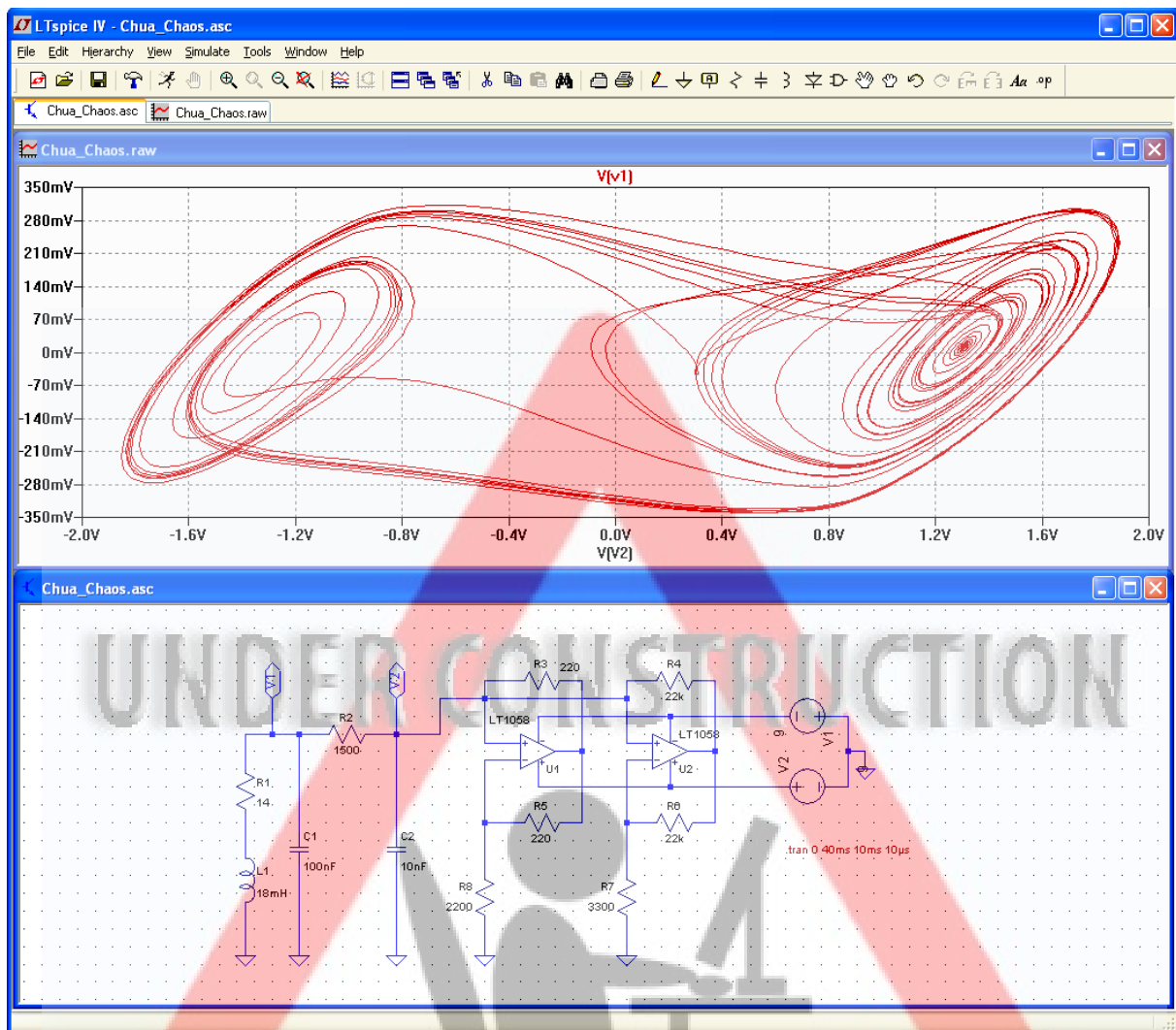


# Schaltungssimulation mit LTspice (XVII)



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

Version 1.0 03/2011  
Version 2.0 09/2016  
Version 2.1 11/2019  
Version 2.2 01/2023  
Version 2.3 06/2023  
Version 3.0 12/2023

Umstrukturierung und Ergänzungen  
kleinere Ergänzungen (thu; Neue / Eigene Bauteile)  
Ausarbeitung Kapitel 10/11/12  
Umstrukturierung und Ergänzungen (8 ↔ 9; editieren)  
Kapitel 13 Beispielschaltungen, kleinere Umstrukturierungen und Ergänzungen

---

## • Inhaltsverzeichnis

Schaltungssimulation mit LTspice (XVII).....	1
1 Vorbemerkungen.....	4
1.1 LTspice Download und Installation.....	4
1.2 LTspice - Lizenz und Distribution (Herstellerangaben F.A.Q.).....	4
1.3 Anregungen und Verbesserungsvorschläge.....	4
2 Überblick über die wichtigsten Simulationsarten.....	5
3 Oberfläche – Bedienung/Hilfe.....	6
3.1 Bedienung / Werkzeuge der Menüleiste.....	6
3.2 Einstellungen / Control Panel.....	7
3.3 Help [F1] / Handbuch.....	7
4 Schaltplan zeichnen.....	8
4.1 Bibliotheken.....	8
4.2 Bauteile.....	8
4.3 Signalquellen.....	9
4.4 Verbindungen.....	9
4.5 Bezugspotentiale.....	9
4.6 Schaltplan modifizieren.....	10
5 Bauteil-Attribute, Netz-Namen, Netzliste, Texte.....	11
5.1 Bauteil Namen und Werte.....	11
5.2 Texte / Kommentare.....	12
5.3 Netz-Namen.....	13
6 Schaltungen simulieren.....	14
6.1 Anlegen eines Simulations-Kommandos.....	14
6.2 Simulation ( Berechnung ) starten.....	14
6.3 Simulation stoppen.....	14
6.4 Arbeitspunktberechnungen (DC op pnt / .op).....	14
7 Simulationsergebnisse darstellen und ausmessen.....	15
7.1 Im Schaltplan auswählbare Signale.....	15
7.2 Darstellung von Funktionen ( Übertragungsf. , Impedanzen ).....	16
7.3 Ausmessen der graphischen Ausgabe (Cursors).....	16
8 Formatieren der Ausgabe / Dokumentation.....	17
8.1 Raster Ein/Aus schalten.....	17
8.2 Mark Data Points.....	17
8.3 Farben der Graphen ändern.....	17
8.4 Achsenskalierung / Darstellungsarten.....	18
8.5 Zusätzliche Plots.....	18
8.6 Getrennte X-Achsen.....	18
8.7 Einfügen von Kommentaren und Zeichnungselementen.....	18
8.8 Dokumentation / Übername in externe Dokumente.....	19
8.9 Abspeichern der Einstellungen des Ausgabefensters.....	19
9 Einsteiger-Beispiele / Analysearten.....	20
9.1 Arbeitspunkt / Operating Point.....	20
9.2 DC Sweep.....	21

---

---

9.3 Time Domain ( Transient ) (Groß-Signal-Analyse).....	22
9.4 AC Sweep (Klein-Signal-Analyse).....	25
9.5 Messreihen - Parametrische Analysen.....	26
10 Model / Symbol / Netlist / Subcircuit / Library.....	28
10.1 Speicherorte von Bauteilmodellen und Bibliotheken.....	28
10.2 Modelle der Spice Basiselemente.....	29
10.3 Schaltplansymbole.....	30
10.4 Netzlisten.....	30
10.5 Subcircuits.....	30
10.6 Bibliotheken / Libraries.....	31
11 Hierarchical-Blocks / Designs mit mehreren Seiten.....	31
11.1 Symbol erzeugen.....	31
12 Neue / Eigene Bauteile einbinden, bzw. anlegen.....	32
12.1 Spice Model hinzufügen.....	32
12.2 Subcircuit hinzufügen.....	34
12.3 Bauteile als Hierarchical-Blocks der Library hinzufügen.....	36
13 Beispielschaltungen.....	37
13.1 Beispiele im .../LTspice/examples/Applications Ordner.....	37
13.2 Beispiele im .../LTspice/examples/Educational Ordner.....	37
13.3 Schalter.....	37
13.4 Transistoren als Schalter / High side – Low Side.....	39
13.5 Operationsverstärker.....	40
13.6 Transformatoren / Übertrager.....	42
13.7 Solarzellen.....	42
14 Ergänzende Informationen und Techniken.....	42
14.1 Benutzerdefinierte Funktionen und Parameter / Plot Definitions File .....	42
14.2 Option uic - Skip initial operating point solution (Transientenanalyse).....	42
14.3 Option plotwinsize=0.....	42
14.4 FFT → GK 6.....	42
14.5 Übertrager → GK x.y, TUM 3.1.....	42
14.6 Gesteuerte Quellen → TUM 3.2.....	42

---

---

# 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 stellte. 2016 wurde Linear Technology von **Analog Devices** aufgekauft. Die Bibliotheken von LTspice 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“ Bibliotheken (*anderer Hersteller*) können eingebunden werden.

## 1.1 LTspice Download und Installation

LTspice kann von der [Herstellerseite](#) bezogen werden. (für Windows, Mac OS X, Linux [Wine](#))

## 1.2 LTspice - Lizenz und Distribution (Herstellerangaben F.A.Q.)

### 1.2.1 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.

### 1.2.2 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.

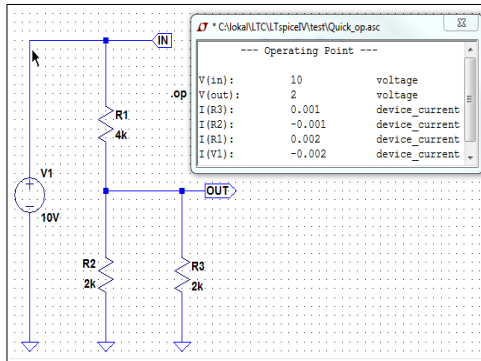
## 1.3 Anregungen und Verbesserungsvorschläge

Ziel dieser Kurzreferenz ist es, eine leicht verständliche Anleitung für Studierende zur Verfügung zu stellen. Diese sollen sich damit „selbstständig“ in die Schaltungssimulation einarbeiten können. Vorschläge wie dies weiter verbessert werden könnte sind höchst willkommen. (e-mail an: [Volker.Schilling-Kaestle@thu.de](mailto:Volker.Schilling-Kaestle@thu.de))

---

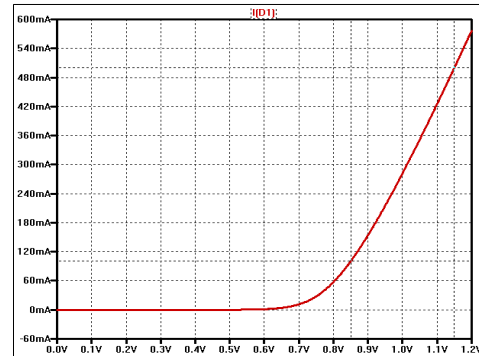
## 2 Überblick über die wichtigsten Simulationsarten

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



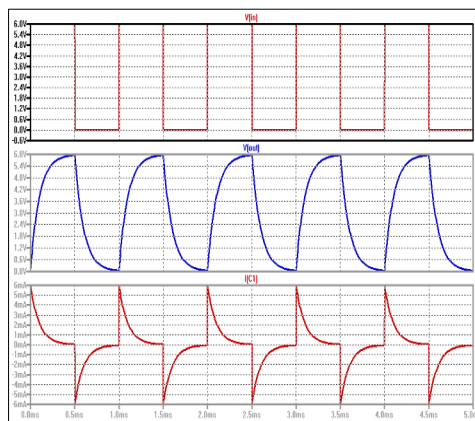
### DC op pnt:

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



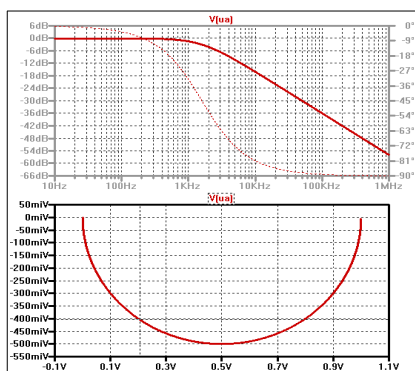
### DC Sweep:

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



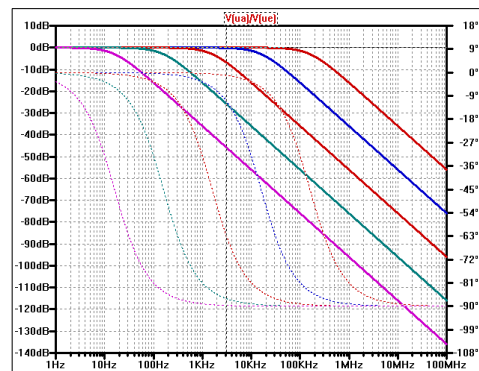
### Transienten Analyse:

- für Vorgänge im Zeitbereich



### AC Analyse:

- Kleinsignal-Wechselstrom-Analyse
- für frequenzabhängiges Verhalten




### Parametrische Analysen:

- Mehrfache Ausführung einer Analyse bei Variation eines Parameters

### 3 Oberfläche – Bedienung/Hilfe

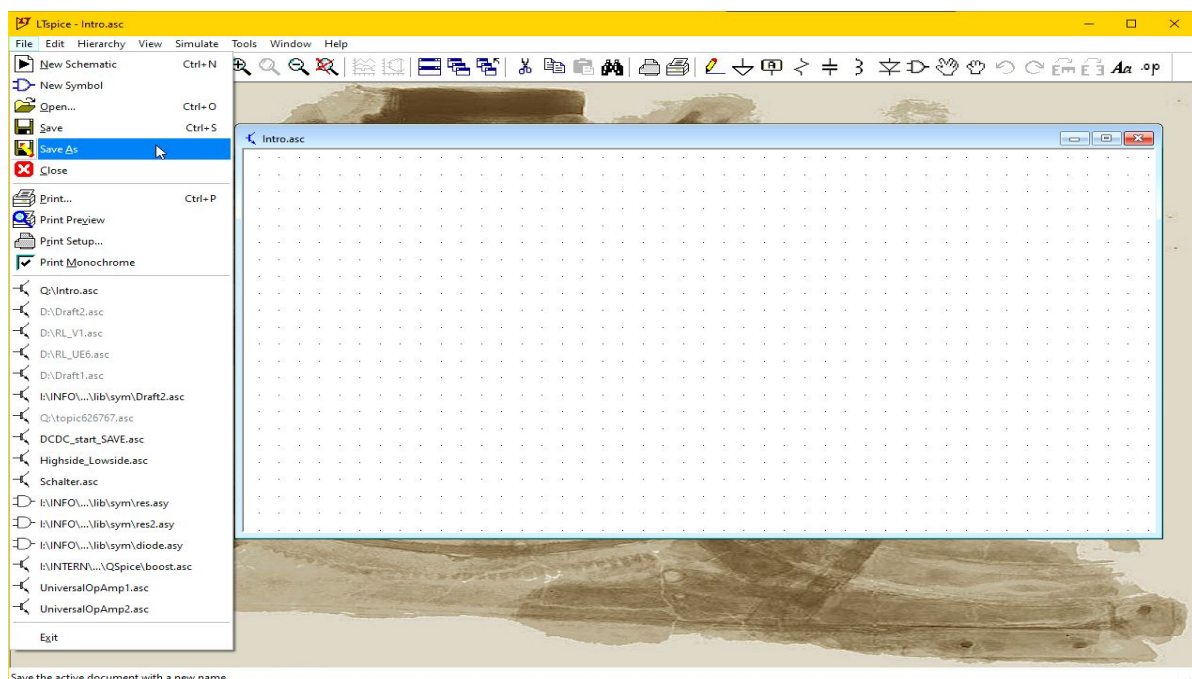
Das Programm wird mit | **Start** | **Programme** | **LTspiceIV** | **LTspiceIV v.4.xxx** | gestartet. Die Oberfläche enthält die Menüleiste, die Tool-leiste für die wichtigsten Funktionen sowie eine Statusleiste (unten) zur Anzeige von zusätzlichen nützlichen Informationen.



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.



Das neu angelegte Design kann, je nach gewählter Darstellung, auch den Innenraum komplett ausfüllen. Die Icons zum Minimieren, Maximieren und Schließen des neuen Fensters erscheinen dann rechts oberhalb der Toolbar in der Menüleiste.



Die letzten geöffneten Dokumente werden als „Historie“ unten im Menü | **File** | angezeigt.

#### 3.1 Bedienung / Werkzeuge der Menüleiste

Die meisten Icons in der Menüleiste sind relativ einfach zu verstehen. Zudem wird ein Hinweis angezeigt, wenn der Mauszeiger eine Weile auf dem entsprechenden Icon steht.


Sinnvoll ist es, sich einige **[Shortcuts]** einzuprägen, welche die Bedienung zumindest für Benutzer die über zwei Hände verfügen erleichtern. (siehe dazu 3.3 Help)

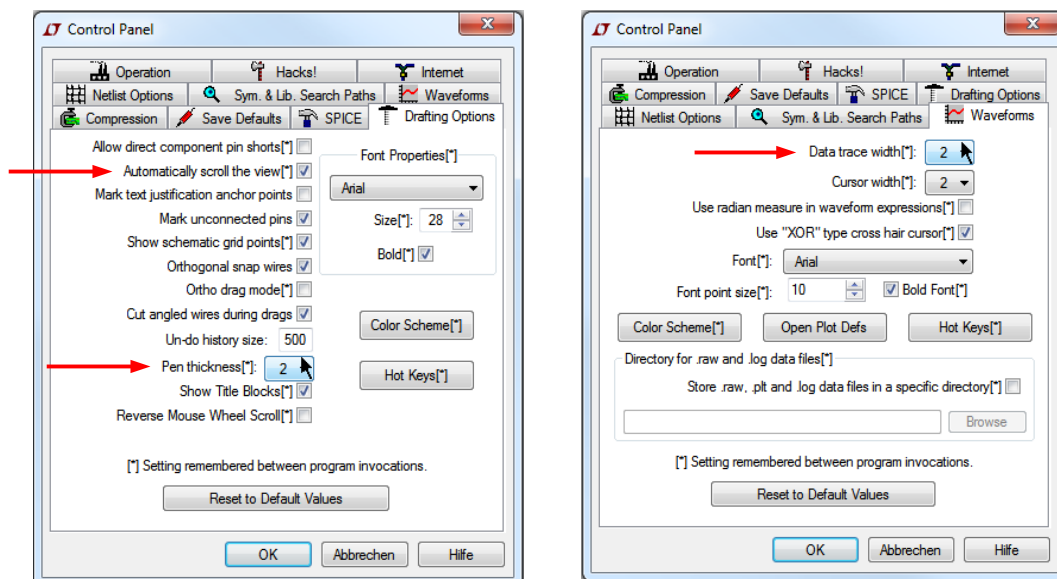


Auch ein Klick der **rechten Maustaste** in einem leeren Bereich hilft oft weiter.

