

# **Das Schaltungssimulationsprogramm LTSpice - einige Ergänzungen -**

Prof. Dr.-Ing. Rudolf Koblitz  
Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft

16. August 2011



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeines</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Grundsätzlicher Aufbau des Programms LTspice</b>	<b>3</b>
2.1	Schaltungsspezifische Dateien . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Aufbau der Netzliste</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Die wichtigsten SPICE-Kommandos</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Analysearten</b>	<b>6</b>
5.1	AC-Analyse . . . . .	7
5.2	DC-Analyse . . . . .	8
5.3	Transienten-Analyse . . . . .	9
5.4	.STEP - Kommando . . . . .	10
<b>6</b>	<b>Spannungs- und Stromquellen</b>	<b>11</b>
6.1	Source-I und Source-V . . . . .	11
6.1.1	AC-Quelle . . . . .	12
6.1.2	Transienten-Quelle . . . . .	12
6.1.3	Pulse-Quelle . . . . .	13
6.1.4	Sinus-Quelle . . . . .	14
6.2	Source-Vmarker . . . . .	16
<b>7</b>	<b>Digitale Elemente der Bibliothek EIT_Digital</b>	<b>16</b>
7.1	Wahl der Verzögerungszeit TD . . . . .	18
7.2	Versorgungsspannung der digitalen Elemente . . . . .	18
7.3	Verwendung des Blockes probe_dig . . . . .	19
7.4	Verwendung der Bibliothek LT_original_libs/Digital . . . . .	19



## 1 Allgemeines

Für LT-Spice steht umfangreiches Dokumentationsmaterial zur Verfügung.

1. die online-Hilfe, die nach Starten von LT-Spice mit der F1-Taste abgerufen werden kann.
2. ein Handbuch (in englisch), das in der Programmleiste als Link (LTspice Manual) in einer pdf-Datei zur Verfügung steht. Dieses Handbuch entspricht weitgehend der Online-Hilfe.
3. ein Tutorial (in englisch), das ebenfalls in der Programmleiste als Link abgespeichert ist (LTspice Tutorial) und dort als pdf-Datei zur Verfügung steht.

Ziel dieser Übersicht ist eine Ergänzung und Beschreibung der wichtigsten Kommandos, eine detaillierte Beschreibung der Puls und Sinusquellen, wie sie für die Transientenanalyse benötigt werden. Schließlich noch eine kurze Erläuterung der digitalen Elemente der Bibliothek **EIT\_Digital**.

Es werden die wichtigsten Punkte genauer behandelt, die im Manual und der online-Hilfe zu knapp oder gar nicht beschrieben sind.

## 2 Grundsätzlicher Aufbau des Programms LTspice

In Abbildung 2.1 ist die grundsätzliche Struktur und Dateianbindung des Programms LTspice gezeigt.

Das eigentliche Simulationsprogramm LT-Spice, welches aus dem Original Berkley-Spice entwickelt wurde, hat zusätzlich noch die Schaltbildeingabe (Schematic Capture) und die graphische Ausgabe (Waveform-Viewer) implementiert. Es handelt sich um eine einzige ausführbare Datei (scad3.exe), die eine Dateigröße von 5,5MB aufweist.

Prinzipiell gibt es 3 verschiedene Dateitypen, auf die zugegriffen wird:

1. **scad3.ini** Diese Datei liegt im Windows-Verzeichnis und enthält alle benutzerdefinierten Einstellungen wie Arbeitsverzeichnis, zuletzt aufgerufene Schaltungen, alle relevanten Einstellungen für Farben, shortcuts, Simulationseinstellungen u.s.w. . Diese Einstellungen können vom Benutzer im Programm nach Belieben geändert werden, und stehen bei jedem Neustart des Programms zur Verfügung.
2. **<name>.xxx** Diese Dateien liegen im Arbeitsverzeichnis und sind schaltungs- und projektspezifische Daten.
3. **lib/...** Dies sind Bibliotheksdateien, die für die Schaltbildeingabe und die Simulation zur Verfügung stehen müssen. Sie liegen **grundsätzlich** im Ordner **lib** welcher im gleichen Verzeichnis liegen muss, in dem auch das ausführbare Programm (scad3.exe) liegt.

