestellt werden soll. Dazu muss der Haken der Checkbox im Menü | **Plot Settings** | **Sync. Horz. Axes** | entfernt werden.

8.3 Einfügen von Kommentaren und Zeichnungselementen

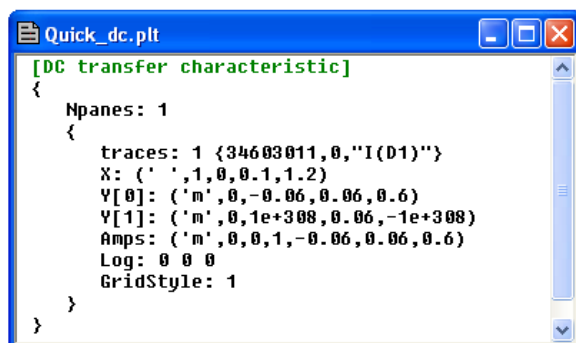
| **Plot Settings** | **Notes & Annotations** | stellt verschiedene Elemente zur Ausgestaltung des Plots zur Verfügung. Da die Plots zur Dokumentation jedoch meist als Bitmap in ein externes Dokument eingefügt werden, ist es meist einfacher und flexibler eventuelle Zusätze auch über die externen Software einzufügen.



| **Plot Settings** | **Notes & Annotations** | **Label Curs. Pos.** | kann genutzt werden um einen Punkt auf einer Kurve inklusive den zugehörigen Werten zu markieren.

8.4 Abspeichern der Einstellungen des Ausgabefensters

Die Einstellungen der im Waveform Viewer angezeigten Kurven, können im Menü | **Plot Settings** | **Save Plot settings** | für eine spätere Wiederverwendung gespeichert werden. Erzeugt wird dabei eine Textdatei mit der Endung „.plt“, die alle Informationen enthält um das Ausgabefenster wieder herzustellen.



| **Plot Settings** | **Open Plot Settings File** | wird zum Laden von zuvor abgespeicherten Einstellungen eingesetzt.

| **Plot Settings** | **Reload Plot Settings** | kann zum Wiederherstellen temporär veränderter Einstellungen verwendet werden.

9 Dokumentation / Übername in externe Dokumente

Die einfachste Möglichkeit Schaltungen sowie die Ausgabeplots der Simulationsergebnisse in andere Dokumente zum Zweck der Dokumentation zu übernehmen, bietet das Menü | **Tools** | **Copy bitmap to Clipboard** |.

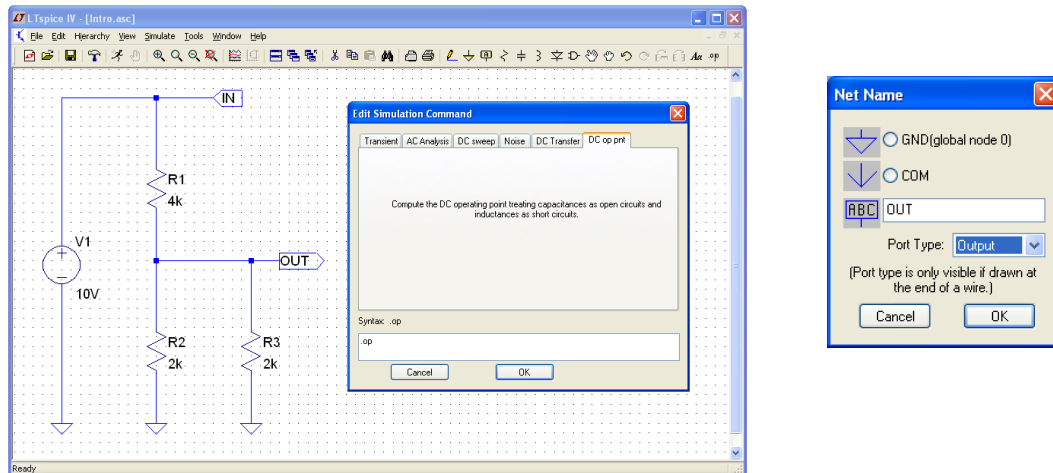
Hier wird der komplette sichtbare Bereich (auch eventuelle andere Fenster ;-), der sich innerhalb des aktiven Fensters befindet als Bitmap in die Zwischenablage kopiert.