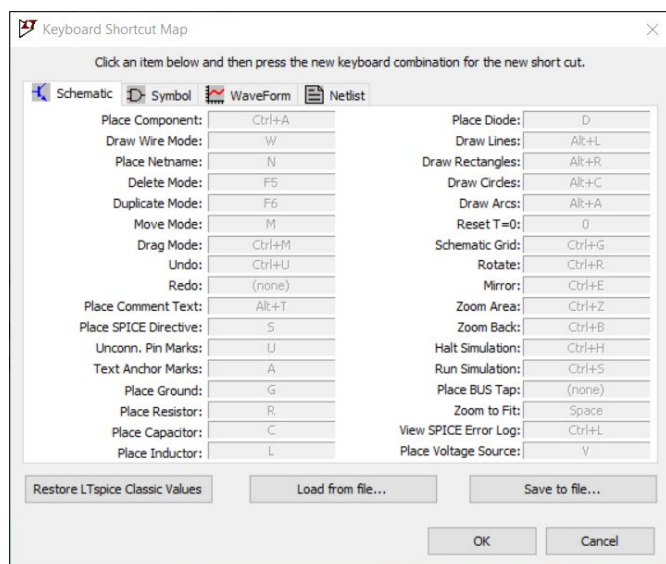


## 3.2 Einstellungen / Control Panel

Im Control Panel, welches unter anderem über das Symbol  in der Menüleiste aufgerufen werden kann, gibt es einige Tabs mit Einstellungsmöglichkeiten zu verschiedenen Themengebieten.



Für Anfänger sind besonders die Tabs **Drafting Options** und **Waveforms** interessant. Hier kann man z.B. Farben, **Linienbreiten** (1->2) und Raster einstellen, oder auch die Tastaturkürzel (**Hot Keys**) nach persönlichen Vorlieben anpassen. Auch das evtl. irritierende **automatische Scrollen** des Fensters kann man hier abstellen. Die anderen Tabs sind dann eher für erfahrenere Anwender geeignet.



In beiden Einstellungsmenüs kann auch die Konfiguration der **Hot Keys[\*]** oder **Keyboard Shortcuts[\*]** aufgerufen werden, um diese seinem persönlichen Geschmack anzupassen, bzw. so einzurichten, dass man sich diese besonders einfach merken kann.

Ab LTspice Version 17.1 besteht auch die Möglichkeit des Im- und Exports der Shortcuts.

## 3.3 Help [F1] / Handbuch

Der bei früheren Versionen vorhandene „User Guide“ ist jetzt komplett in der Hilfe enthalten. Die Hilfe kann über **[F1]** oder **| Help | Help Topics |** aufgerufen werden. Schon bei der ersten Benutzung von LTspice ist es kein Schaden da mal rein zu schauen und sich einen Überblick zu verschaffen. (z.B über die Einstellungsmöglichkeiten im Control Panel oder Shortcuts)




## 4 Schaltplan zeichnen

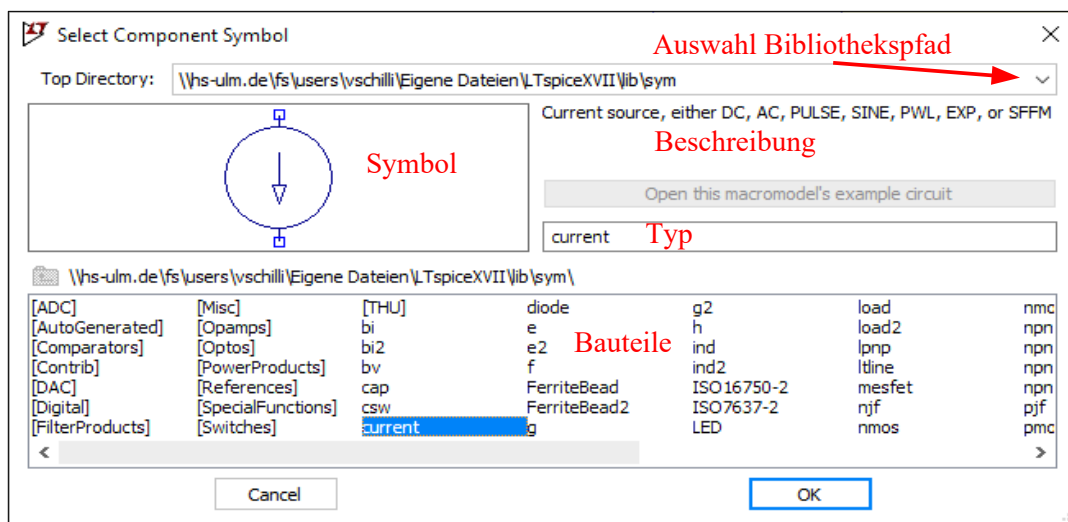


### 4.1 Bibliotheken

Die Bibliotheken der LTspice Installation (*.../LTC/LTspiceXVII/lib*) werden beim ersten Start der Software durch einen neuen Benutzer in dessen Benutzerverzeichnis kopiert und nur diese Kopien werden dann beim Entwurf von neuen Designs verwendet. Unter Windows befinden sich diese Kopien dann z.B. im Pfad: *.../users/<username>/Eigene Dateien/LtspiceXVII/lib*.

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

Wird das benötigte Bauteil in der Bibliothek  mit der Maus ausgewählt, dann erscheint im grauen Fensterteil 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 !

Type Ctrl+R to rotate or Ctrl+E to mirror.

Eine weitere Möglichkeit zum Drehen oder Spiegeln gibt es in der Toolbar.




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 (*e, f, g, h*) vorhanden.


Bei Bedarf oder Gelegenheit einfach mal die Hilfe **[F1]** → *LTspice XVII* → *LTspice* → *Circuit Elements* durchstöbern und in der Beschreibung nachlesen was es da so alles gibt.



**Spannungsquellen** können auch über die Taste **[V]** hinzugefügt werden.



### 4.4 Verbindungen

Dafür 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 eine Verbindung zu starten.

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

Ein Klick mit der linken Maustaste auf einem Anschluss beendet die Verbindung am jeweiligen Anschlusspin.

Klicken mit der rechten 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.**



Die Verbindungen werden normalerweise nur horizontal oder vertikal gezeichnet. Es sind allerdings auch schräge Verbindungen möglich, wenn man während des Zeichnens die Steuerungstaste **[Ctrl]** gedrückt hält.




### 4.5 Bezugspotentiale

**Spice-Simulationen funktionieren nicht ohne Bezugspotential (Ground) !**



**Es ist zwingend erforderlich, dass jeder analoge Knoten einen Gleichspannungspfad zu einem Bezugspotential besitzt.**



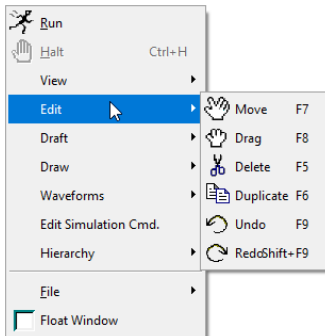
Bezugspotentiale werden über das Menü | **Edit** | **Place GND** | , die Taste **[G]** oder den Button  in der Tool-leiste hinzugefügt.

---

## 4.6 Schaltplan modifizieren

Die Werkzeuge zum editieren eines Schaltplanes können über **Shortcuts**, das **Edit** Menü, die **Symbolleiste** oder über ein Popup-Menü, welches bei einem Rechtsklick im Schaltplaneditor erscheint, ausgewählt werden.

Grundsätzlich wählt man zuerst das Werkzeug und dann das Element, welches man damit modifizieren möchte. Die Bedienweise unterscheidet sich insofern von der Bedienung in Texteditoren oder dergleichen, wo meist mit der rechten Maustaste das Objekt ausgewählt wird und im erscheinenden Dialog dann die Aktion.



Edit-Popup-Menü mit Kommandos zum:


- verschieben
- ausschneiden / löschen
- kopieren
- rückgängig machen von Aktionen



Einzelelemente können durch Anklicken, Gruppen durch Aufziehen eines Fensters, mit der Maus editiert werden.



### 4.6.1 Elemente entfernen (löschen)

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 Toolleiste. Der Mauszeiger verwandelt sich dann in ein Scherensymbol um den Lösch-Modus anzuzeigen.



### 4.6.2 Elemente verschieben 1 (Move)

Das Handsymbol des Move Kommandos, welches gespreizte Zeige- und Ringfinger aufweist, ist so zu verstehen, dass das zu bearbeitende Element zuerst ausgeschnitten (*von anderen Elementen gelöst*) wird und dann verschoben werden kann.



### 4.6.3 Elemente verschieben 2 (Drag)

Mit dem Drag Werkzeug verschiebt man Elemente ohne, dass damit verbundene Elemente davon gelöst werden.



Im Drag-Mode kann man auch lose Linienenden aufnehmen und verschieben. Dazu zieht man mit der Maus ein kleines Fenster über dem Linienende auf.

Bei schrägen Linien, kann man Ecken hinzufügen, wenn man in das schräge Element klickt.



### 4.6.4 Elemente kopieren (Copy)

Das Copy Werkzeug erlaubt es, sowohl Einzelelemente als auch Gruppen von Elementen innerhalb eines Schaltplans und auch in andere Pläne zu kopieren.



### 4.6.5 Aktionen rückgängig machen, wieder herstellen (Undo/Redo)

Auch diese Befehle sind natürlich vorhanden und führen die gewohnten Aktionen durch.

---


## 5 Bauteil-Attribute, Netz-Namen, Netzliste, Texte

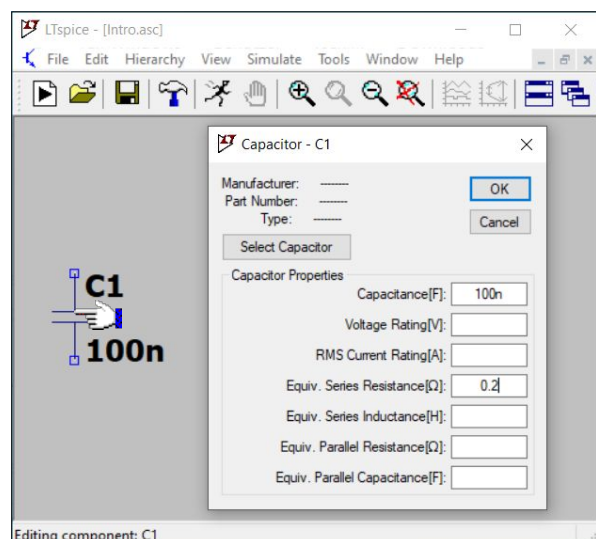
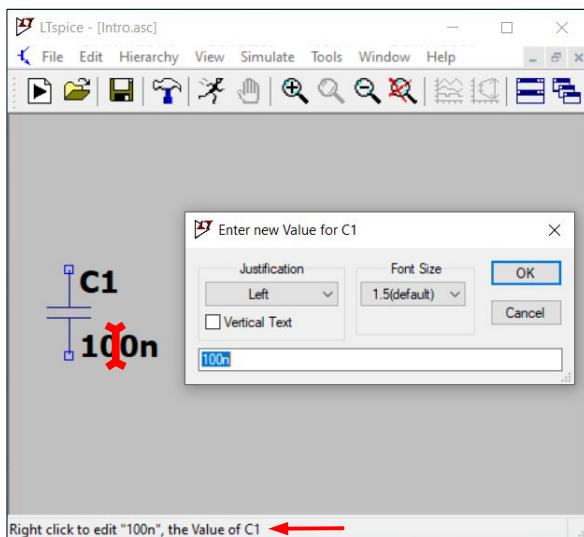
### 5.1 Bauteil Namen und Werte

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 dessen Form sich ähnlich einem „I“ ändert, wenn er über ein Textelement geführt wird.

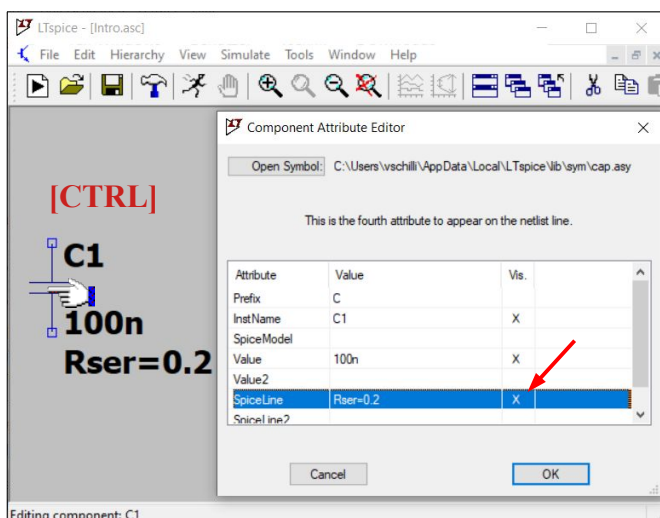
Bewegt man den Cursor über ein graphisches Objekt, ändert sich die Form zur Hand .

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



#### 5.1.1 General (Component) Attribute Editor

Zusätzliche Bauteilattribute werden oft nicht im Schaltplan angezeigt, auch wenn sie wie im obigen Dialog eingetragen wurden. (*Series Resistance*[ $\Omega$ ] = 0.2)



Mittels **[Ctrl]+rechter Maustaste** kann man die Sichtbarkeit von Attributen im **Component Attribute Editor** Dialog unter der Spalte **Vis** ändern.

Kennt man die zusätzlichen Attribute von Bauteilen, dann kann man diese auch direkt in die Zeile **SpiceLine** des General Attribute Editors eintragen.

### 5.1.2 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. ( $M = m = \text{Milli.}$ )
- **Einheiten dürfen nur zugefügt werden, wenn sie nicht zu Konflikten mit den Zehnerpotenzen führen. (→ kein F für Farad ...)**



### 5.1.3 In LTSpice benutzte Faktoren:

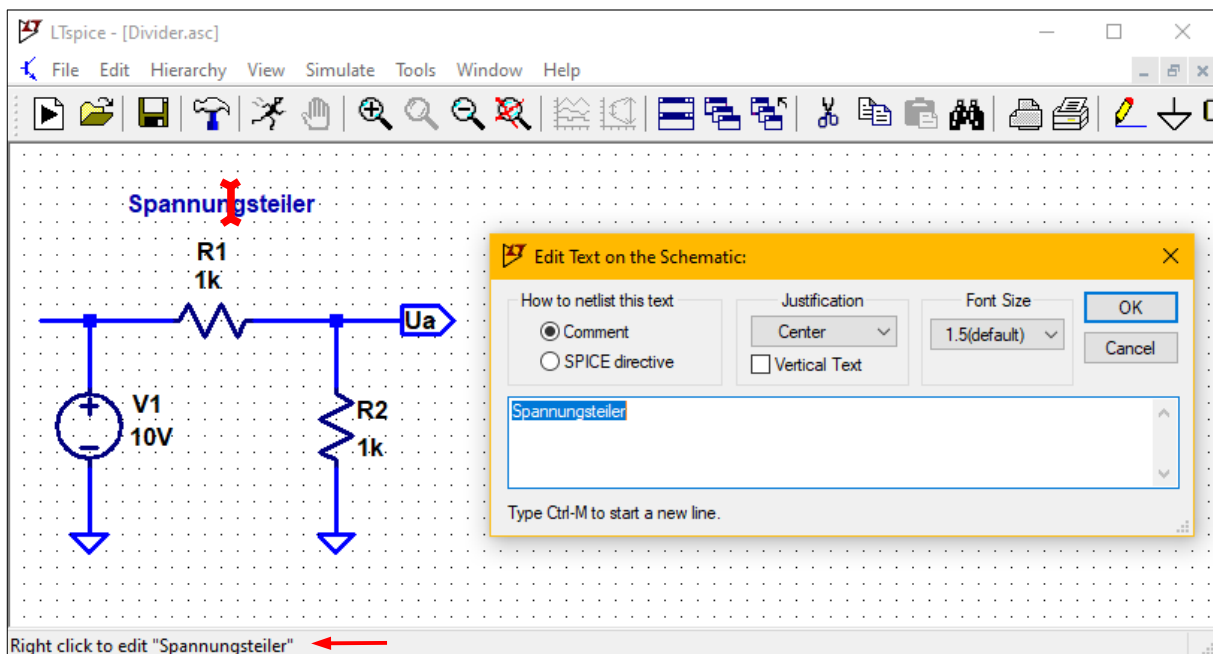
M = m = milli =  $10^{-3}$   
U = u = micro =  $10^{-6}$   
N = n = nano =  $10^{-9}$   
P = p = pico =  $10^{-12}$   
F = f = femto =  $10^{-15}$

K = k = kilo =  $10^3$   
MEG = meg = mega =  $10^6$   
G = g = giga =  $10^9$   
T = t = terra =  $10^{12}$



## 5.2 Texte / Kommentare

Mit dem Text Werkzeug **[T]** kann man dem Schaltplan mit Kommentaren und kleinen Beschreibungen ergänzen.



Im Eingabedialog, welcher auch bei schon vorhandenen Elementen durch Anklicken mit der rechten Maustaste wieder erscheint, kann unter anderem die Schriftgröße verändert werden.