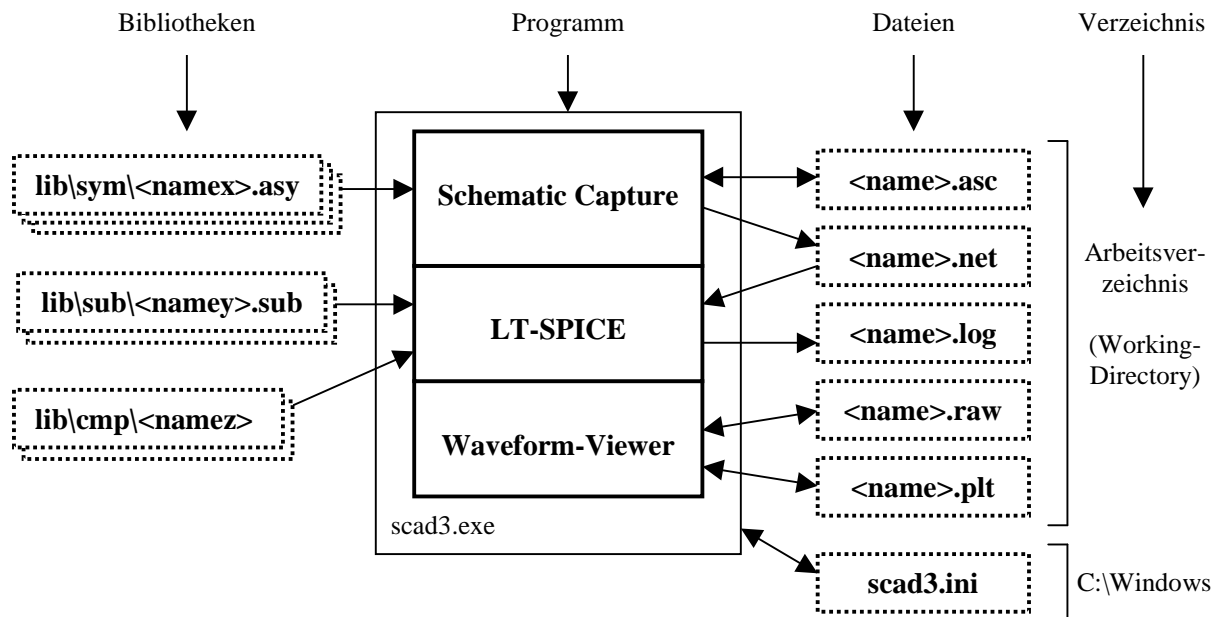


Abbildung 2.1: Programm LTspice und benötigte Dateien

## 2.1 Schaltungsspezifische Dateien

Diese Dateien liegen im Arbeitsverzeichnis. Die Dateien haben folgende Bedeutung:

**<name>.asc** Diese Datei ist eine Ascii-Datei und enthält die Daten für das Schaltbild. Diese Datei ist – nach Installation von LTspice – eine registrierte Datei. Durch Doppelklicken auf eine Datei mit der Endung **.asc** wird automatisch LTspice gestartet.

**<name>.net** Dies ist die Netzliste, die als Eingabedatei für LTspice benötigt wird. Im Programm selbst kann über **View** ⇒ **SPICE Netlist** diese Datei angeschaut werden.

**<name>.log** Dies ist die LOG-Datei von LTspice. In dieser Datei werden simulationsspezifische Aktivitäten aufgelistet. Insbesondere ist diese Datei wichtig bei der Fehlersuche. Laufzeitfehler von LTspice werden dort aufgelistet. Im Programm selbst kann über **View** ⇒ **SPICE Error Log** diese Datei angeschaut werden.

**<name>.raw** Dies ist die Graphik-Datei des Waveform-Viewers. Sie wird erzeugt, wenn der Waveform-viewer aufgerufen wird. Diese Datei kann – je nach Simulationsdauer und Komplexität – recht groß werden. Nach Beendigung eines Projektes sollte man diese Datei immer löschen, um Plattenplatz zu sparen. Durch eine neuerliche Simulation kann diese Datei immer wieder rekonstruiert werden; man braucht sie daher nicht abzuspeichern.