10 Beispiele

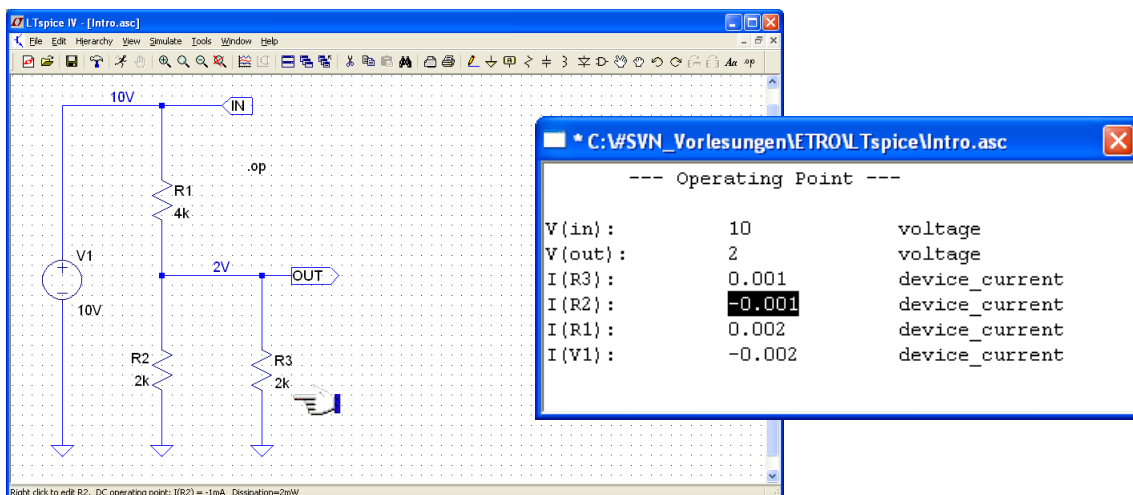
10.1 Arbeitspunkt / Operating Point

Berechnung des Gleichstrom-Arbeitspunktes für festgelegte DC Werte aller Strom- und Spannungsquellen im Netzwerk. (wird auch bei allen anderen Analysearten durchgeführt)

Zur Durchführung der Analyse wird mindestens eine Quelle mit einem „DC“ Parameter benötigt.



- Zeichnen des Schaltkreises mit $[R]$ esistor, Quelle „*voltage*“ und $[G]$ round.
- Editieren der Parameter von V1  **[DC Value [V]]** und Rx ( rechte Maustaste)
- Zufügen von Netzenamen 
- Anlegen der SPICE Direktive | *Simulate* | *Edit Simulation Cmd* |



Die Ergebnisse der Arbeitspunktberechnung werden nicht graphisch, sondern als Text in einem zusätzliche Fenster ausgegeben. In der Ausgabe werden die Spannungen aller Knoten gegenüber dem Bezugspotential und die Ströme durch alle Bauteile aufgelistet



In der Statusleiste werden zusätzlich die Werte für die Objekte unterm Mauszeiger angezeigt.



Die Richtung (das Vorzeichen) der Ströme durch Bauteile wird beeinflusst durch deren Einbaurichtung ! (vergleiche $I(R2)$ mit $I(R1)$)