Die Einstellungen betreffend der Ausrichtung machen eher wenig Sinn, da **Vertical Text** lediglich ein Rotieren des Textes verursacht und nicht, dass die Buchstaben untereinander geschrieben werden, wie bei einem senkrechten Lösungswort in einem Kreuzworträtsel.

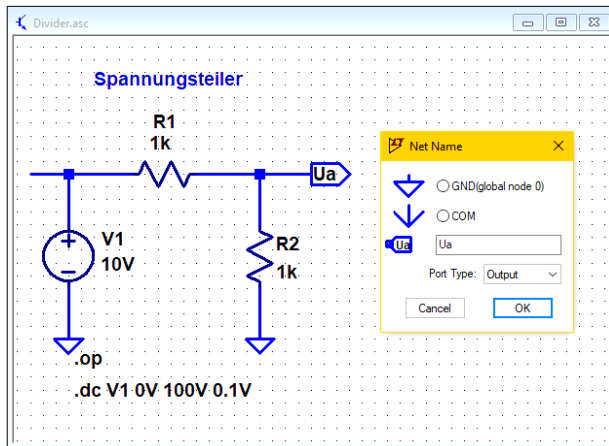
Rotieren kann man den Text auch noch während des Ablegens, oder beim nachträglichen Bewegen mit der Tastenkombination **[Ctrl]+[R]**.



## 5.3 Netz-Namen

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.

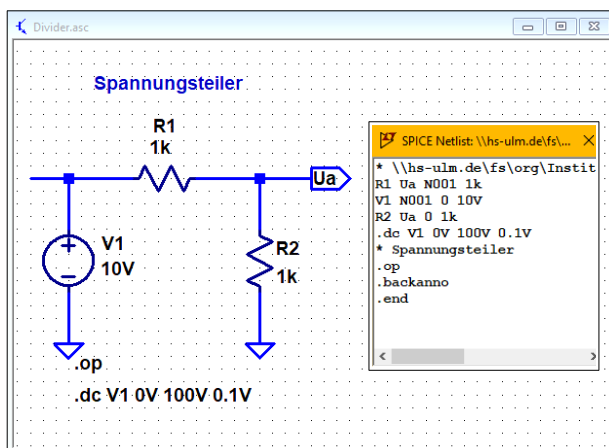


Netznamen am freien Ende einer Verbindung können hier zudem noch mit Symbolen versehen werden, welche den Typ des Signals veranschaulichen (*Eingang, Ausgang ...*)

### 5.3.1 Netzliste

Für die eigentliche Simulation mit Spice wird eine Beschreibung der Schaltung in Textform benötigt. Diese wird von LTSpice automatisch vor der Simulation erstellt. Man kann sich diese auch über das Menü | **View** | **SPICE Netlist** | anzeigen lassen.

In der Netzliste müssen alle Informationen enthalten sein, die eine Spice Simulation benötigt.




Die Netzliste enthält sämtliche Bauelemente (*R1, R2, V1*) mit ihren angeschlossenen Netzen. (*N001, Ua und 0*) und den Werten (*1kΩ, 1kΩ, 10V*).

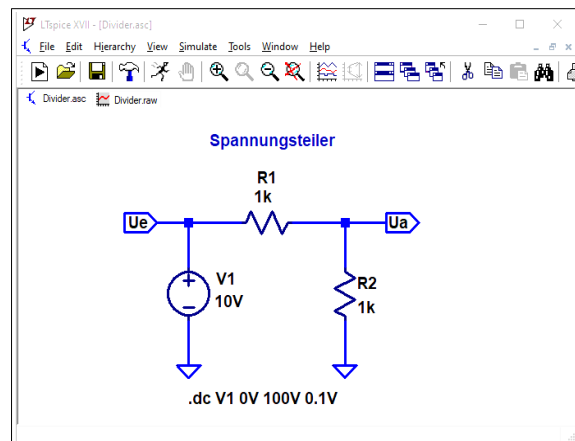
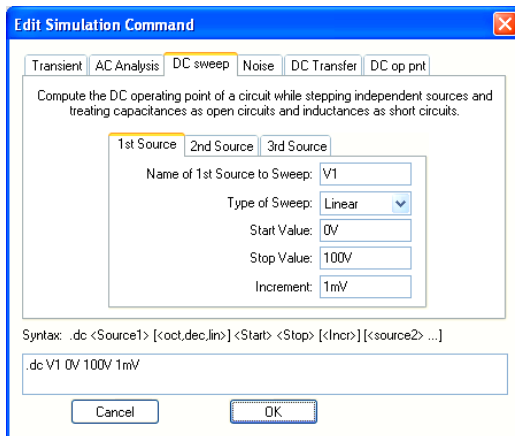
Zusätzlich sind auch schon Anweisungen (*.op und .dc V1 0V 100V 0.1V*) zu sehen, die beschreiben, welche Art von Simulationen durchgeführt werden sollen. Informationen dazu folgen im nächsten Kapitel, und bei Einsteiger-Beispiele / Analysearten.


## 6 Schaltungen simulieren

### 6.1 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.



 Der Dialog kann auch über die integrierte Hilfe des SPICE Directive Dialogs aufgerufen werden. (Rechter Mausklick im Textfeld → Help me Edit → Analysis Command)

Die verschiedenen Analysetypen werden in Kapitel 9 anhand von Beispielen beschrieben.

### 6.2 Simulation ( Berechnung ) starten

Die Simulation wird über den Befehl | **Simulate** | **Run** | oder über den Schalter  gestartet. Links unten in der Statusleiste kann man den Fortschritt der Berechnungen einsehen.

Die Ergebnisse der Simulation umfassen die Spannungen sämtlicher Knoten und die Ströme aller Maschen. Je nach Art der Simulation können die Ergebnisse dann graphisch, oder auch nur als Text ausgegeben werden.

### 6.3 Simulation stoppen

Sind die Einstellungen für die Simulation ungünstig gewählt, dann kann es vorkommen, dass die Berechnungen sehr lange dauern würde. In diesem Fall kann man die Simulation ggf. über die Hand in der Menüleiste oder das Tastenkürzel [**Ctrl+H**] anhalten.

### 6.4 Arbeitspunktberechnungen (DC op pnt / .op)

Die Ergebnisse einer Arbeitspunktberechnung werden nicht graphisch, sondern als Text in einem zusätzlichen 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.



## 7 Simulationsergebnisse darstellen und ausmessen

Bei graphischer Ausgabe der Simulationsergebnisse 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)*

Anhand dem einfachen Beispiel aus Kapitel 6 können die folgenden Möglichkeiten ausprobiert werden:

### 7.1 Im Schaltplan auswählbare Signale

Die Auswahl von graphisch darzustellenden Signale 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 Tastkopfs 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 Knotenpunkt steht.



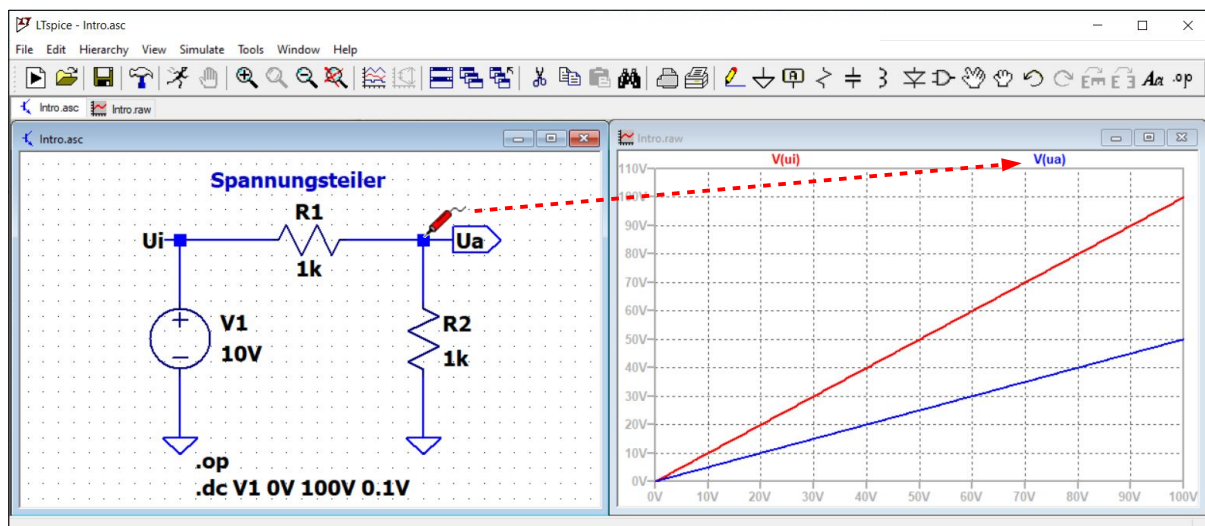
Über einem Bauteil (oder Anschluss) wird das Symbol einer Strommesszange angezeigt. Mit der linken Maustaste wird das Signal in die Anzeige aufgenommen.



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.





---

## [Ctrl+A] 7.2 Darstellung von Funktionen ( Übertragungsf. , Impedanzen )

Sollen nicht nur einfache Signale angezeigt werden, sondern z.B. die Übertragungsfunktion als das Verhältnis von Ausgangsspannung zu Eingangsspannung, so kann man dem Plot 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~~) **TODO**



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

## 7.3 Ausmessen der graphischen Ausgabe (Cursors)

### 7.3.1 Mess-Cursor

Im Plot Fenster sind bis zu zwei Messcursors vorhanden. Der erste Cursor 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 Cursors in beliebiger Weise zugeordnet werden ( *keiner*, *1<sup>st</sup>*, *2<sup>nd</sup>* oder *1<sup>st</sup> & 2<sup>nd</sup>* )

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

**Mit der Maus** lassen sich die Cursors 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 ;-)*

### 7.3.2 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.

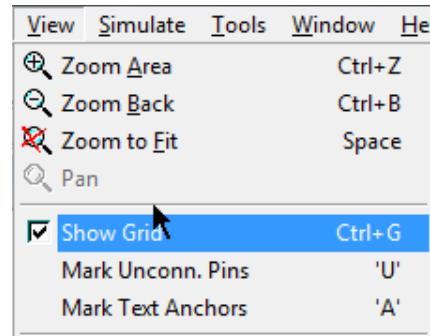
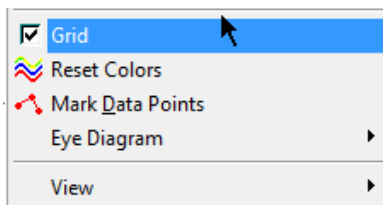
---

## 8 Formatieren der Ausgabe / Dokumentation

### 8.1 Raster Ein/Aus schalten

Im Waveform Viewer als auch Schaltplan Editor kann man das **Grid (Raster)** wahlweise ein- oder aus-schalten. Dazu kann man die Tastenkombination **[Ctrl+G]** verwenden.

Beim Waveform Viewer geht das auch über das Popup-Menü, welches erscheint, wenn man irgendwo im Plotfenster mit der rechten Maustaste klickt. Im Schaltplaneditor über | **View** | in der Menüleiste.



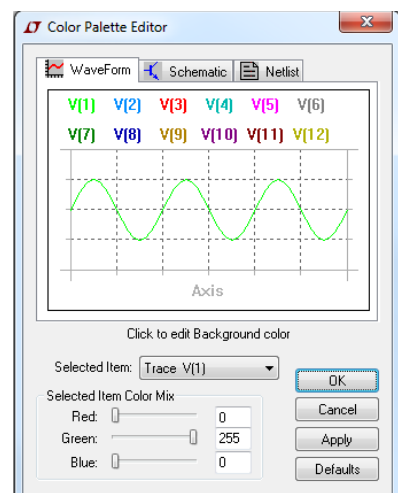
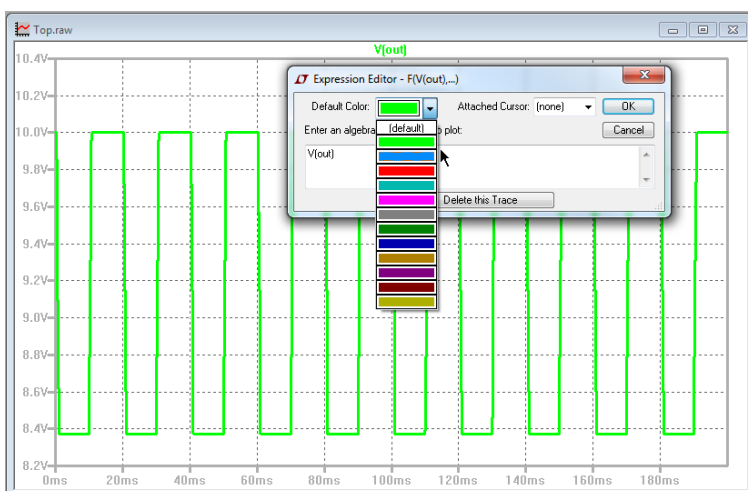
### 8.2 Mark Data Points

Die Graphen im Waveform Viewer werden gebildet indem die von Spice berechneten Punkte mit Linien verbunden werden. Manchmal kann es nützlich sein, die berechneten Punkte anzuzeigen, um zu überprüfen, ob diese in einem interessanten Abschnitt nicht zu weit auseinander liegen. Das geht über | **Mark Data Points** | im oben links abgebildeten Popup-Menü.

### 8.3 Farben der Graphen ändern

Die Farbe der Graphen im *Waveform Viewer* kann sehr einfach geändert werden. Dazu klickt man mit der rechten Maustaste auf den Signalnamen. Im Popup-Menü kann man dann die gewünschte Farbe auswählen. Zur Auswahl stehen die in der Palette definierten Farben.

Werden andere Farben gewünscht, weil z.B. nur helle Farben zur Verfügung stehen und der Hintergrund auch hell ist, dann kann man die Farbpalette über das **Control Panel** bzw. über das Menü | **Tools** | **Color Preferences** | einstellen.



---

## 8.4 Achsenskalierung / Darstellungsarten

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 rechten Maustaste das Einstellungs Menü für diese Achse aufgerufen werden.

Die Einstellungsmöglichkeiten umfassen neben der Achsen-Skalierung bei unterschiedlichen Simulationsarten auch noch verschiedene Darstellungsarten.

Bei der AC-Analyse kann das z.B. die Darstellung als Bode-Plot oder Ortskurve sein. Bei Darstellung eines Signals mit Betrag und Phase oder Real und Imaginärteil, können die Komponenten über ihre jeweiligen Achsen aus- bzw. ein-geschaltet werden.

## 8.5 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.

## 8.6 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.

## 8.7 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 oft 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.

---

---

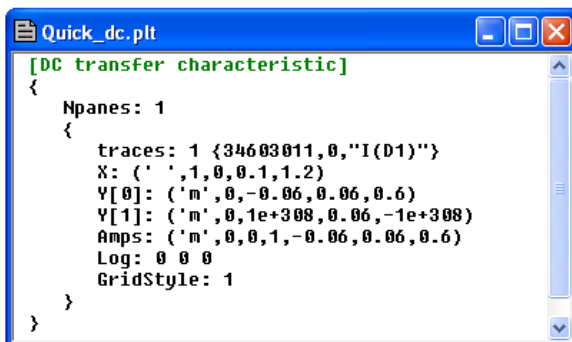
## 8.8 Dokumentation / Übername in externe Dokumente

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.

## 8.9 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.

---

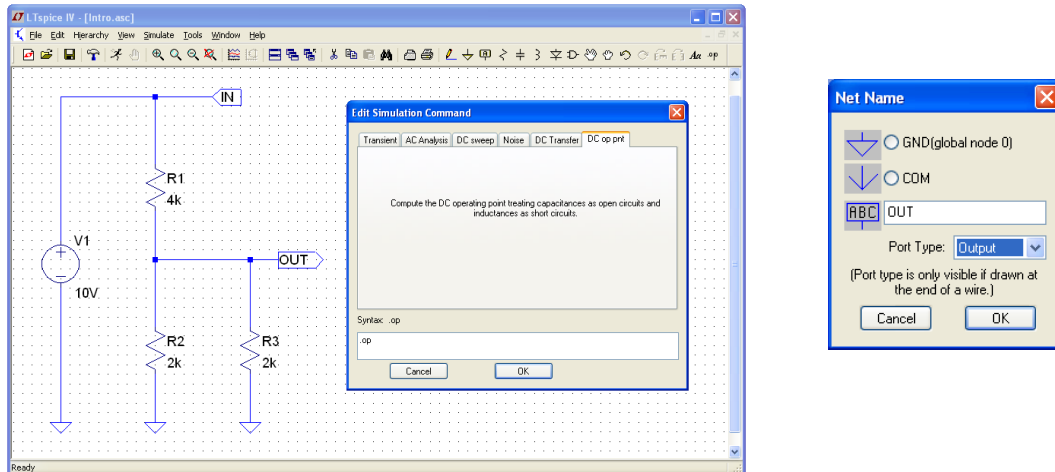
## 9 Einstieger-Beispiele / Analysearten

### 9.1 Arbeitspunkt / Operating Point

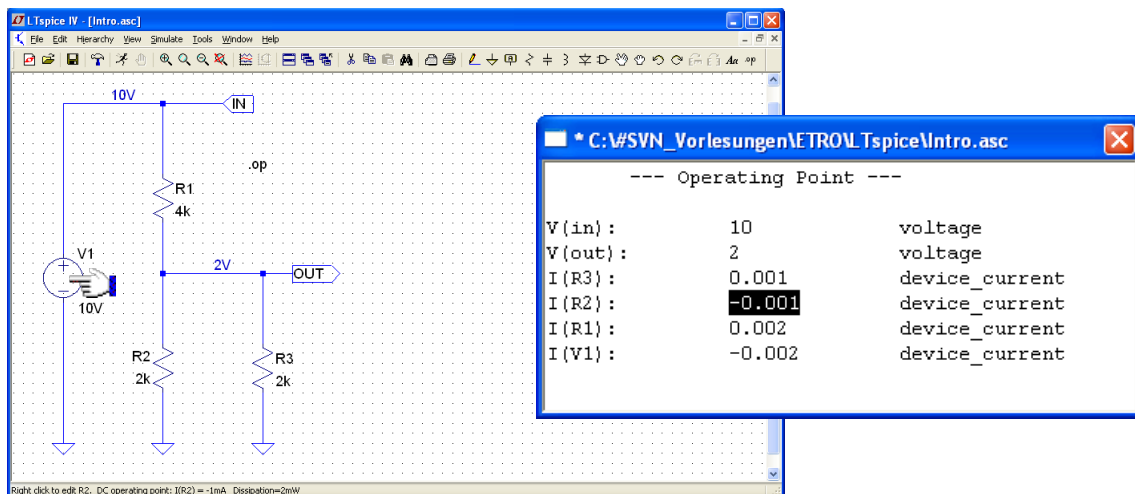
Berechnung des Gleichstrom-Arbeitspunktes für festgelegte DC Werte aller Strom- und Spannungsquellen im Netzwerk. (wird auch bei allen anderen Analysearten durchgeführt)