**<name>.plt** Diese Datei enthält alle Kommandos, die zur Generierung der graphischen Ausgabe nötig waren. Man kann diese Datei mit **Plot Settings** ⇒ **Save Plot Settings** abspeichern und mit **Plot Settings** ⇒ **Open Plot Settings File** wieder aufrufen. Man muss dann nicht mehr alle Kommandos im Waveform-Viewer nochmals eingeben. Wenn die Datei **<name>.plt** bereits existiert, wird nach einer Simulation sofort der Waveform-Viewer mit den Einstellungen, die in dieser Datei abgespeichert sind, gestartet.



Alle Dateien mit Ausnahme der **.raw** - Datei sind Ascii-Dateien und können mit jedem beliebigen Ascii-Editor geöffnet werden.

### 3 Aufbau der Netzliste

Der Aufbau der SPICE-Netzliste ist als de-facto-Standard von praktisch allen Simulationsprogrammen vom Original-Berkley-SPICE übernommen worden. Es gelten folgende Regeln:

1. SPICE unterscheidet nicht zwischen Groß und Kleinschreibung.
2. Die erste Zeile ist die sog. Titelzeile. In LTspice wird dort der volle Pfadname der Schaltbilddatei eingetragen.
3. Die elektrischen Elemente werden durch Buchstaben am Beginn der Zeile gekennzeichnet. Jedes Element besitzt einen anderen Buchstaben (z.B. **R** für Widerstand, **D** für Diode, **C** für Kondensator, **L** für Spule etc.) Im Manual und in der online-Hilfe sind alle verfügbaren Elemente beschrieben.
4. Kommandos beginnen grundsätzlich mit einem Punkt.
5. Zeilen beginnend mit einem Stern (Asterisk) (\*) oder einem Semikolon sind Kommentarzeilen und werden von LT-Spice nicht berücksichtigt.
6. Zeilen, beginnend mit einem + Zeichen sind Fortsetzungszeilen, wenn man eine Elementbeschreibung oder einen Befehl nicht in eine Zeile schreiben konnte oder wollte.
7. Die letzte Zeile ist die Kommandozeile **.END**

Alle Zeilen der Netzliste können folglich nur mit folgenden Zeichen beginnen: Buchstabe . + \* ;

### 4 Die wichtigsten SPICE-Kommandos

SPICE verfügt über eine Fülle von Kommandos, die im Manual und der online-Hilfe unter **LTspice**  $\Rightarrow$  **Dot Commands** beschrieben sind. Für den SPICE-Einsteiger ist es zunächst wichtig, sich auf einige wesentlichen Kommandos zu beschränken und diese zu studieren. Die wichtigsten Kommandos und ihre Bedeutung sind im Folgenden aufgelistet.

- .OP** Es wird nur eine Arbeitspunktanalyse durchgeführt. Nach der Berechnung werden die Knotenspannungen und Elementeströme in einem Fenster aufgelistet.
- .AC** AC-Simulation. Dieses Kommando enthält die Kenngrößen (Frequenzbereich) für die Kleinsignalberechnung. SPICE berechnet zunächst den Arbeitspunkt, führt eine Linearisierung im Arbeitspunkt durch, und berechnet die komplexen Ströme und Spannungen. Die Ergebnisse werden im Waveform-Viewer in einem Bode-Diagramm als Amplitude (in dB) und als Phase in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt.