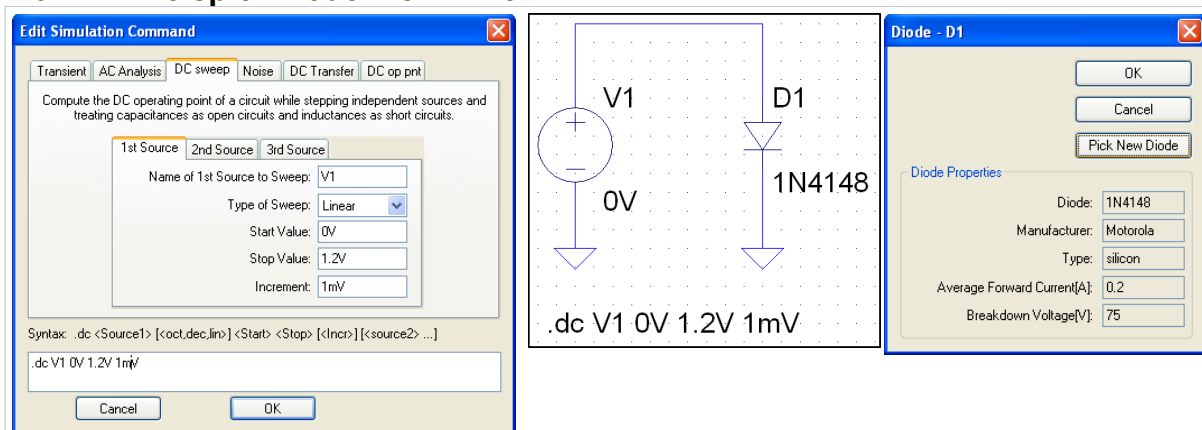
10.2 DC Sweep

Berechnung von Gleichstrom Kennlinien als Menge von Arbeitspunkten. Strom bzw. Spannung einer Quelle durchlaufen ein Intervall aus diskreten Punkten. Außerdem kann ein globaler Parameter, ein Modell-parameter oder die Temperatur variiert werden.

Zur Durchführung der Analyse wird mindestens eine Quelle mit einem „DC“ Parameter benötigt.



Zu deklarieren sind: Sweep Source, (U, I, Temp.,...), Start value, End value und Increment.

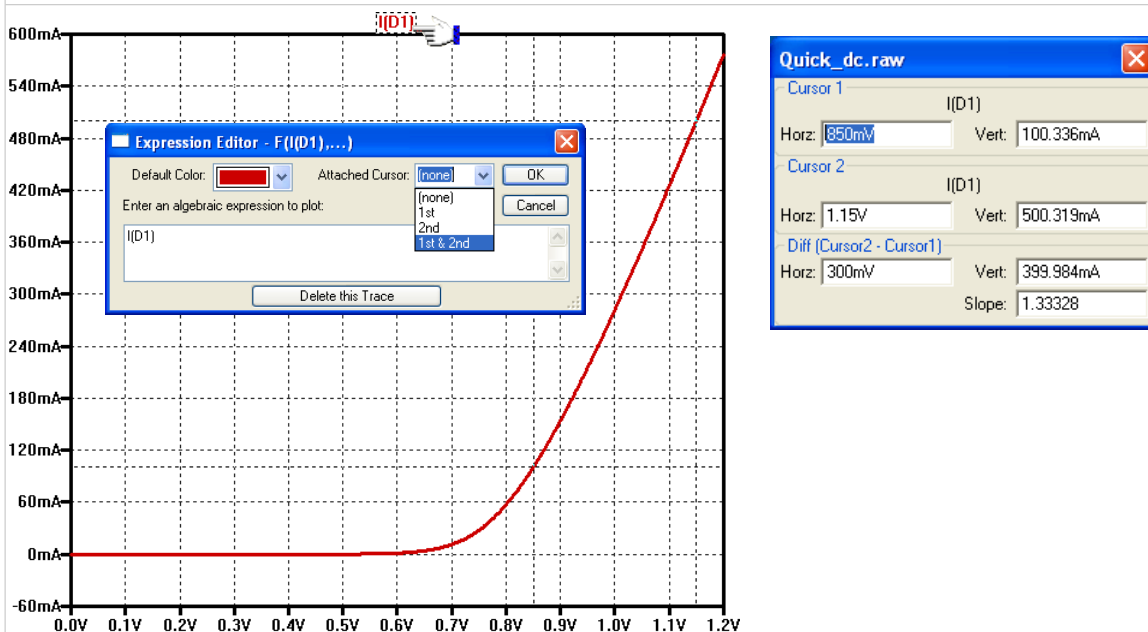
10.2.1 Beispiel Diodenkennlinie







The screenshot shows the LTspice interface with three windows open:

- Edit Simulation Command:** The 'DC sweep' tab is selected. The '1st Source' is 'V1'. The 'Type of Sweep' is 'Linear'. The 'Start Value' is '0V', 'Stop Value' is '1.2V', and 'Increment' is '1mV'. The syntax box shows: `.dc V1 0V 1.2V 1mV`.
- Circuit Diagram:** A DC voltage source V1 (0V) is connected in series with a diode D1 (1N4148). The component values are shown as `.dc V1 0V 1.2V 1mV`.
- Diode - D1 Properties:** The diode is set to '1N4148', 'Motorola', 'silicon', with an 'Average Forward Current[A]' of '0.2' and a 'Breakdown Voltage[V]' of '75'.