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

- Zeichnen des Schaltkreises mit  $[R]$  esistor, Quelle „voltage“  $[V]$  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  $I(R1)$ )

## 9.2 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.

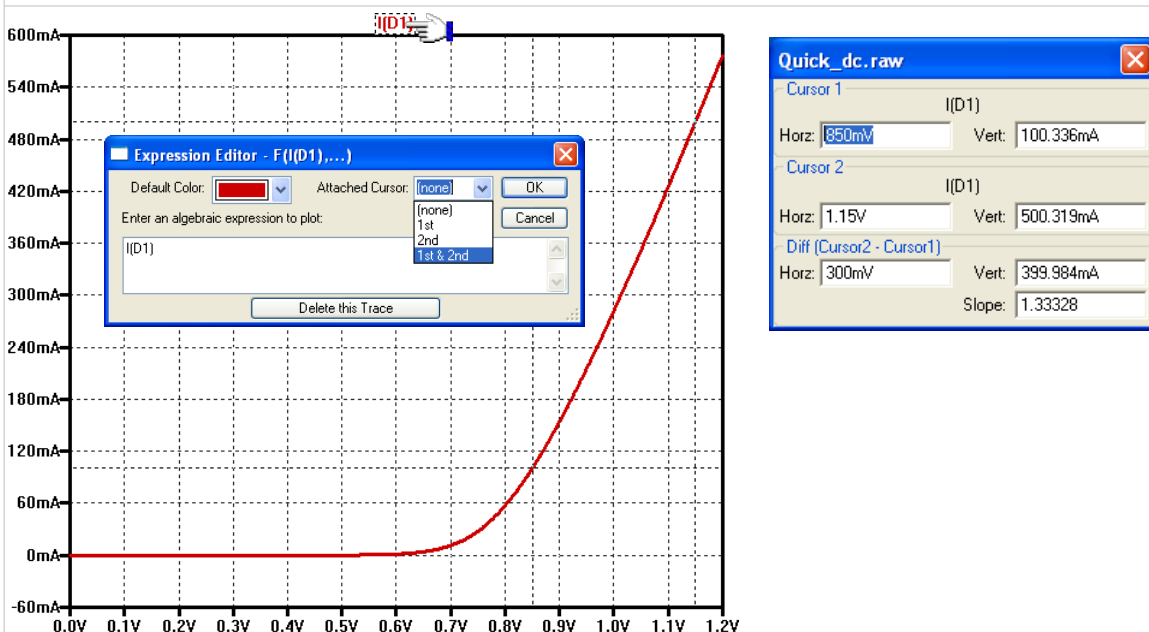
**Zur Durchführung der Analyse wird mindestens eine Quelle mit einem „DC“ Parameter benötigt.**

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

### 9.2.1 Beispiel Diodenkennlinie

The image shows the initial setup for a diode DC sweep simulation. On the left is a circuit diagram with a voltage source V1 (0V) and a diode D1 (1N4148). Below the circuit is the SPICE directive: `.dc V1 0V 1.2V 1mV`. To the right are two dialog boxes. The 'Diode - D1' box shows properties for a 1N4148 diode (Motorola, silicon, 0.2A average forward current, 75V breakdown voltage). The 'Edit Simulation Command' box shows the 'DC sweep' tab with 'V1' as the source to sweep, a linear sweep from 0V to 1.2V with a 1mV increment. The syntax field contains: `.dc V1 0V 1.2V 1mV`.

- Zeichnen des Schaltkreises mit **[D]** diode, Quelle „voltage“ **[V]** und **[G]** round.
- 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)

### 9.3 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.

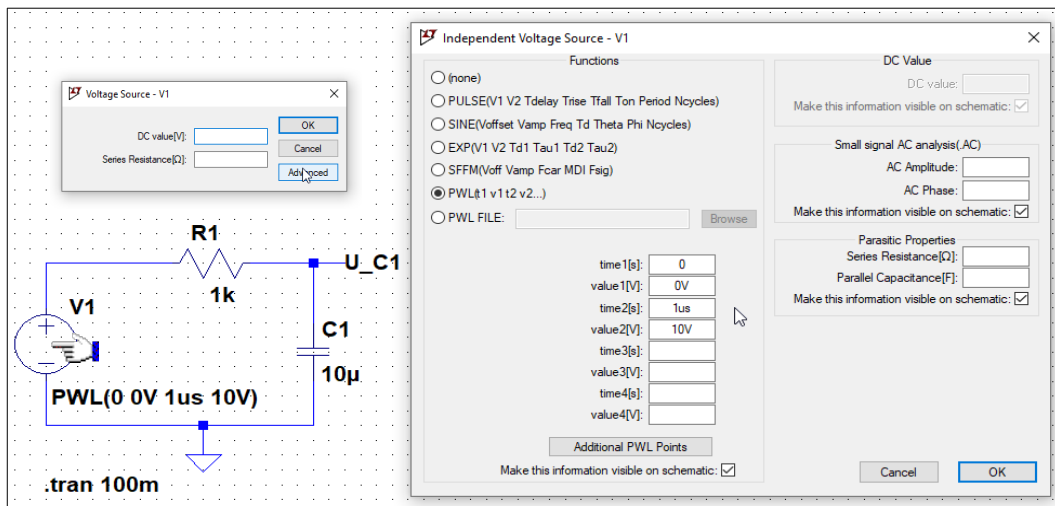
Die Zeit ist die Laufvariable auf der X-Achse, auf der Y-Achse sind Spannungen, oder Ströme dargestellt. Für die Analyse muss der Zeitbereich („Stop Time“) deklariert werden.

**Zur Durchführung der Time-Domain Analyse werden Quellen mit Parametern benötigt, welche ein Signal im Zeitbereich definieren.**

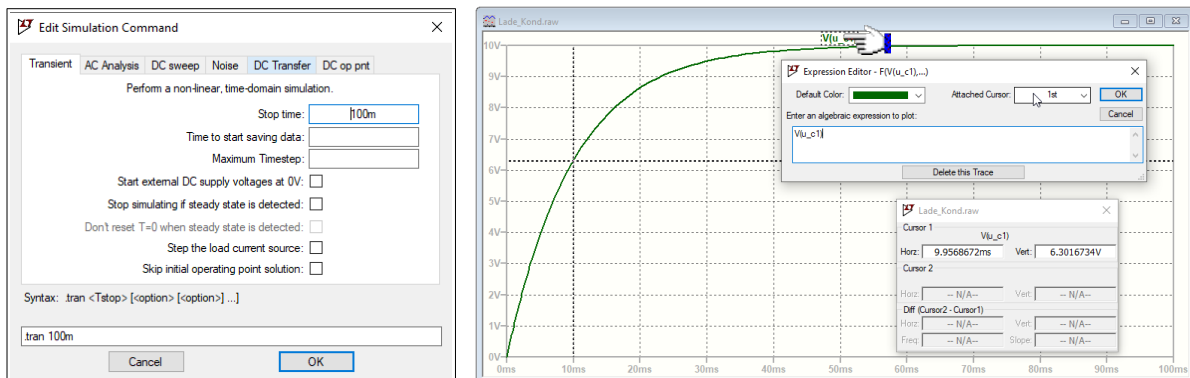
#### 9.3.1 Beispiel Ladezeitkonstante beim Kondensator

Da für die Ermittlung einer Ladezeitkonstante ein gezieltes Einschalten der Ladespannung notwendig ist, muss die Spannungsquelle in einem **Advanced** Mode definiert werden.

Für diesen Fall eignet sich **PWL** (*Piece-wise linear*). Hier werden Punkte angegeben, die dann linear miteinander verbunden werden. Bis zum Zeitpunkt **time1** gilt der Spannungswert **value1**. Ab dem letzten angegebenen Zeitpunkt gilt der letzte Spannungswert. Dazwischen werden die Spannungswerte linear interpoliert.



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



- Anlegen der SPICE Direktive **[Simulate] Edit Simulation Cmd|Transient** (Stop time > 5τ)
- Starten der Simulation , Auswahl der Spannung „**U\_C1**“ (oder )
- Aktivieren des Cursors und Ausmessen der Ladezeitkonstante



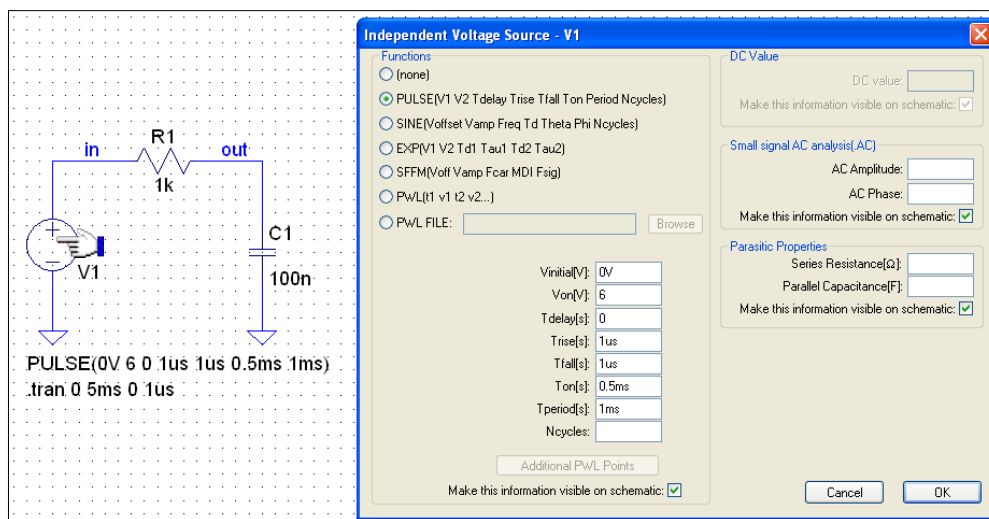
### 9.3.2 Beispiel RC-Tiefpass an Rechteckspannung (PULSE)



Sich wiederholende/periodische Signale werden ebenfalls im Advanced Mode der Quellen definiert. Rechteck-, dreiecks- und trapezförmige Signale kann man mit der **PULSE** Funktion erstellen.

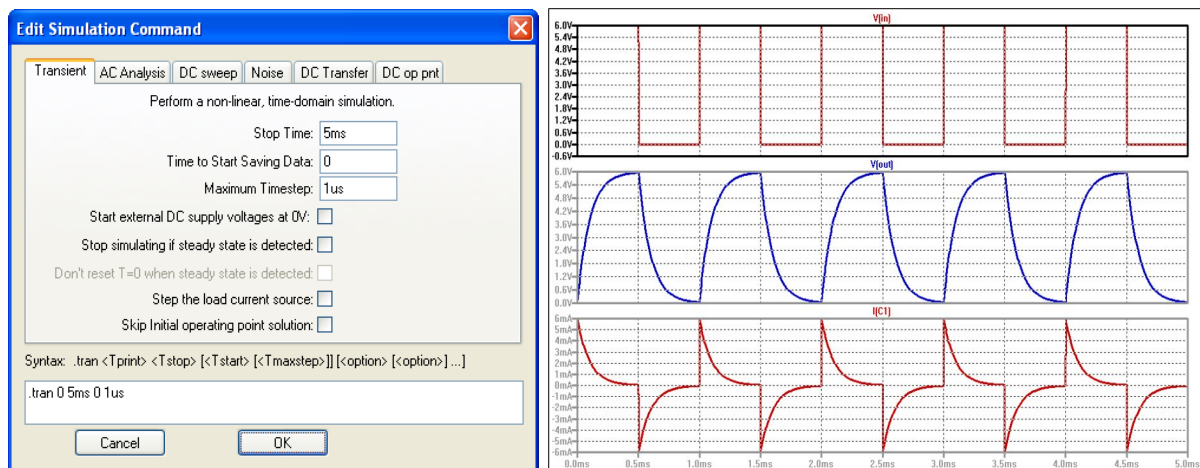
*Trise* und *Tfall* bestimmen dabei die Flanken des Signals. Diese Zeiten können nicht „0“ sein. Möchte man ein Rechtecksignal haben, dann muss man im Verhältnis zu *Ton* und *Tperiod* sehr kurze Werte vorgeben.

Das erzeugte Signal pendelt dann zwischen den Werten für *Vinitial* und *Von*. Die Zeit für *Voff* ( $\equiv V_{\text{initial}}$ ) ergibt sich aus der Periodendauer *Tperiod* abzüglich *Trise*, *Ton* und *Tfall*.

Mit dem Parameter *Tdelay* kann man eine Verzögerung einstellen, falls ein Signal in der Simulation nicht vom Zeitpunkt Null an vorhanden sein soll. Falls das Signal nach einer bestimmte Anzahl von Pulsen enden soll, wird dies bei *Ncycles* eingetragen.



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

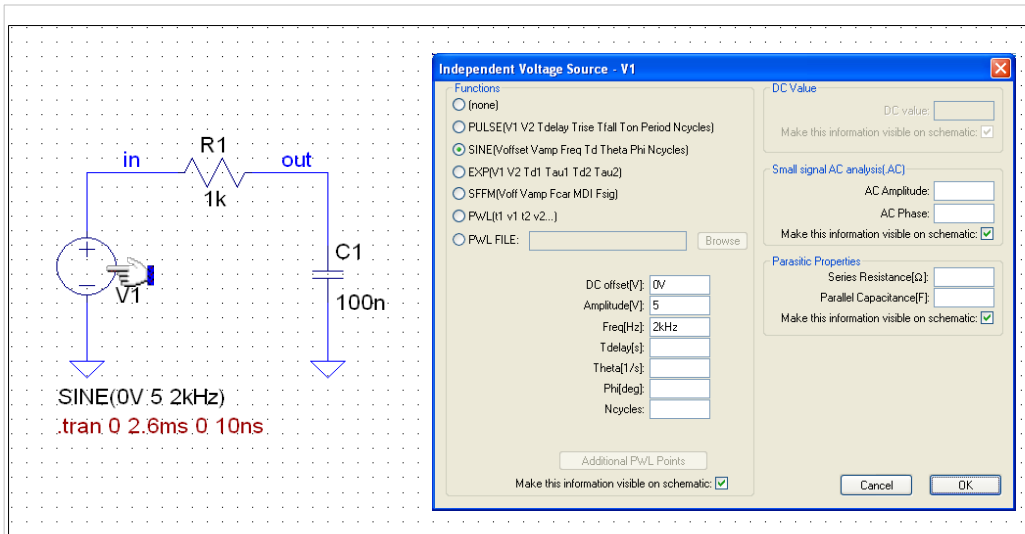


Anlegen der SPICE Direktive | **Simulate** | **Edit Simulation Cmd** | **Transient** |

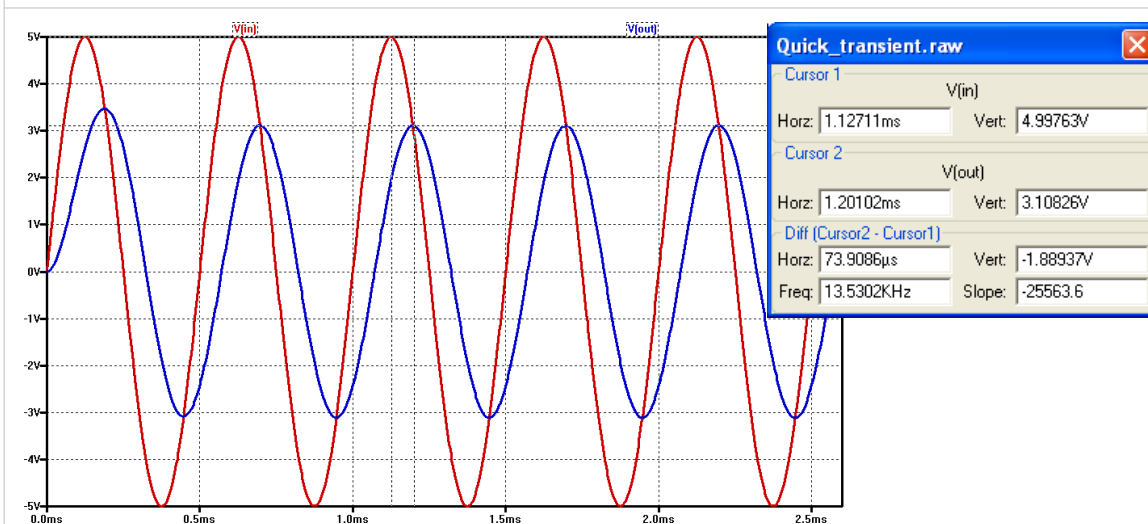
- Starten der Simulation 
- Zwei zusätzliche Plots hinzufügen (| **Plot Settings** | **Add Plot Pane** |)
- Auswahl der Spannungen „*in*“ und „*out*“ , sowie Strom durch C1  (oder )

### 9.3.3 Beispiel RC-Tiefpass an Sinusspannung (SINE)

Für sinusförmige Signale steht die Funktion **SINE** zur Verfügung. Die wichtigsten Parameter sind hier die **Frequenz**, die **Amplitude** und ggf. der **Offset** des gewünschten Sinussignals. (Zusätzlich kann man noch *Verzögerung*, *Startphasenwinkel* und *Dämpfung* einstellen)



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



- Anlegen der SPICE Direktive | **Simulate** | **Edit Simulation Cmd** | **Transient**
- 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.