- .DC** DC-Simulation. Arbeitspunktberechnung als Funktion einer Spannungsquelle, Stromquelle, Temperatur oder einem globalen Parameter.
- .TRAN** Transienten-Simulation. Berechnung von Spannungen und Strömen als Funktion der Zeit. Die nichtlinearen Differentialgleichungen werden Zeitschritt für Zeitschritt iterativ berechnet. Eine automatische Schrittweitensteuerung passt sich dem zeitlichen Verlauf an: an sprungartigen Übergängen wird die Zeitschrittweite verringert; wenn keine oder nur geringe Spannungsänderungen auftreten, wird die Schrittweite vergrößert. Diese Maßnahme reduziert die Simulationszeit erheblich.
- .MODEL** Beschreibung von Halbleiterbauelementen (Dioden, Transistoren) und anderen nicht-linearen Funktionen (z.B. spannungs- und stromgesteuerte Schalter)
- .PARAM** Definition von globalen Parametern
- .STEP** parametrische Variation von Spannungsquellen, Stromquellen, Temperatur, globalen Parametern und Modellparametern, um mehrfachsimulationen mit verschiedenen Parameterwerten zu bekommen.
- .FOUR** ermöglicht eine Fourier-Analyse, um die Spektralkomponenten eines Signals zu bestimmen. Es werden neben den Harmonischen auch der sog. THD-Wert (Total Harmonic Distortion) berechnet. Die Ergebnisse der Fourier-Analyse werden in die Datei **<name>.log** geschrieben und können mit **View**  $\Rightarrow$  **SPICE Error Log** angeschaut werden.
- .INCLUDE** Ascii-Datei wird zur Netzliste hinzugeladen.
- .LIB** eine Ascii-Datei wird als Library hinzugefügt. In Library.Dateien finden sich nur **.model** und **.subckt** Kommandos
- .SUBCKT** Ein Schaltungsteil (besonders im Hierarchischen Design) wird als Teilschaltung in einer Unter-Schaltung (Sub-Circuit) beschrieben.
- .ENDS** Ende einer Subcircuit-Beschreibung Zwischen dem Kommando **.SUBCKT** und **.ENDS** können Elemente, **.model** Kommandos und **.param** Kommandos platziert werden.
- .END** letztes Kommando einer Netzliste

## 5 Analysearten

In SPICE sind folgende Analysearten verfügbar:

- **AC-Analyse** Es wird eine Linearisierung der (nichtlinearen) Schaltung im Arbeitspunkt vorgenommen. Die Kommandozeile in Spice beginnt mit **.AC** Mit Hilfe des Kleinsignalersatzschaltbildes wird eine lineare Berechnung für einen angegebenen Frequenzbereich vorgenommen. Die graphische Ausgabe der Signale erfolgt als Bode-Diagramm (Amplitude logarithmisch (in dB) und Phasengang in Grad).
- **DC-Analyse** in Abhängigkeit von Quellen, globalen Parametern oder Temperatur wird eine Arbeitspunktberechnung vorgenommen. Die Kommandozeile in Spice beginnt



mit **.DC**. Leider sind die Erklärungen im englischsprachigen Manual und in der online-Hilfe nicht vollständig, so dass hier eine genauere Beschreibung aller Simulationsmöglichkeiten aufgezeigt ist.

- **Transienten-Analyse** es wird der zeitliche Verlauf von Spannungen und Strömen berechnet. Die Kommandozeile in Spice beginnt mit **.TRAN**

Die gewünschte Analyse wird im Schaltbild immer als Kommando abgespeichert (Spice-Zeile, beginnend mit einem Punkt). Nichtbenutzte bzw. früher angewählte Analysen werden nicht gelöscht, sondern durch ein Semikolon am Beginn des Kommandos auskommentiert.

Unter dem Menüpunkt **Simulation** ⇒ **edit Simulation cmd** können alle abgespeicherten Kommandos editiert werden, auch wenn diese durch ein Semikolon auskommentiert sind. Die in diesem Menü ausgewählte Analyseart entfernt beim entsprechenden Kommando das Semikolon und kommentiert allen anderen Simulationskommandos mit einem Semikolon aus.

## 5.1 AC-Analyse

Diese ist im Handbuch und der online-Hilfe gut beschrieben. Das Kommando lautet:

**.AC <keyword> <Nsteps> <StartFreq> <EndFreq>**

**keyword** kennzeichnet den Typ der Inkrementierung. Es gibt 4 Möglichkeiten: **lin** (für lineare Frequenzschrittweite), **oct** (logarithmische Frequenzachse) oder **dec** (ebenfalls logarithmische Schrittweite); die vierte Angabe wäre noch **list**, wonach eine Liste von Frequenzwerten angegeben werden muss. Man wird dies Option i.A. nicht benötigen. **lin** wird man i.A. ebenfalls nicht verwenden, da man eigentlich immer eine logarithmische Frequenzachse wünscht. Auf **oct** kann man i.a. verzichten, **dec** genügt.