- Zeichnen des Schaltkreises mit **[D]** diode, Quelle „voltage“ und **[G]** ground.
- Editieren der Parameter von V1  **[DC Value [V]]** und D1  **[Pick New Diode]**
- Anlegen der SPICE Direktive | **Simulate** | **Edit Simulation Cmd** |



- Starten der Simulation 
- Auswahl des Stromes durch die Diode D1 ( im Schaltkreis oder )
- Zuordnen der Cursor ( rechte Maustaste auf Signalnamen im Plot-Fenster)

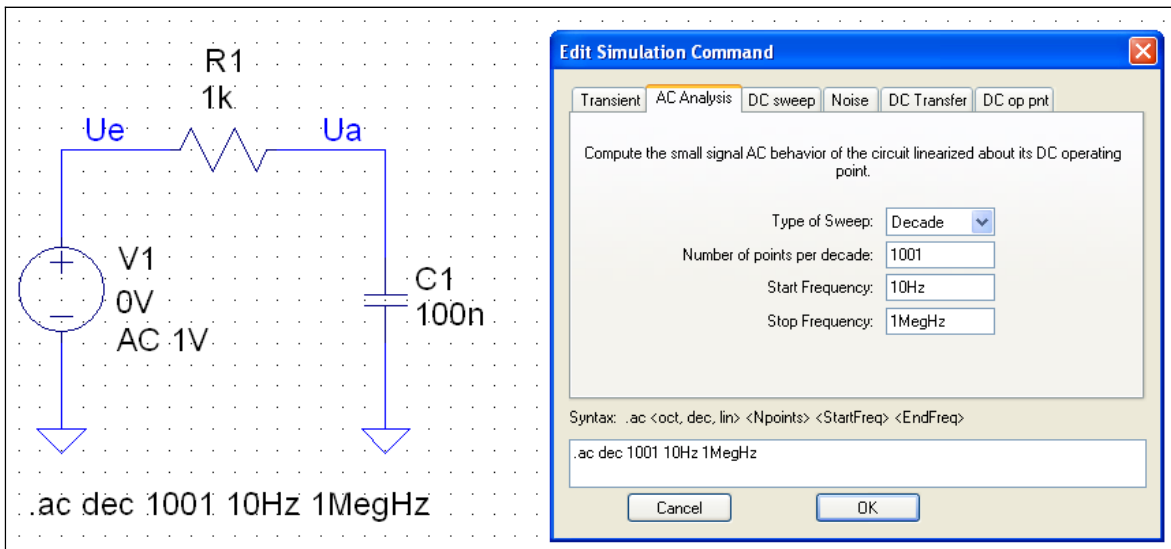
10.3 AC Sweep (Klein-Signal-Analyse)

Bei dieser Analyseart berechnet SPICE die Antwort einer Schaltung auf Änderungen der Frequenz der Quellen. Als Ergebnis werden Ströme und Spannungen nach Betrag und Phase angezeigt, sodass z.B. Bode Diagramme und Ortskurven erzeugt werden können.

Zur Durchführung der Analyse wird mindestens eine Quelle mit einem „AC“ Parameter benötigt.