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

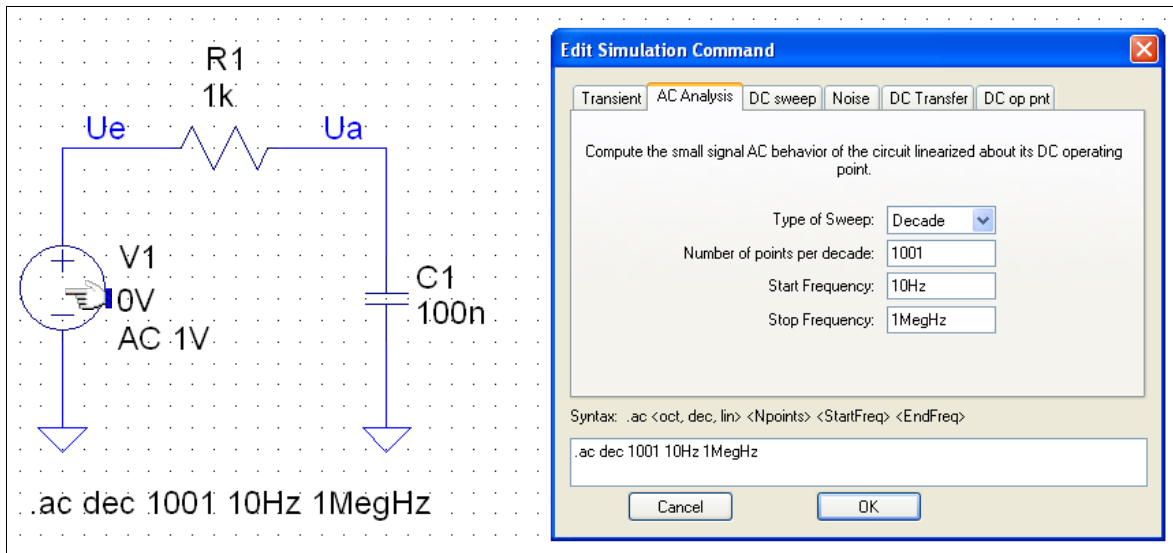
## 9.4 AC Sweep (Klein-Signal-Analyse)

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.

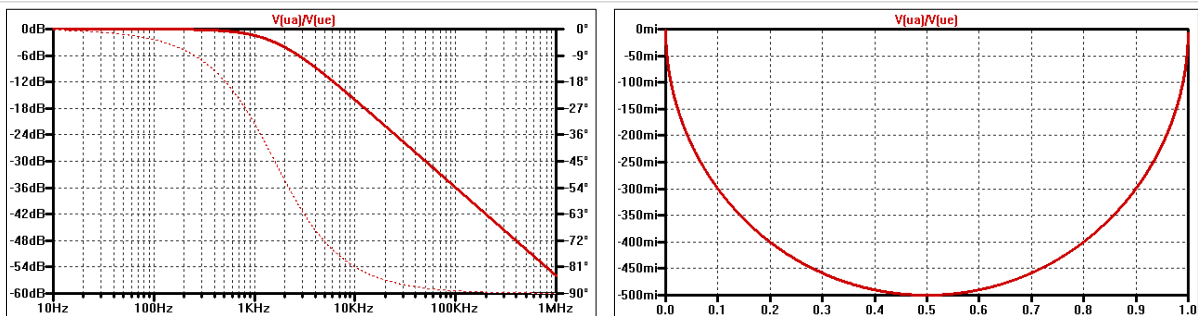
**Zur Durchführung der Analyse wird mindestens eine Quelle mit einem „AC“ Parameter benötigt.**

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

### 9.4.1 Beispiel RC-Tiefpass



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

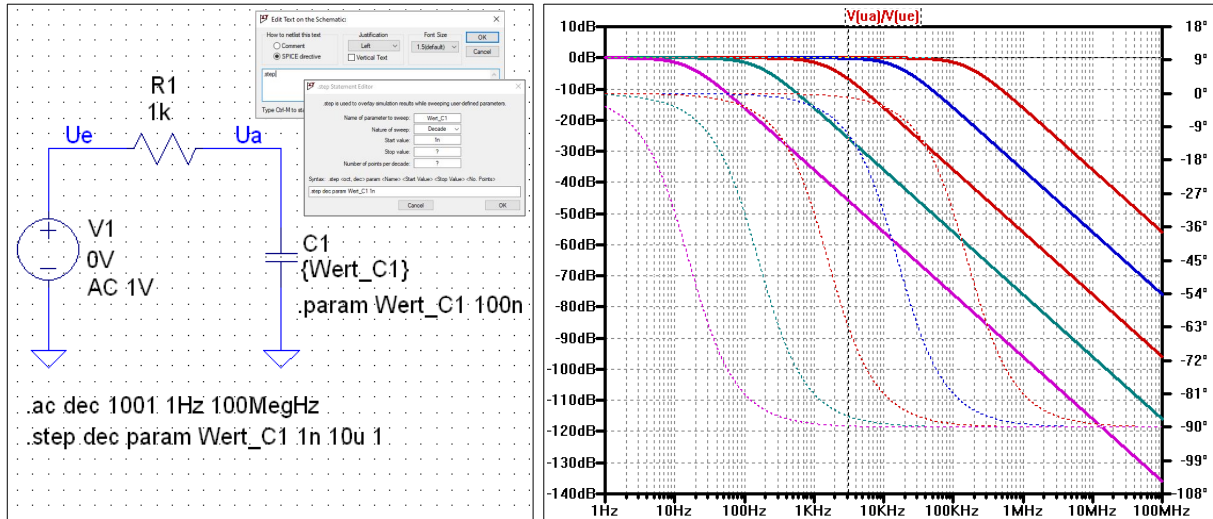


- Starten der Simulation
- Eingabe der gewünschten Ausgabefunktion  $V(u_a)/V(u_e)$  über | *Plot Settings* | *Add Trace* | oder *[CTRL+A]*
- Die Funktion wird standardmäßig als **Bodeplot** angezeigt.
- Aus-, bzw. - Einschalten von Betrag oder Phase über die jeweiligen Y-Achsen (*rechte Maustaste über Y-Achse (Symbol Lineal) → Einstellungsmenü*).
- zur **Ortskurve** durch Umschalten der Representation „*Nyquist*“ (*über linke Achse*)
- als **Real- und Imaginär-Komponente** → Representation „*Cartesian*“ (*über linke Achse*)

## 9.5 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**“)

### 9.5.1 Beispiel RC-Tiefpass – parametrische AC Analyse



Für die Schaltung aus Beispiel 9.4.1 können AC-Analysen von 1Hz bis 100MHz für verschiedene Werte von C1 durchgeführt und verglichen werden.

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** | ,**sp** in der Toolbar, oder die Taste [**S**] auf und gibt den Text für die gewünschte Variation ein.



Der Eingabedialog verfügt über eine integrierte Hilfe die mit einem rechten Mausklick im Textteil aufgerufen werden kann,

- 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, 1μF, 10μF)



**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.

## 9.5.2 Beispiel Ladezeitkonstante – parametrische Analyse im Zeitbereich

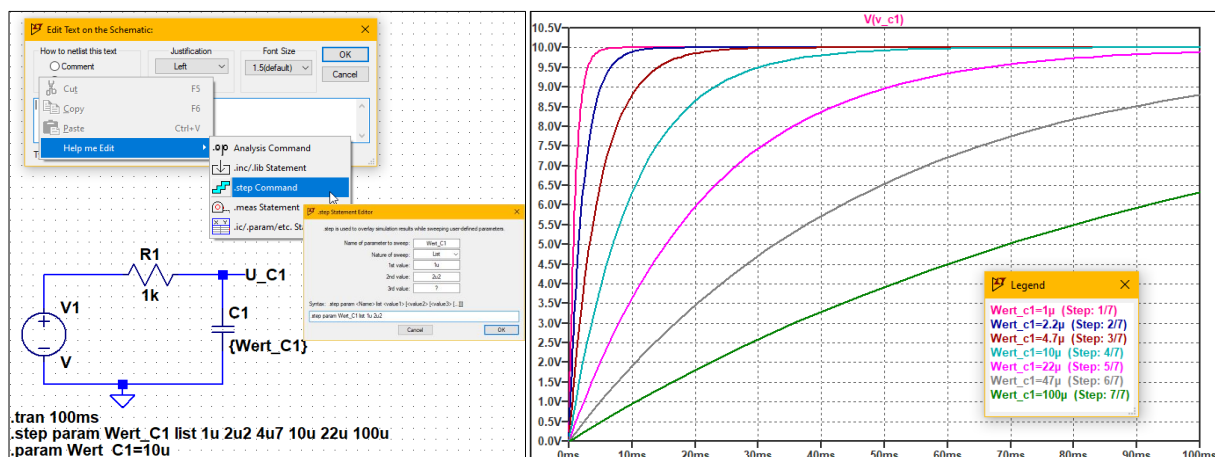
Für die Schaltung aus Beispiel 9.3.1 können mehrere Berechnungen für unterschiedliche Werte für C1 (z.B. 1 $\mu$ F, 2.2 $\mu$ F, 4.7 $\mu$ F, 10 $\mu$ F, 22 $\mu$ F, 47 $\mu$ F, 100 $\mu$ F ) verglichen werden.

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\_C1} ) ersetzt.

Der neue Parameter kann mit der Direktive **.step** variiert werden. Dazu ruft man den Eingabedialog über | **Edit** | **SPICE Directive** | ,  in der Toolbar, oder die Taste [**S**] auf und gibt die Anweisung für die gewünschte Variation ein.



Klicken mit der rechten Maustaste in den Textteil des Eingabedialogs öffnet die integrierte Hilfe zur Eingabe des Step Kommandos. Hier können dann die oben angegebenen Werte als Liste eingegeben werden.



Die Direktive **.param Wert\_C1 10u** ist optional und wird nur benötigt, falls die Step-Direktive nicht ausgeführt wird, weil dann für C1 kein Wert bekannt wäre.



Die Legende im Ausgabefenster kann man mittels eines Rechtsklicks im Plotbereich über den sich öffnende Dialog aufrufen, wenn man dort über **View** und weiter **Step Legend** auswählt. Leider blockiert die Legende die weitere Bedienung. D. h. die Legende muss wieder geschlossen werden, bevor weitere Bedienschritte ausgeführt werden können.



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

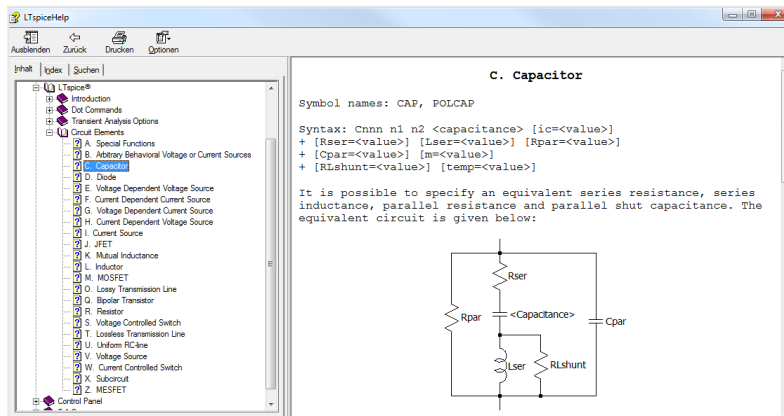


Werden Cursor-Messungen durchgeführt, dann kann mit den Tasten [**↑**] [**↓**] zum nächsten Wert weiter geschaltet werden. Informationen auf welchem Step der Cursor steht, erhält man durch klicken mit der rechten Maustaste.

---

## 10 Model / Symbol / Netlist / Subcircuit / Library

Die Hilfe von LTspice enthält auch eine Dokumentation aller Schaltungselemente. Sogar die vermeintlich einfachsten Elemente wie Widerstände ( $R$ ), Induktivitäten ( $L$ ) und Kondensatoren ( $C$ ) bestehen nicht nur aus einem Wert für die jeweilige Kenngröße, sondern aus einem Modell, welches die realen Eigenschaften der Bauteile abbildet.



Komplexere Bauteile wie z.B. Operationsverstärker werden aus mehreren Grundelementen mit Hilfe von Netzlisten (*Subcircuits*) oder Schaltplänen (*Hierarchical-Blocks*) gebildet.

Bauelemente können auch zu mehreren in Bibliotheken zusammengefasst sein. Zur Verwendung im Schaltplan werden Symbole benötigt, welche mit den jeweiligen Beschreibungen im Model, Subcircuit oder Hierarchical-Block verknüpft sind.

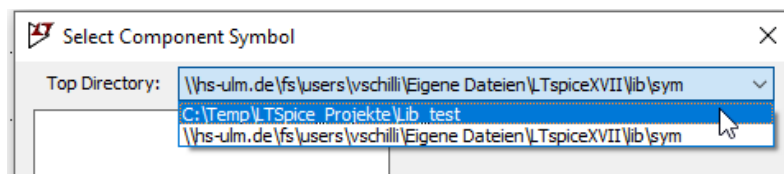
### 10.1 Speicherorte von Bauteilmodellen und Bibliotheken

Die Bibliotheken der LTspice Installation (*.../LTC/LTspiceXVII/lib*) werden beim ersten Start der Software durch einen neuen Benutzer in dessen Benutzerverzeichnis kopiert und nur diese Kopien werden dann beim Entwurf von neuen Designs verwendet.

Unter Windows befinden sich diese Kopien dann z.B. im Pfad:

***.../users/<username>/Eigene Dateien/LTspiceXVII/lib.***

Nur aus diesen Kopien sowie aus dem Verzeichnis des aktuellen Designs können Schaltungselemente über **Symbole** einem Design hinzugefügt werden!



Nachträgliche Änderungen an den Originalbibliotheken im Installationsverzeichnis durch Benutzer sind somit scheinbar wirkungslos!

Zudem können Änderungen und Ergänzungen von Bibliotheken in den Userverzeichnissen durch Programmupdates auch wieder verloren gehen, wenn die entsprechenden Dateien von einem Update überschrieben werden.

Vorschläge, zur Speicherung neuer Bauteile erfolgen im Kapitel zum Anlegen von neuen bzw. eigenen Bauteilen.

---



## 10.2 Modelle der Spice Basiselemente

Die Grundelemente wie Dioden, RLC, Transistoren ..., welche von LTspice zur Verfügung gestellt werden, sind in Bibliotheksdateien im Ordner `../LtspiceXX/lib/cmp` in den `standard.xxx` Dateien enthalten. Je nach Bauteil ist der Aufbau der Bibliotheksdateien unterschiedlich und in den folgenden Kapiteln exemplarisch beschrieben.

### 10.2.1 Diskrete Halbleiter

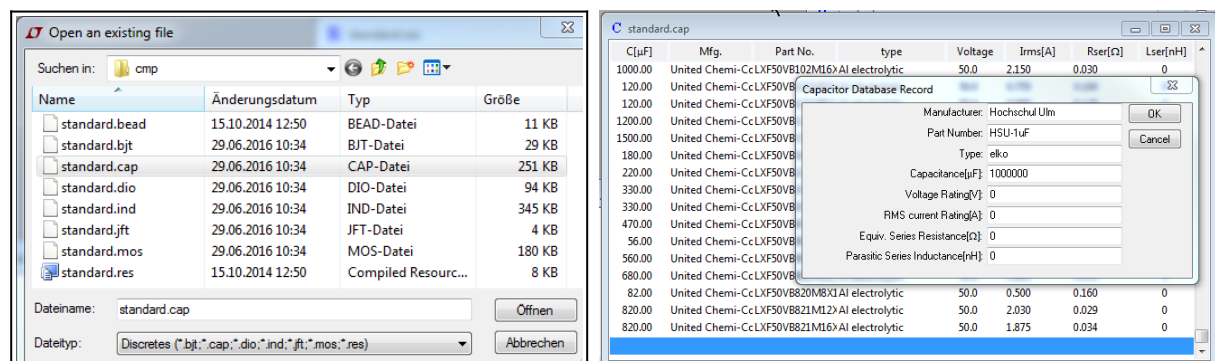
Die Bibliotheken der Halbleiterbauelemente enthalten die Modelle der Bauteile, welche über den Dialog des Symbols im Schaltplan ausgewählt werden können. Bei den Bibliotheken handelt es sich um Textdateien die auch editiert bzw. ergänzt werden können.

```
standard.dio
1 * Copyright © 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 Linear Technology Corporation.
2 All rights reserved.
3 *
4 * Mike Engelhardt
5 *
6 .model 1N914 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjo=4p M=.4 tt=20n Iave=200m Vpk=75 mfg=OnSemi type=silicon)
7 .model 1N4148 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjo=4p M=.4 tt=20n Iave=200m Vpk=75 mfg=OnSemi type=silicon)
8 .model MMSD4148 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjo=.64p M=.4 tt=5n Iave=200m Vpk=100 mfg=Onsemi type=silicon)
9 .model 1N5817 D(Is=31.7u Rs=.051 N=1.373 Cjo=190p M=.3 Eg=.69 Xti=2 Iave=1 Vpk=20 mfg=OnSemi type=Schottky)
```

Dioden, MOS-FETs, J-FETs und bipolare Transistoren sind in jeweils eigenen Dateien organisiert, die man an den Dateiendungen unterscheiden kann.

### 10.2.2 RLC – Widerstände, Induktivitäten und Kondensatoren

Auch die passiven Bauteile sind in jeweils eigenen Dateien für Widerstände, Kondensatoren, Induktivitäten und Ferrite organisiert.



Die Bibliotheken für die RLC Bauteile sind etwas anders aufgebaut als die der Halbleiter und erscheinen in einem Texteditor unverständlich. Öffnet man diese Dateien in LTspice, bekommt man eine Datenbankansicht und könnte hier über das Edit-Menü Einträge löschen, modifizieren, hinzufügen...

### 10.2.3 Quellen

Für die verschiedenen Strom- und Spannungs-Quellen gibt es keine Bibliotheksdateien. Die Beschreibung wird für jede Quelle individuell angelegt. (im Schaltplan)

Einen Überblick, welche Arten von Quellen es gibt, findet man in der Hilfe.