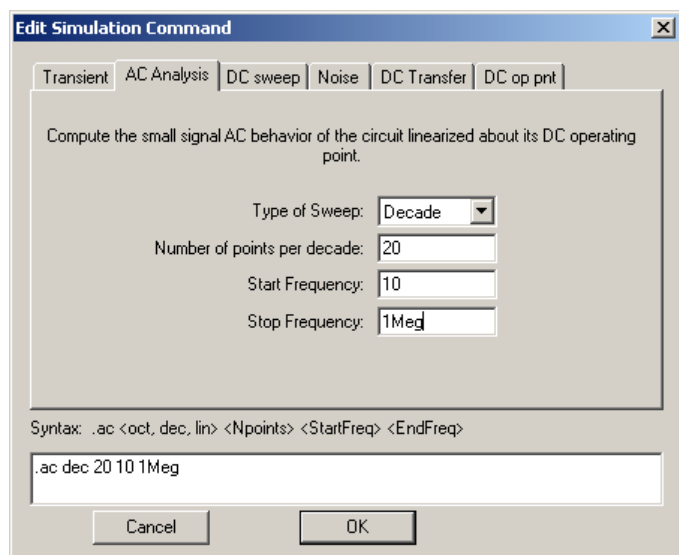
**Nsteps** Anzahl der Frequenzpunkte bei der linearen Inkrementierung (bei **lin** als Keyword), Anzahl der Punkte pro Oktave (bei **oct** als Keyword) bzw. Anzahl der Frequenzpunkte pro Dekade (bei **dec** als keyword).

**StartFreq** unterer Frequenzwert in Hertz

**EndFreq** oberer Frequenzwert in Hertz

Unter dem Menüpunkt **Simulation** ⇒ **edit Simulation cmd** kann man die Registerkarte AC-Analysis anwählen, wie sie rechts abgebildet ist.

Mit diesem Menü lässt sich das **.AC**-Kommando leicht eingeben; die entsprechenden Keywords und Zahlenwerte werden dann automatisch an die richtige Stelle geschrieben.



## 5.2 DC-Analyse

Diese ist im Handbuch und der online-Hilfe zwar beschrieben, es sind jedoch nicht alle Möglichkeiten der Eingabe aufgelistet. Das Kommando lautet:

**.DC** <keyword> <Source> <Startwert> <Stopwert> <Increment>

**keyword** (Type of Sweep) kennzeichnet den Typ der Inkrementierung. Es gibt 3 Möglichkeiten: **lin** (für lineare Schrittweite), **oct** (logarithmische Schrittweite) oder **dec** (ebenfalls logarithmische Schrittweite). Das Keyword kann auch ganz fehlen, dann wird lineare Inkrementierung angenommen.

**Source** Hier kann man eine Stromquelle oder eine Spannungsquelle angeben. Zusätzlich zu dem in der online-Hilfe und im Manual angegebenen Möglichkeiten lassen sich noch die Temperatur und globale Parameter als Quelle angeben.

**Startwert** Startwert: kleinster Wert

**Stopwert** Stopwert: größter Wert

**Increment** Incrementwert bei linearer Progression bzw. Anzahl der Punkte pro Oktave bzw. Dekade bei logarithmischer Incrementation. Statt der drei Werte <**Startwert**> <**Stopwert**> <**Increment**> kann auch **List Wert1 Wert2 Wert3...** angegeben werden. Es werden dann nur die nach **List** angegebenen Werte genommen.

Unter dem Menüpunkt **Simulation** ⇒ **edit Simulation cmd** kann man die Registerkarte DC-Analysis anwählen, wie sie rechts abgebildet ist. Dort würde z.B. die Spannungsquelle V1 von 5V bis 20V in 0,1V-Schritten durchgeführt werden.