Zu deklarieren sind: Start-Frequenz, End-Frequenz, Anzahl der Schritte (Auflösung)

10.3.1 Beispiel RC-Tiefpass





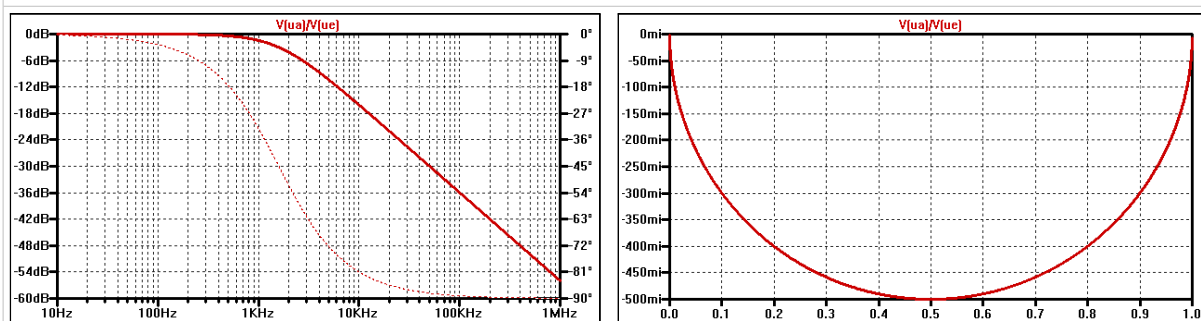
The circuit diagram shows an AC voltage source V1 (0V AC 1V) in series with a resistor R1 (1k) and a capacitor C1 (100n). The input voltage is labeled Ue and the output voltage across the capacitor is labeled Ua. Below the circuit, the SPICE directive is shown: `.ac dec 1001 10Hz 1MegHz`.


The 'Edit Simulation Command' dialog box is open, showing the 'AC Analysis' tab. The settings are:

- Type of Sweep: Decade
- Number of points per decade: 1001
- Start Frequency: 10Hz
- Stop Frequency: 1MegHz

 The syntax field shows: `.ac dec 1001 10Hz 1MegHz`.

- Zeichnen des Schaltkreises mit **[R]**esistor, **[C]**apacitor, Quelle „**voltage**“ und **[G]**round.
- Editieren der Parameter von V1  **[Advanced]**, R1 und C1 ( **rechte Maustaste**)
- Anlegen der SPICE Direktive | **Simulate** | **Edit Simulation Cmd** |



- Starten der Simulation 
- Eingabe der gewünschten Ausgabefunktion $V(u_a)/V(u_e)$ über | **Plot Settings** | **Add Trace** | oder **[CTRL+A]**
- Darstellung als Ortskurve durch Umschalten des Repräsentationsmodus auf „Nyquist“ (linke Maustaste über Y-Achse (Symbol Lineal) → Einstellungsmenü).

10.4 Time Domain (Transient) (Groß-Signal-Analyse)

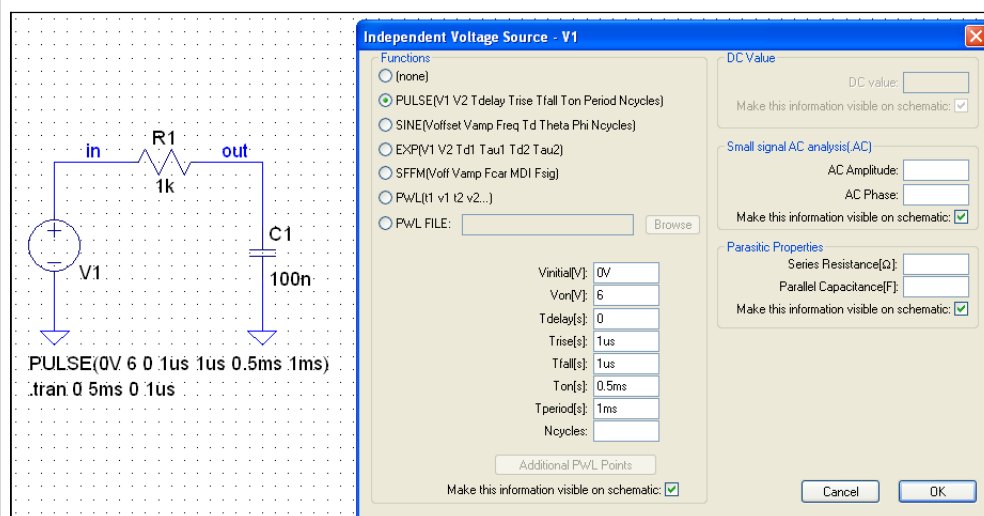
Mit dieser Analyseart werden Schaltungen im Zeitbereich untersucht. Die Ausgabe der Ergebnisse ist ähnlich der auf einem Oszilloskop-Bildschirm.