## 10.3 Schaltplansymbole

Um ein Bauteil einem Schaltplan hinzuzufügen zu können, benötigt man ein Symbol, welches mit einem Model, Subcircuit oder Hierarchical-Block verknüpft ist.

Die Standard-Symbole befinden sich im Verzeichnis *.../Eigene Dateien/LtspiceXVII/lib/sym*, welches neben dem aktuellen Verzeichnis des Designs auch im Dialog zum Zufügen eines neuen Bauteils als Basisverzeichnis zur Verfügung steht.

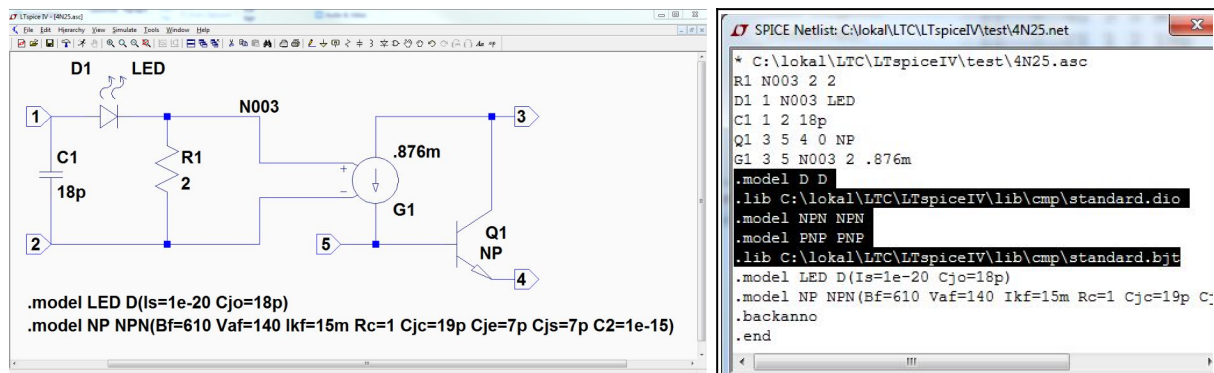
## 10.4 Netzlisten

Für die Simulation mit Spice werden Netzlisten benötigt, welche die Verbindungen der Elemente (*Models, Subcircuits...*) des Schaltplans untereinander beschreiben.

LTspice erzeugt die Netzlisten automatisch vor der Simulation aus dem Schaltplan.

Diese Netzlisten kann man sich für das aktive Schaltplanfenster mit dem Befehl | **View** | **SPICE Netlist** | anzeigen lassen.

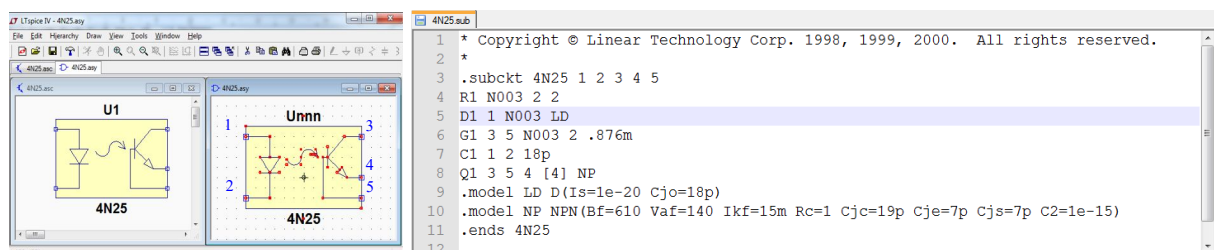
Die folgenden Abbildungen zeigen die Nachbildung eines Optokopplers vom Typ 4N25 als Schaltplan und die daraus erzeugte Netzliste. (*Der geschwärzte Teil der Netzliste ist eigentlich nicht relevant*)



## 10.5 Subcircuits

Beschreibungen von Bauteilen in Form von Subcircuits sind nichts anderes als Netzlisten.

Der Optokoppler 4N25 ist in LTspice verfügbar und als Symbol sowie als Subcircuit in der Datei *.../LtspiceXX/lib/sub/4N25.sub* hinterlegt.



Vergleicht man Netzliste des Schaltplans oben und die Beschreibung des Subcircuit unten, so stellt man fest, dass ein Subcircuit nur eine Netzliste ist, die mit einem Titel (*.subckt 4N25 1 2 3 4 5*) versehen wurde. (*.end* → *.ends*)

Dateien, welche lediglich eine Beschreibung eines einzelnen Bauteils beinhalten, sollten eigentlich die Endung *\*.sub* haben, aber auch bei Dateien, die original mit LTspice kommen findet man sehr oft die Endung *\*.lib*.

## 10.6 Bibliotheken / Libraries

In den Bibliotheken sind wie weiter oben schon gesehen Sammlungen von Modellen oder auch Subcircuits enthalten.

Bibliotheken die als Subcircuits beschrieben wurden, haben die Endung *.lib* und befinden sich standardmäßig im Verzeichnis *.../Eigene Dateien/LtspiceXVII/lib/sub* und ggf. in weiteren Unterverzeichnissen.

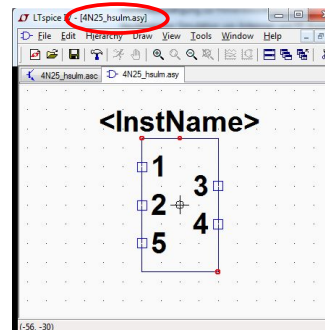
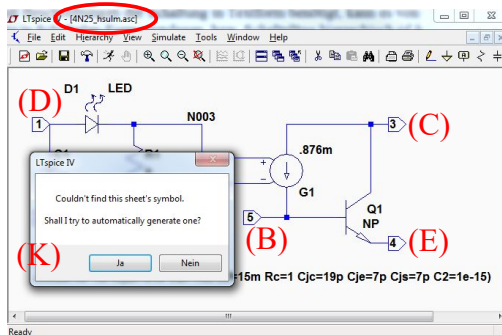
## 11 Hierarchical-Blocks / Designs mit mehreren Seiten

Möchte man ein Design mit mehreren Schaltplänen hierarchisch (*d.h. mit Unterschaltplänen*) aufbauen, dann muss man für jede Seite der Unterebenen ein Symbol erzeugen, welches man dann in der übergeordneten Schaltplanseite integriert. **Alle Seiten und zugehörige Symbole werden bei hierarchischen Designs im selben Verzeichnis gespeichert!**

### 11.1 Symbol erzeugen

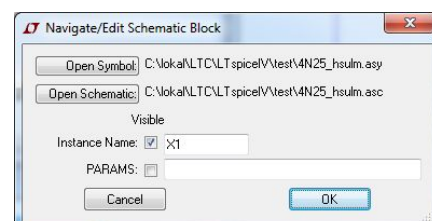
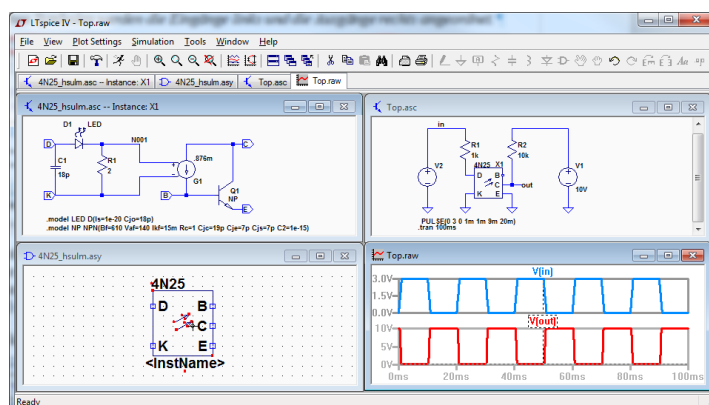
Im Menü | *Hierarchy* | *Open this Sheet's Symbol* | kann man sich für eine geöffnete Schaltplanseite ein Symbol automatisch erzeugen zu lassen. Ist noch keines vorhanden kommt automatisch eine entsprechende Nachfrage. (*Beispiel von weiter oben Optokoppler 4N25*)

Bei der automatischen Erzeugung werden die im Schaltplan vorgegebenen Signalrichtungen berücksichtigt. *Eingänge wurden links und Ausgänge rechts angeordnet.*



Das erzeugte Symbol ist natürlich lange nicht so aussagekräftig wie das 4N25 Symbol der Bibliothek. Auch die Namen der Anschlüsse sind nicht selbsterklärend. Deshalb sollte man ein solches Symbol besser nochmal löschen, die Netze (*in D, K, B, C und E*) umbenennen, und dann nochmal neu erzeugen. (*geht vermutlich schneller als beide zu ändern*)

*Ein so erzeugtes Symbol bitte wenigstens noch etwas im Editor verschönern und abspeichern. Fügt man es dann als Bauteil in einen neuen Schaltplan ein, kann man über einen rechten Mausklick zum darunterliegenden Schaltplan und auch zum Symbol navigieren.*



## 12 Neue / Eigene Bauteile einbinden, bzw. anlegen

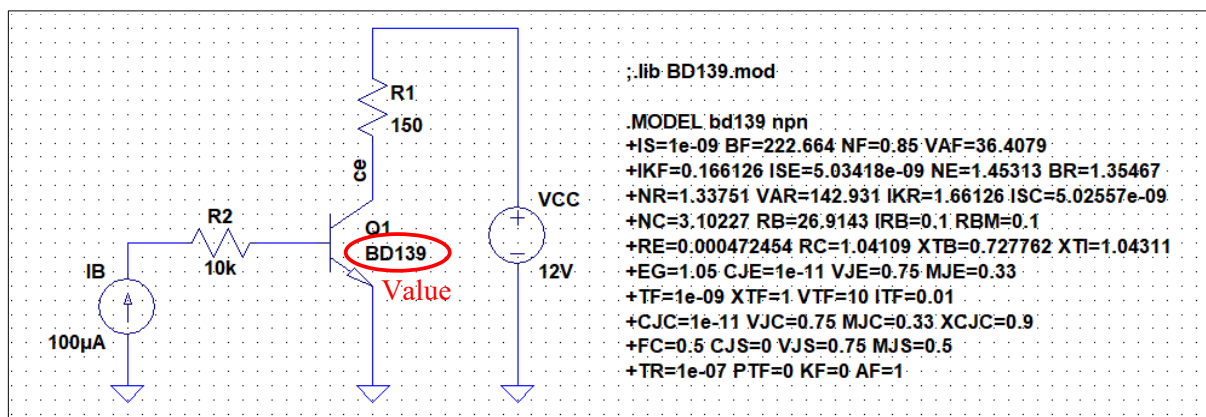
Viele Bauteile sind bei der Installation von LTspice nicht vorhanden, können meist aber leicht zusätzlich eingefügt werden. Dies betrifft vorwiegend Bauteile anderer Hersteller als Linear Technology und Analog Devices. Auch von den unzähligen diskreten Bauteilen wie Dioden und Transistoren, etc. sind in den Bibliotheken natürlich nicht alle vorhanden.

### 12.1 Spice Model hinzufügen

Diskrete elektronische Bauteile wie z.B. Dioden und Transistoren werden über vordefinierte Modelle charakterisiert, deren Parameter dann für das konkrete Bauteil angepasst werden. Diese Modelle und Parameter kann man in der Hilfe zu LTspice nachschlagen und wird vermutlich von der Anzahl verfügbarer Parameter erst einmal erschlagen. Im Normalfall besorgt man sich das Modell einfach im Internet und bindet es ins Design ein.

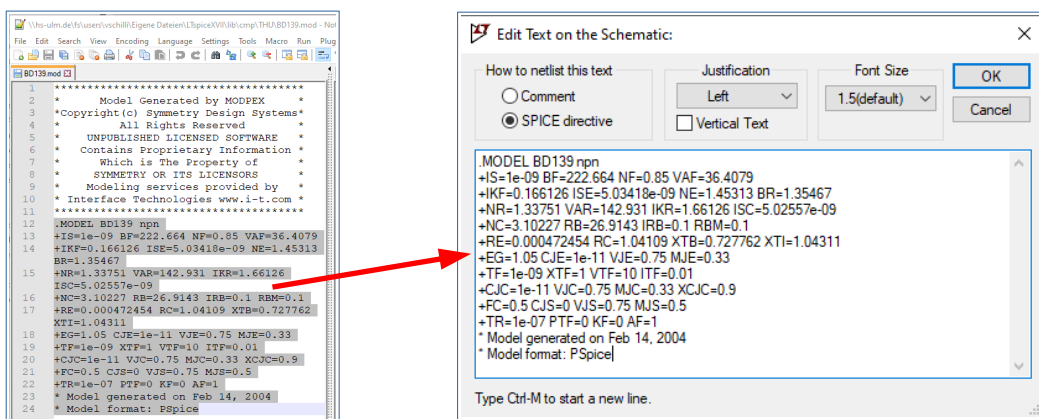
**Achtung:** Auch bei diskreten Bauteilen bekommt man oft ein Spice-Model als **Subcircuit**. In diesem Fall ist die Integration nicht mehr ganz so einfach, da z.B. Diode und Transistoren in LTspice zunächst nur ein **Model** erwarten. **Der Typ des LTspice Bauteils muss zum Typ in den Attributen des Symbols passen, bzw. in diesen angepasst werden!**

Einem Standard Element von LTspice weist man ein neues Model zu, indem man das entsprechende Symbol aus der Bibliothek einfügt und den Namen des neuen Modells als „Value“ angibt. (*NPN Transistor Q1 vom Typ BD139 in der Abbildung*)



#### 12.1.1 .MODEL Direktive

Eine Model-Beschreibung kann man direkt als Text mit Hilfe der .MODEL Direktive in den Plan einfügen. Das hat den großen Vorteil, dass dieser keine Abhängigkeiten von weiteren Dateien enthält, welche bei einer Weitergabe des Designs berücksichtigt werden müssen.

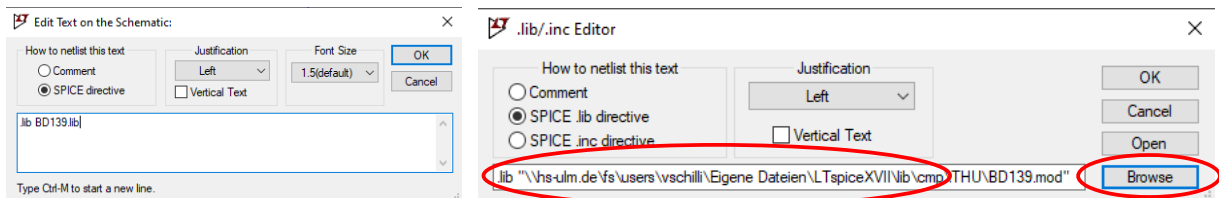


---

### 12.1.2 .lib /.inc Direktive

Die in einer Datei enthaltenen textuelle Beschreibung von einem Spice-Model kann auch mit dem **.lib** oder **.inc** Kommando in das Design integriert werden. Damit LTspice die Datei mit der Model Beschreibung findet, muss diese sich dabei im **Verzeichnis des Designs** befinden, oder mit dem **absoluten Pfad** angegeben werden.

Einfügen kann man die .lib oder .inc Direktive über das Edit-Menü des Schaltplans oder dem entsprechenden Button in der Toolbar. Beim ersten Aufruf des SPICE-Directive Dialogs erscheint das Fenster in der folgenden Abbildung links.



Natürlich kann es sich beim Speicherort der Datei auch um einen **lokalen Speicherort** handeln an dem alle Modelle gesammelt werden, die nicht in LTspice enthalten waren. Der Pfad dahin kann beliebig komplex sein, was die Eingabe etwas mühsam machen kann.

Beim Editieren eines schon im Schaltplan vorhandenen .LIB oder .INC Kommandos erscheint das Fenster so wie in der Abbildung rechts. Jetzt hat man den Vorteil, dass man einen Speicherort für die Model-Datei bequem über den **Browse-Button** auswählen kann, falls diese nicht im Verzeichnis des Designs liegt.

Der absolute Pfad kann auch eine **Internetadresse** einer Datei sein, an der man das Model gefunden hat. In diesem Fall wird die Datei dann beim ersten Aufruf der Simulation in das Verzeichnis kopiert und die Pfadangabe könnte danach auch wieder gelöscht werden. (z.B. <https://www.onsemi.com/download/models/lib/bd139.lib>)

Befinden sich die zusätzlichen Model Dateien innerhalb der von **LTspice** angelegten Kopie der **Bibliothekstruktur**, so kann die Pfadangabe abgekürzt werden und der Standardteil des Pfades kann weggelassen werden. (in der Abb. rechts reicht → `.lib THU\BD139.mod`)

Weitere Details zu .lib/.inc und Pfaden findet man auch in der LTspice Hilfe.

### 12.1.3 Model in Standard Bibliothek einfügen

Natürlich kann man das Modell eines „neuen“ Transistors z.B. BD139 auch in die Bibliothek für Bipolartransistoren von LTspice einfügen.

Dazu öffnet man die Bibliotheksdatei (`.../Eigene Dateien/LtspiceXVII/lib/cmp/standard.bjt`) direkt in LTspice und fügt bei Textdateien eine neue Zeile ein. Dabei kann man sich an den schon vorhandenen orientieren.

Öffnet sich ein Bauteileditor, benutzt man das Menü „Edit“, welches sich auch bei einem rechten Mausklick öffnet.