Mit diesem Menü lässt sich das .DC-Kommando leicht eingeben; die entsprechenden Keywords und Zahlenwerte werden dann automatisch an die richtige Stelle geschrieben.

Wie man erkennt, kann man bis zu 3 Quellen geschachtelt angeben (nested sweep). Statt einem zweifach geschachtelten DC-Sweep ist jedoch ein einfacher DC-Sweep und eine zusätzlichen **.step**-Anweisung übersichtlicher (siehe Kapitel 5.4)

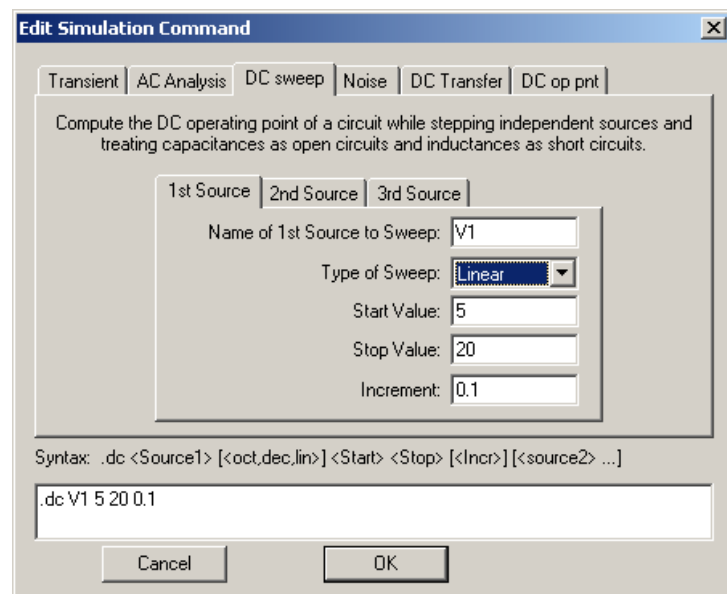


Abbildung 5.1: Menü **edit Simulation cmd**; Registerkarte DC Sweep ausgewählt

Als *DC-Source* sind folgende Angaben zulässig:





**Spannungsquelle:** Man gibt den Namen der Spannungsquelle (z.B. **V1**, **V14**,... ) an. Die angegebene Spannungsquelle muss als Element im Schaltbild vorhanden sein.

**Stromquelle:** Der Name der Stromquelle (z.B. **I1**, **I14**,... ) muss angegeben werden. Die angegebene Stromquelle muss als Element im Schaltbild vorhanden sein.

**Temperatur:** Man gibt als *DC-Source* **Temperatur** ein.

**Globaler Parameter:** Man gibt als *DC-Source* **Param XX** ein, wobei XX der gewünschte globale Parameter ist.

---

Einige Beispiele:

alle Anweisungen lassen sich immer über das Menü **edit Simulation cmd** (Registerkarte DC Analysis) eingeben.

**.DC I5 0m 10m 100u**

Stromquelle I5 wird linear von 0mA bis 10mA in Schritten von 100μA hochgefahren.

**.DC TEMP -40 120 5**

Die Temperatur wird linear von -40°C bis +120°C in Schritten von 5°C hochgefahren.

**.DC TEMP List -40 0 30 60 100**

Die Schaltung wird mit den Temperaturwerten -40°C, 0°C, 30°C, 60°C, 100°C berechnet.

**.DC dec Param RB 10k 1MEG 10**

Der Parameter RB wird logarithmisch von 10kΩ bis 1MΩ hochgefahren, wobei pro Dekade 10 Werte genommen werden.

**.DC Param CX 1p 100p 1p**

Der Parameter CX wird linear von 1pF bis 100pF in Schritten von 1pF hochgefahren.

---

### 5.3 Transienten-Analyse

Die Transienten-Analyse erlaubt die Berechnung von Spannungen und Strömen als Funktion der Zeit, so wie man das in der Messtechnik auch von einem Oszilloskop kennt. Das Kommando lautet:

**.TRAN <Tstep> <Tstop> [Tstart [dTmax]] [modifiers]**

Wenn nur die Stop-Zeit festgelegt werden muss, genügt auch die Anweisung

**.TRAN <Tstop> [modifiers]**

Im Handbuch und der Online-Hilfe ist dieses Kommando, insbesondere die Modifiers sehr ausführlich beschrieben, so dass hier nicht näher darauf eingegangen werden muss.