Die Zeit ist die Laufvariable auf der X-Achse, auf der Y-Achse sind Ströme, oder Spannungen dargestellt.

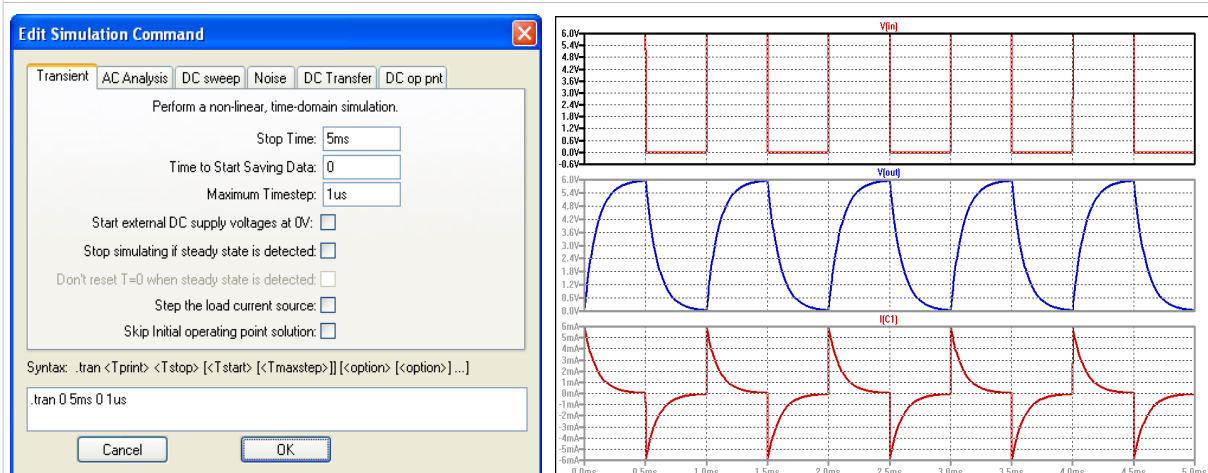
Zur Durchführung der Analyse werden Quellen mit Parametern benötigt, die ein Signal im Zeitbereich definieren.





Für die Analyse muss der Zeitbereich („Stop Time“) deklariert werden.

10.4.1 Beispiel RC-Tiefpass an Rechteckspannung (PULSE)

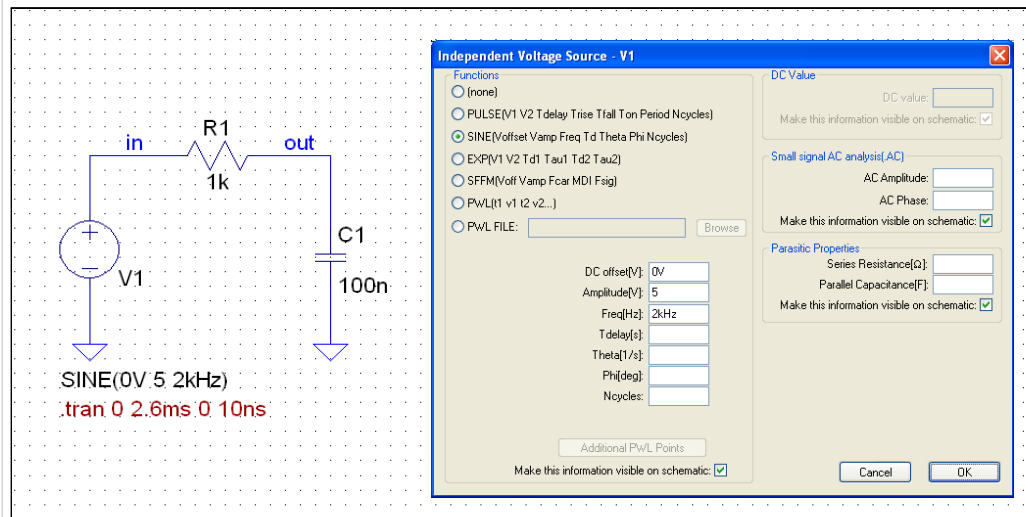




- Zeichnen des Schaltkreises mit **[R]**esistor, **[C]**apacitor, Quelle „**voltage**“ und **[G]**round.
- Editieren der Parameter von V1  **[Advanced]**, R1 und C1 ( rechte Maustaste)