*(Allgemein: Vorsicht vor Verlust bei Hersteller Updates)*

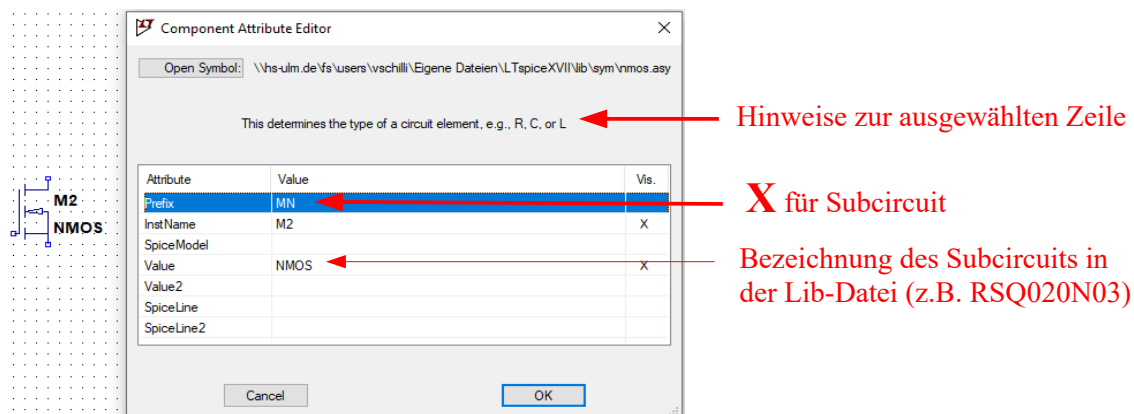
---

## 12.2 Subcircuit hinzufügen

Eine Bauteilbeschreibung, welche als Subcircuit vorliegt kann man ähnlich wie eine Model Beschreibung einbinden, oder mit Hilfe eines eigenen Symbols mit passendem Namen wie die entsprechenden Bauteile der Bibliotheken organisieren.

Bei einem Standard-Symbol aus der Bibliothek, welches normalerweise für Spice Primitives (*Dioden, Transistoren, R, L, C ...*) mit Model Definition verwendet wird, muss man ein solches in den Schaltplan einfügen und dann im **Component Attribute Editor** einige Änderungen vornehmen.

Der **Component Attribute Editor** wird aufgerufen, indem man bei gedrückter Steuerungstaste [STRG] mit der rechten Maustaste auf das Symbol klickt.



Das wichtigste Attribut wird **Prefix** genannt und bestimmt welches Spice Primitive von dem Symbol repräsentiert wird. „MN“ in der obigen Abbildung steht dabei für ein N-Channel MOSFET Model. Soll kein Primitive verwendet werden, sondern ein Subcircuit, sollte beim Prefix ein „X“ eingetragen werden.

Unter Value wird dann der Name des Subcircuits eingetragen, wie dieser in der Lib-Datei steht.

### 12.2.1 .SUBCKT Direktive

Genau wie eine Model-Beschreibung beim Einfügen eines Models, kann man auch die Beschreibung eines Subcircuits aus einer Lib-Datei direkt als Text mit Hilfe des .SUBCKT Kommandos in den Plan einfügen, bzw. die Beschreibung einfach komplett in das Design als Spice Direktive übernehmen.

### 12.2.2 .LIB /.INC Direktive

Die Beschreibung eines Subcircuits kann im Vergleich zu einem Model natürlich recht umfangreich ausfallen und man wird diesen dann doch eher mit Hilfe des **.lib** oder **.inc** Kommandos in das Design integrieren wollen. Wie beim Model muss sich die Datei mit der Beschreibung dabei im Verzeichnis des Designs befinden, bzw. mit dem absoluten Pfad angegeben werden.

Befindet sich die zusätzliche Subcircuit Library wieder innerhalb der von **LTspice** angelegten Kopie der Bibliotheksstruktur **im .../lib/cmp Verzeichnis**, so kann auch hier die Pfadangabe abgekürzt und der Standardteil des Pfades (.../lib/cmp/) weggelassen werden.

(Unterschiede .lib/.inc siehe LTspice Hilfe)



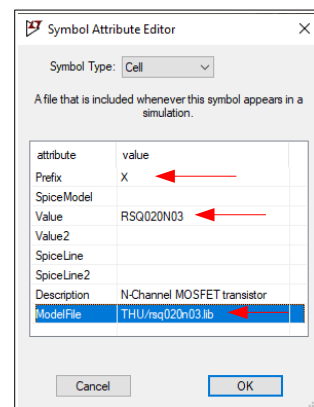
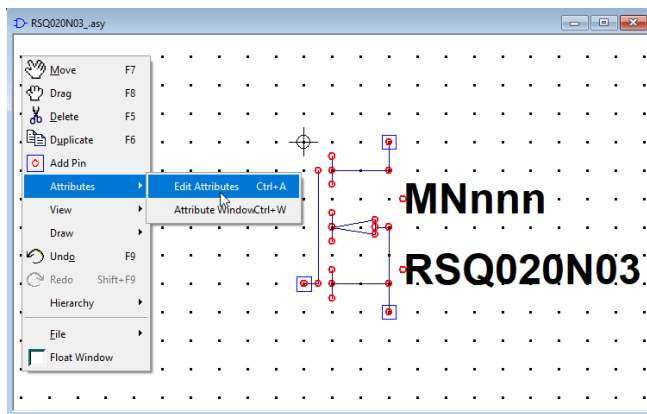
### 12.2.3 Neuen Subcircuit mit einem eigenem Symbol verknüpfen

Für Bauteile, die man voraussichtlich zukünftig öfter in einer Simulation verwenden möchte, lohnt sich auf jeden Fall das Erstellen eines kompletten Bauteils über die Verknüpfung eines eigenen Symbols mit dem Subcircuit.

#### 12.2.3.1 Vorhandenes Symbol

Meist gibt es ein passendes Symbol in der Standardbibliothek, welches man im **Component Attribute Editor** (siehe Abb. weiter oben) über die **Open Symbol** Schaltfläche öffnet und unter neuem Namen in einem Verzeichnis für eigene Symbole abspeichert. Dieses Verzeichnis könnte hier z.B. `.../lib/sym/THU` sein.

Die Verknüpfung des neuen Symbols mit der Subcircuit Library erstellt man dann im **Symbol Attribute Editor**.

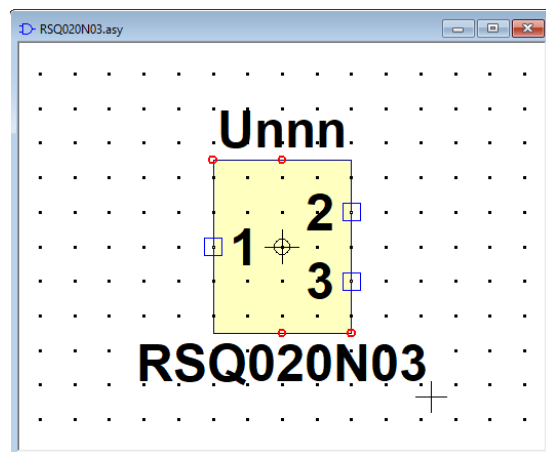
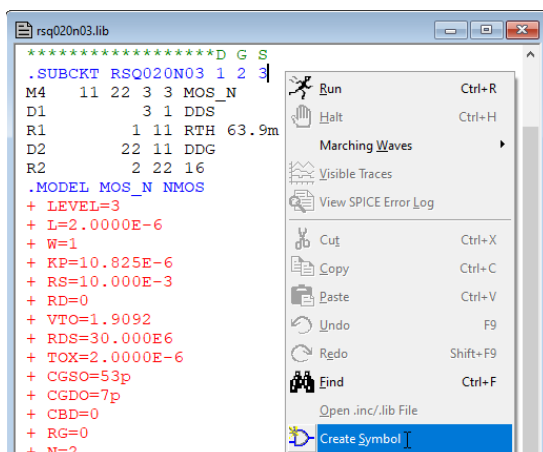


Hier muss man ggf. wieder **Prefix** auf **X** abändern, unter **Value** den Namen des Subcircuits angeben und dann unter **ModelFile** die entsprechende Datei (mit Pfad) eingeben.

Die Anpassung von Prefix und Value sowie die Angabe des Subcircuits muss man so nur einmal machen. Dies alles ist dann beim Einfügen des neuen Symbols in ein Design schon vorhanden und muss nicht jedes mal angepasst werden.

#### 12.2.3.2 Symbol aus Subcircuit erzeugen

Ein sehr einfaches Symbol für eine Subcircuit Beschreibung kann man erzeugen, wenn man die Bibliotheksdatei in LTSpice öffnet und mit der rechten Maustaste in die entsprechende Zeile klickt. Ein so erzeugtes Symbol wird im Verzeichnis `.../lib/sym/Autogenerated` abgespeichert. Selbstverständlich kann man es noch vernünftig aufbereiten und in ein Verzeichnis seiner Wahl verschieben.



---

## 12.3 Bauteile als Hierarchical-Blocks der Library hinzufügen

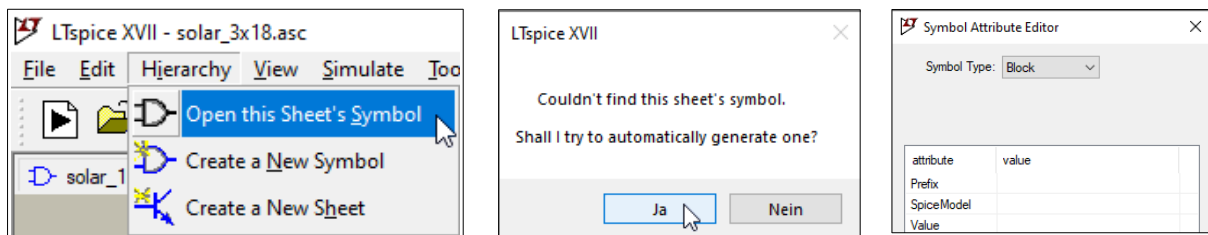
Möchte man Bauelemente in Schaltplan-Form anstatt als Subcircuits anlegen und auch so abspeichern, dann geschieht dies genau wie beim Entwurf hierarchischer Schaltpläne weiter oben. Man muss für diese als Schaltplan vorliegenden Bauteile ein Symbol anlegen.

Ist bei hierarchischen Schaltplänen das Verzeichnis gewöhnlich das Verzeichnis des Designs, speichert man Bauteile als Hierarchical-Blocks besser gleich in einem Ordner im Symbolpfad der Lib. (...lib/sym/THU).

**Achtung:** Die Schaltplan-Datei sollte keinen Namen haben, für den es schon irgendwo ein gleichnamiges Standard-Symbol gibt!

### 12.3.1 Symbol für erzeugen

Bei der automatischen Erzeugung eines Symbols für einen Schaltplan, wie in Kapitel 11 beschrieben, bekommt das Symbol auch gleich den passenden Namen. (*Symbolname muss gleich dem des Schaltplans sein*). Die Symboldatei wird im selben Verzeichnis gespeichert.



Im Symbol Attribute Editor sieht man, dass der **Symbol Type** auf **Block** eingestellt wurde und alle Attribute leer bleiben.

Die Auswahl des Symbol Types Block bewirkt, dass LTspice einen passenden Plan im Verzeichnis des Symbols sucht. Die Verknüpfung zwischen Symbol und Plan entsteht so einfach über die Namensgleichheit.

### 12.3.2 Vorhandene Designblocks in Library aufnehmen

Ein Hierarchical Block, welcher ein Bauteil repräsentiert, unterscheidet prinzipiell in nichts von einer Seite in einem hierarchischen Schaltplan. Nur der Speicherort ist ein anderer.

Deshalb kann man auch solche Schaltplanseiten, welche ursprünglich nur Teilpläne eines Designs waren, einfach als vorgefertigte Blocks in die Library aufnehmen, indem man die beiden Dateien für Plan und Symbol in das Verzeichnis der Library kopiert. (...lib/sym/THU)

Durch die Aufnahme in die Library wird ein Block für alle Designs verfügbar und muss nicht manuell in die Designverzeichnisse kopiert werden.

---



---

## 13 Beispielschaltungen

### 13.1 Beispiele im .../LTspice/examples/Applications Ordner

Mit der Installation von LTspice erhält man auch eine umfangreiche Sammlung an Beispielschaltungen von Bauteilen des Herstellers Analog Devices und des ehemaligen Herstellers Linear Technologies, der von Analog Devices übernommen wurde.

Bei Installationen ab Version 17.1 sind die Beispiele und Bibliotheken im Installationsordner des Programms nur noch als Zip-Datei enthalten. Die einzelnen Dateien findet man dann meist im Benutzerverzeichnis `<userdir>/AppData/Local/LTspice/examples/Applications`.

Zusätzlich gibt es im *examples/Applications* Ordner auch Beispiele für die diversen **UniversalOpAmp** Modelle und verschiedene Filterschaltungen.

### 13.2 Beispiele im .../LTspice/examples/Educational Ordner

Die Beispiele im *Educational* Ordner sind zum Teil Schaltungen, die in der integrierten Hilfe verwendet werden. Dazu kommen noch einige Andere, aber leider ohne ausführlichere Dokumentation.

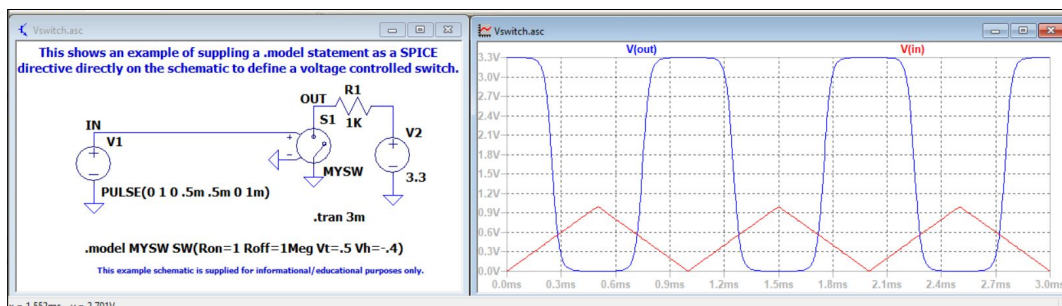
## 13.3 Schalter

### 13.3.1 Einfacher Schalter SPST (switch)

Das passende Circuit Element für Schalter in LTspice ist der **Voltage Controlled Switch**. Es gibt auch noch einen **Current Controlled Switch**.

Diese findet man wie alle Elemente in der Hilfe über die Suche oder unter **Help->Ltspice->Ltspice->Circuit Elements**. In der Hilfe findet man auch einen Verweis, auf eine Schaltung im Ordner *.../examples/Educational* welche einige Attribute illustriert.

Wie der Name schon beschreibt, braucht man für den *Voltage Controlled Switch* einerseits den Schalter selber, welcher aus dem **Symbol SW** und einer Beschreibung in Form einer **.model <...> SW(...)** Direktive besteht und zudem eine **Spannungsquelle** um den Schalter zu steuern.



Im Beispiel wird für die Quelle die Funktion PULSE verwendet, um eine Dreieck-förmige Steuerspannung zu erzeugen. Dem Schalter wurde „MYSW“ als Value zugewiesen und über die **.model** Directive wurde festgelegt, dass er im geschlossenen Zustand einen Widerstand von  $1\Omega$  und geöffnet  $1M\Omega$  hat.

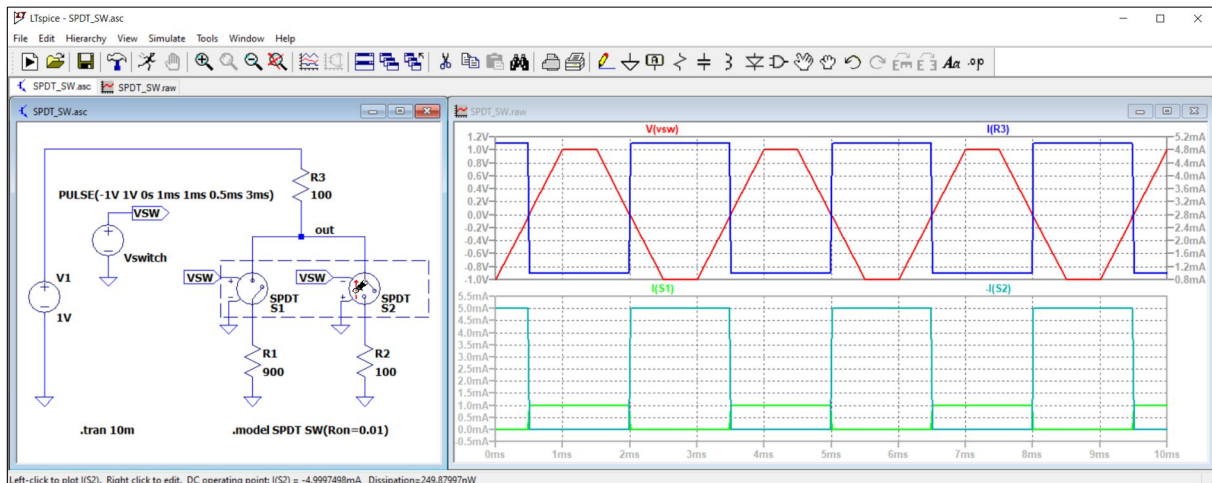
Die **Schaltswelle** ( $V_t$ ) liegt bei **+0.5V** und die **Hysterese** ( $V_h$ ) wurde mit **0.4V** angegeben, somit findet der Schaltvorgang zwischen 0.1V und 0.9V statt und am Knoten **OUT** ergibt sich das abgerundete Rechtecksignal **V(out)**.

**Achtung:** Auch das Vorzeichen bei der Hysterese beeinflusst den Schaltvorgang → Hilfe!

---

### 13.3.2 Wechselschalter SPDT

LTspice bietet nur die einfachen Schaltelemente an. Falls man in seiner Schaltung einen Wechselschalter oder ein anderes komplexeres Schaltelement benötigt, dann muss man sich dieses aus mehreren einfachen Switches zusammenbauen und entsprechend ansteuern. Für einen Wechselschalter benötigt man also zwei Switches, die man synchron so ansteuern muss, dass jeweils einer geöffnet und der andere geschlossen ist.