## 5.4 .STEP - Kommando

Mit dem Step-Kommando wird eine gewünschte Analyse (DC, AC oder Transient) für verschiedene Parameterwerte wiederholt. Man erhält dann im Waveform-Viewer mehrere Simulationsergebnisse in einem Bild.

Dieses Kommando wird nicht – wie bei den Analysearten – über eine Menüsteuerung (wie **edit Simulation cmd**) unterstützt. Es muss daher direkt als SPICE-Directive (Shortcut: Buchstabe 'S') eingegeben werden. Die Syntax dieses Kommandos lautet:

**.STEP <keyword> <Source> <Startwert> <Stopwert> <Increment>**

und ist somit von der Eingabesyntax identisch mit dem .DC Kommando. Die Bedeutung der einzelnen Parameter ist in Kapitel 5.2 ausführlich erläutert.

Zusätzlich zu den dort aufgeführten Quellenangaben (Spannungsquelle, Stromquelle, Temperatur und globaler Parameter) ist in der Step-Anweisung auch noch die Variation von Modellparametern möglich. Als Quelle muss man dann drei Angaben machen: Modelltyp, Modellname und Modellparameter. Die Syntax sieht dann folgendermassen aus:

**.STEP <keyword> <Modeltyp> <Modelname> <Modelparameter> <Startwert> <Stopwert> <Increment>**

Einige Beispiele:

**.STEP I5 List 5u 40u 100u**

Die Schaltung wird mit  $I_5=5\mu\text{A}$ ,  $40\mu\text{A}$  und  $100\mu\text{A}$  simuliert.

**.STEP TEMP -50 100 50**

Die Schaltung wird bei  $-40^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  und  $100^\circ\text{C}$  simuliert.

**.STEP dec Param RB 10k 1MEG 1**

Die Schaltung wird simuliert, wobei der Parameter RB logarithmisch von  $10\text{k}\Omega$  bis  $1\text{M}\Omega$  bei einem Wert pro Dekade hochgefahren wird, also 10k, 100k, 1Meg. Das hätte man auch mit der List Anweisung machen können: **.STEP Param RB list 10k 100k 1MEG**

**.STEP Param CX 100p 300p 100p**

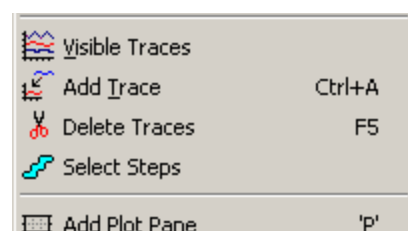
Die Schaltung wird mit den Kapazitätswerten  $CX=100\text{pF}$ ,  $200\text{pF}$  und  $300\text{pF}$  simuliert.

**.STEP npn my\_npn BF list 100 250 350**

Die Schaltung wird simuliert, wobei der Modellparameter BF (Stromverstärkung) des npn-Transistors „my\_npn“ jeweils zu 100, 250 und 350 angenommen wird.

Im Waveform-Viewer kann man unter Plot Settings (oder rechter Mausklick, wenn das Waveform-Display aktiviert wurde) mit **Select Steps** die Simulationen einzeln auswählen, so dass sich auch einzelne Simulationen mit bestimmten STEP-Werten anzeigen lassen.

*Rechtes Bild:* Ausschnitt aus dem Menü **Plot Settings**





## 6 Spannungs- und Stromquellen

In der Schaltbildbibliothek von LTspice finden sich die folgenden unabhängigen Quellen:

**Source-I** (Stromquelle) **Source-V** (Spannungsquelle) und **Source-Vmarker** (DC-Spannungsquelle)

### 6.1 Source-I und Source-V

Mit den beiden Symbolen lassen sich ideale Strom- bzw. Spannungsquellen in die Schaltung einbauen.