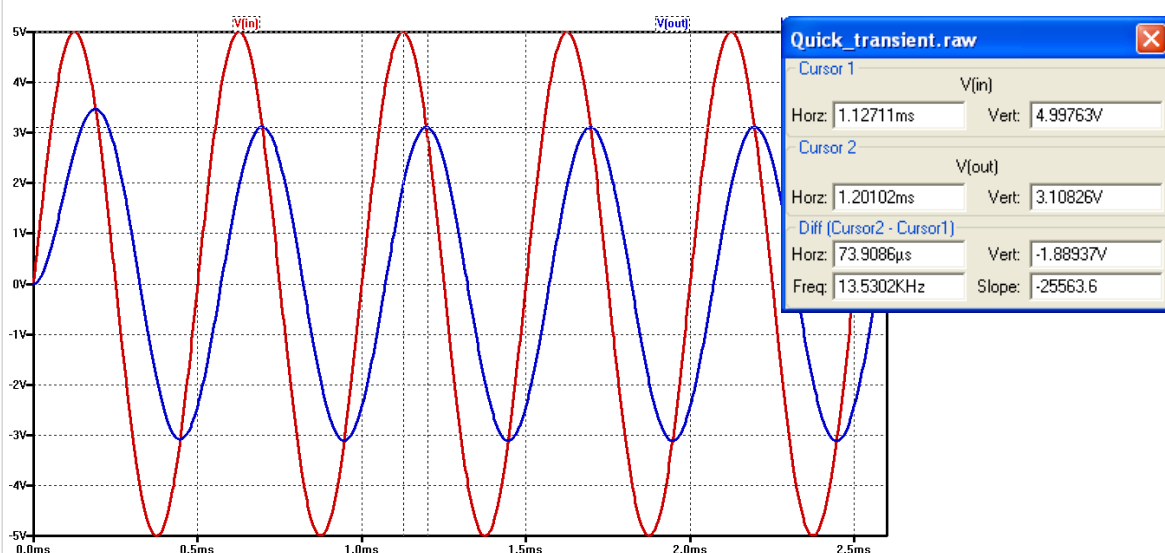






- Anlegen der SPICE Direktive | **Simulate** | **Edit Simulation Cmd** |
- Starten der Simulation 
- Zwei zusätzliche Plots hinzufügen (| **Plot Settings** | **Add Plot Pane** |)
- Auswahl der Spannungen „**in**“ und „**out**“ , sowie Strom durch C1  (oder )

10.4.2 Beispiel RC-Tiefpass an Sinusspannung (VSIN)



- Zeichnen des Schaltkreises mit **[R]**esistor, **[C]**apasitor, Quelle „**voltage**“ und **[G]**round.
- Editieren der Parameter von V1  **[Advanced]**, R1 und C1 ( rechte Maustaste)



- Anlegen der SPICE Direktive | **Simulate** | **Edit Simulation Cmd** |
- Starten der Simulation 
- Auswahl der Spannungen „**in**“ und „**out**“  (oder )
- Zuordnen der Cursor ( rechte Maustaste auf Signalnamen im Plot-Fenster)
- Setzen der Cursor