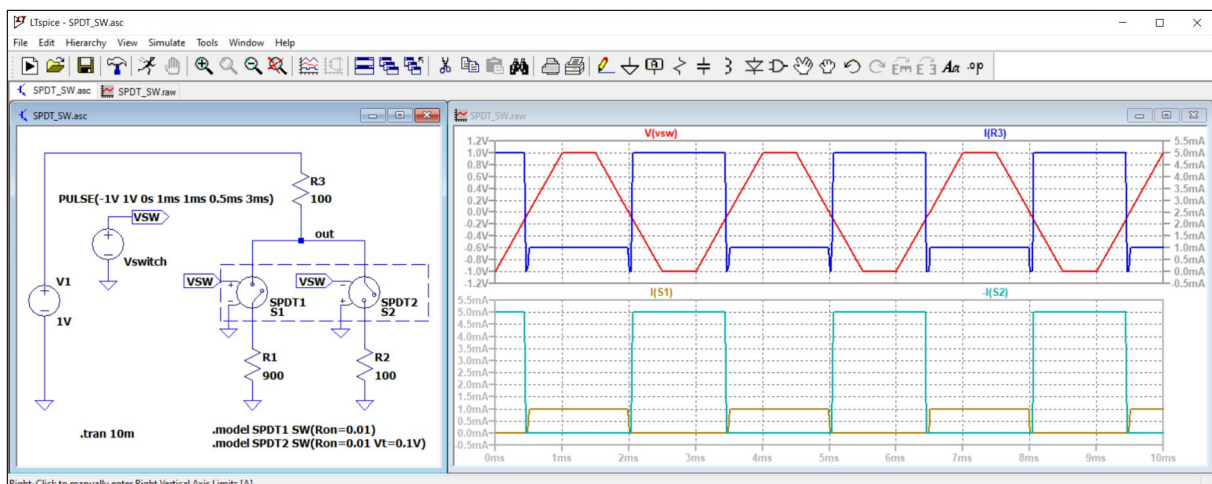
Im Beispiel wurden die zwei Schalter S1 und S2 über ihren Value SPDT mit der selben **.model** Beschreibung verknüpft, aber wechselseitig angesteuert, indem die Steuerspannung bei S2 einfach invertiert angelegt wurde.

Die voreingestellte Spannung, bei der die Schalter schalten ist 0V und geschlossen werden sie, wenn am positiven Steuereingang (+) eine positivere Spannung als am negativen (-) anliegt.

Im Schaltplan links ist anhand des Pfeils im Symbol der Strommesszange ersichtlich, warum der Strom durch S2 im Diagramm rechts invertiert (*als -I(S2)*) dargestellt wird.

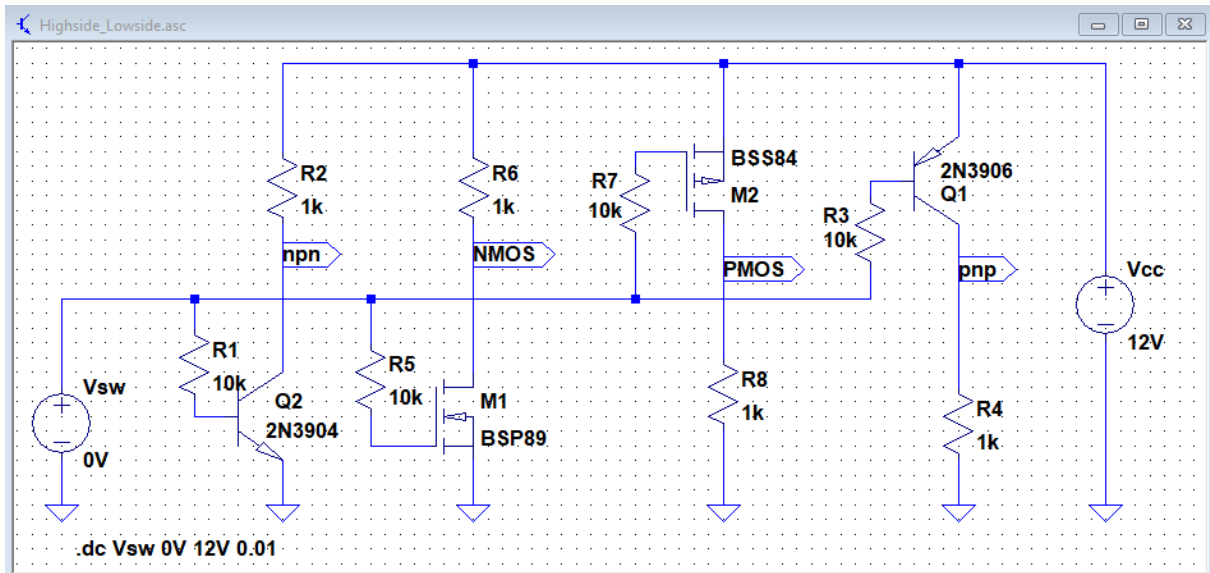
### 13.3.3 Reales Verhalten eines Wechselschalters

Bei einem realen Schalter wird beim Umschalten ein Zustand auftreten, bei dem kein Kontakt geschlossen ist. Dies kann man in obigem Beispiel durch verschiedene Modelle für S1 und S2 erreichen. Man muss die Schaltschwelle für S2 etwas anheben (z.B.  $Vt=0.1V$ ).

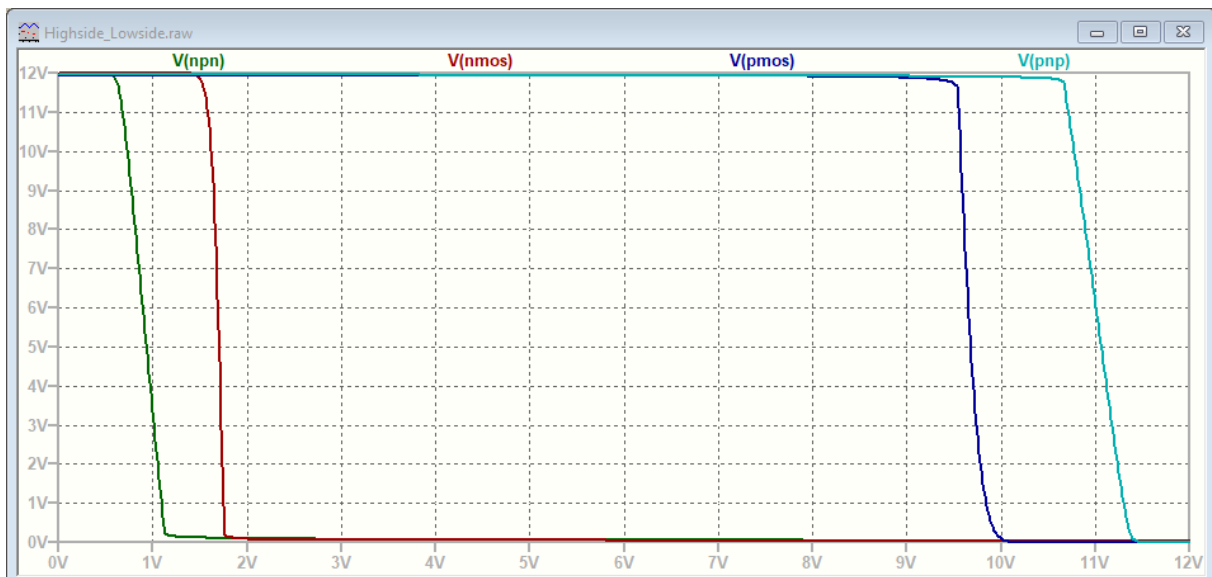


(Alternativ könnte man auch das selbe Model für beide Schalter verwenden und das Bezugspotential eines Steuereingangs der Schalter mit einer zusätzlichen Quelle verschieben)

### 13.4 Transistoren als Schalter / High side – Low Side



Bla...

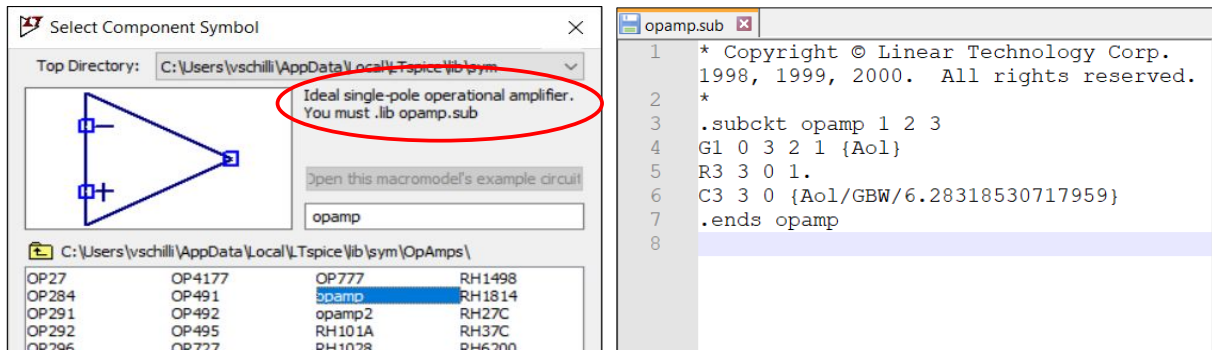


Bla...

## 13.5 Operationsverstärker

Möchte man für eine Simulation kein spezielles Modell eines real existierenden Operationsverstärkers verwenden, bietet LTSpice verschiedene universelle Modelle an, bei denen es jedoch einiges zu beachten gilt.

### 13.5.1 Das Symbol „opamp“

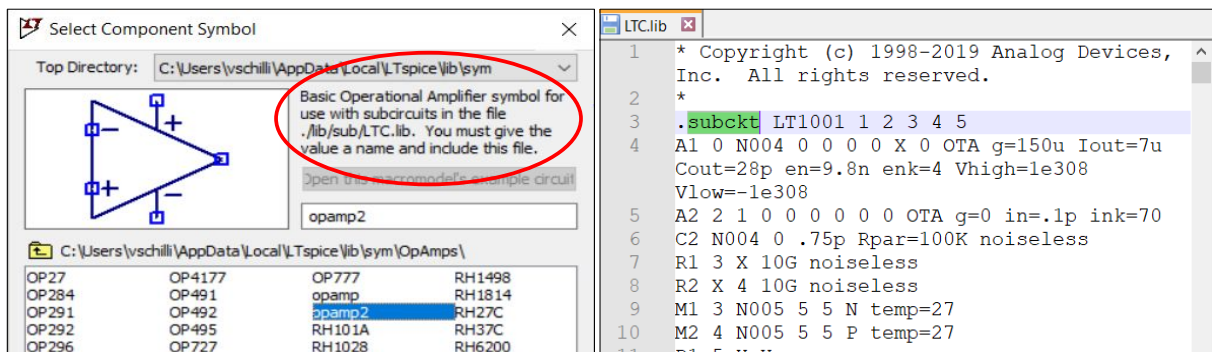


Beim Symbol **opamp** handelt es sich wie im Hinweistext daneben angegeben um einen idealen Verstärker. Der Schaltplan **muss** die Spicedirective „**lib opamp.sub**“ enthalten, da dem Symbol vorab kein SpiceModel zugeordnet wurde!

In der durch die .lib Directive verknüpften Datei wird dann ein sehr einfacher Subcircuit aus einer **Voltage Dependent Current Source (G)**, einem **Widerstand (R)** und einem **Kondensator (C)** definiert.

Die Parameter **Aol** und **GBW** sind im Symbol angelegt und können auch im Attribute Editor verändert werden. (Rechtsklick auf Symbol)

### 13.5.2 Das Symbol „opamp2“



Im Gegensatz zum Symbol **opamp** gehört das Symbol **opamp2** zu den fast 200 in der Bibliotheksdatei „LTC.lib“ enthaltenen Modellen real existierender Operationsverstärker.

Wie in der Beschreibung angegeben, muss man im Parameter **Value (opamp)**, einen der vorhandenen Subcircuits (z.B. **LT1001**) angeben und die Bibliothek mit der Directive „**inc LTC.lib**“ oder „**lib LTC.lib**“ einbinden.

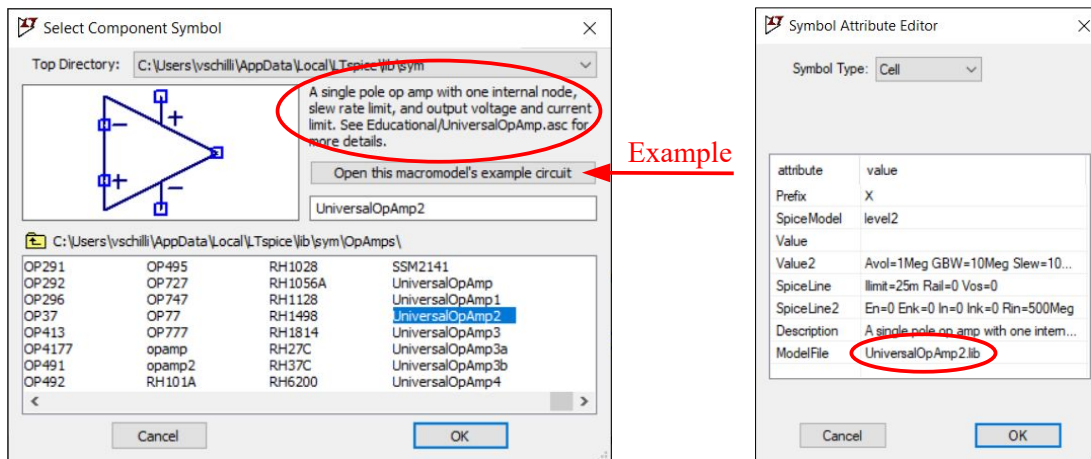
#### 13.5.2.1 Alternativen zu opamp2 / LTC.lib

Für die in der Bibliothek LTC.lib enthaltenen Operationsverstärker gibt es eigentlich eigene Symbole, welche die entsprechenden Namen im Parameter Value schon eingetragen haben und auch die Verknüpfung zur Bibliothek enthalten.

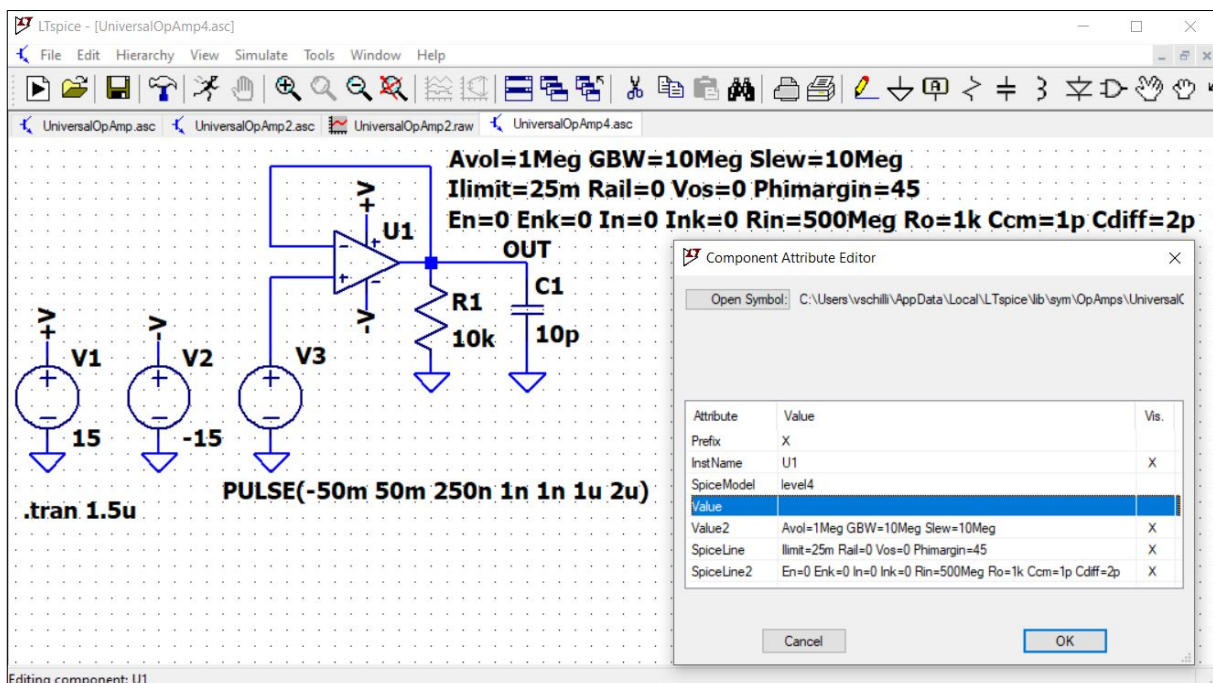
→ Die Verwendung von **opamp2** empfiehlt sich somit nicht wirklich



### 13.5.3 Die verschiedenen UniversalOpAmp



Die verschiedenen **UniversalOpAmp** Symbole sehen alle exakt gleich aus, sind aber mit unterschiedlichen Model Dateien verknüpft, in welchen die in der Beschreibung angegebenen Komplexitätsgrade realisiert sind. Für alle UniversalOpAmp stehen einfache Beispielschaltung im **.../examples/Applications** Ordner zur Verfügung, bei der alle Verfügbaren Parameter angegeben wurden.



Die den Symbolen zugeordneten Beispielschaltungen im Examples Ordner, kann man einfach über die Schaltfläche „**Open this macrocell example circuit**“ im Bauteilauswahldialog öffnen.

Die wichtigsten verfügbaren Parameter der universalOPs sind:

Avol: Leerlaufverstärkung  
Slew: Anstiegsgeschwindigkeit

GBW: Verstärkungsbandbreiteprodukt

Vos: Offsetspannung

Ilimit: Ausgangsstrombegrenzung

Rail: (max. Ausg.spannung, Versorgung – Rail)

Phimargin: Phasenreserve

Vom Rest der Parameter finden sich einige in den „**Special Functions**“ unter „**Circuit Elements**“ in der LTspice Hilfe.

---

## 13.6 Transformatoren / Übertrager

## 13.7 Solarzellen

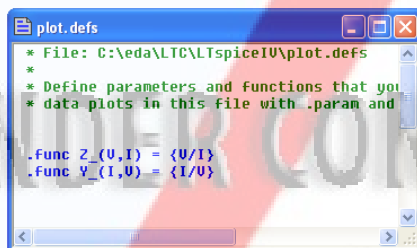
# 14 Ergänzende Informationen und Techniken

## 14.1 Benutzerdefinierte Funktionen und Parameter / Plot Definitions 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



## 14.2 Option `uic` - Skip initial operating point solution (Transientanalyse)

## 14.3 Option `plotwinsize=0`

## 14.4 FFT → GK 6

## 14.5 Übertrager → GK x.y, TUM 3.1

## 14.6 Gesteuerte Quellen → TUM 3.2

---