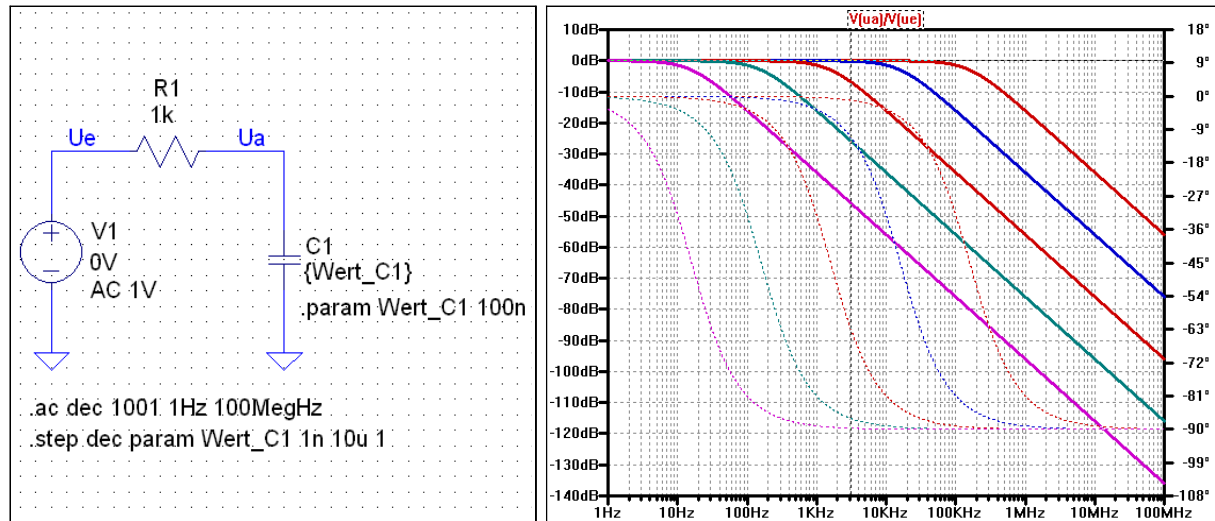
Mit den über die Cursorpositionen ermittelten Werten kann jetzt beispielsweise die Phasenverschiebung ermittelt werden.

$$\begin{aligned}
 \text{Phase}[^{\circ}] &= 360 * \text{Frequenz} * \text{Diff-Horz} \\
 &= 360 * 2\text{kHz} * \sim 74\mu\text{s} \\
 &= \underline{53,28^{\circ}}
 \end{aligned}$$

10.5 Messreihen - Parametrische Analysen

Bei parametrischen Analysen wird eine Analyse (DC, AC, Transient) mehrfach durchgeführt. Dabei wird ein Parameter (oder auch mehrere) der Schaltung verändert. Die Variation wird über die SPICE Directive „*step*“ gesteuert. (Optional auch noch „*param*“)

10.5.1 Beispiel RC-Tiefpass – parametrische AC Analyse



Für die Schaltung wurden AC-Analysen von 1Hz bis 100MHz für verschiedene Werte von C1 durchgeführt.

Um die Variation des Wertes zu ermöglichen muss dieser in eine Funktion (oder einen Zeiger) umgewandelt werden. Dies geschieht, indem man den Wert durch einen neuen Parameter in geschweiften Klammern (z.B. `{Wert_C}`) ändert.

Der neue Parameter kann jetzt mit der Direktive `.step` verändert werden. Dazu ruft man den Eingabedialog über **Edit | SPICE Directive** | oder die Taste **[S]** auf und gibt den Text für die gewünschte Variation ein.

- Als Liste: (durch Angabe der Werte)
`„step param Wert_C1 list 10n 100n 1u“` → 3 Simulationen (10nF, 100nF und 1μF)
- Linear: (Startwert, Endwert, Increment)
`„step param Wert_C1 100n 1u 100n“` → 10 Simulationen (100n, 200n, 300n ...)
- Logarithmisch: (Startwert, Stopwert, Werte per Dekade oder Oktave)
`„step dec param Wert_C1 10n 10u 1“` → 4 Durchläufe (10nF, 100nF, 1uF, 10uF)



Achtung: Wird die Direktive `Step` nicht ausgeführt, ist der Wert_C1 unbekannt
Abhilfe: `.param Wert_C1 100n`



Im Menü **Plot Settings | Select Steps** | können die anzuzeigenden Graphen ausgewählt werden. Im Standardmodus werden alle angezeigt.



Werden Cursor-Messungen durchgeführt, dann kann mit den Tasten **[↑]** **[↓]** zum nächsten Step weiter geschaltet werden. Informationen auf welchem Step der Cursor steht, erhält man durch klicken mit der rechten Maustaste.