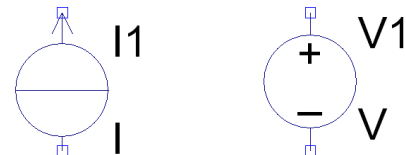


Abbildung 6.1: Symbol Source-i und Source-V

Durch Positionieren des Mauszeigers über das Symbol Source-I bzw. Source-V erhält man durch Anklicken der rechten Maustaste das nebenstehend gezeigte Dialogmenü, das für beide Symbole bis auf die Werteeingaben für Strom bzw. Spannung identisch ist. Es soll daher im Folgenden nur das Spannungsmenü (Source-V) behandelt.

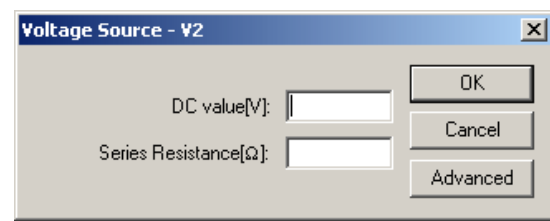
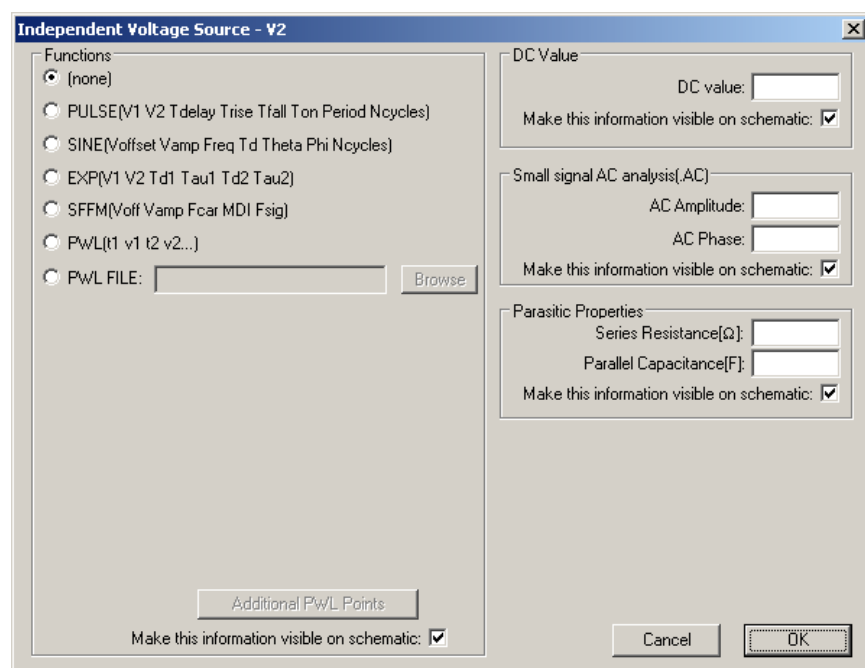


Abbildung 6.2: Menü des Symbols Source-V

Falls die Strom- bzw. Spannungsquelle eine einfache DC-Quelle ist, kann im weissen Feld der entsprechend Strom bzw. Spannungswert eingegeben werden. Die Quelle kann mit einem zusätzlichen Serienwiderstand versehen werden. Anstelle eines separat gezeichneten Widerstandes hat diese Darstellung den Vorteil, dass die Systemmatrix klein gehalten und die Simulationszeit verkürzt wird.

Will man eine Transienten- oder AC-Quelle dimensionieren, so muss man den Button „**Advanced**“ anwählen. Man erhält dann nebenstehendes Menü. Neben einem zusätzlichen Serienwiderstand könnte man noch eine Parallelkapazität angeben, wie im Menüfeld rechts unten zu sehen ist.





### 6.1.1 AC-Quelle

Für eine AC-Analyse muss man die beiden Felder rechts in der Mitte ausfüllen (AC-Amplitude und AC-Phase). Das Feld AC-Phase kann leer bleiben, wenn der Phasenwinkel  $0^\circ$  sein soll. Für die Amplitude sollte man immer den Wert 1 (oder 1V) angeben. Die AC-Analyse ist eine lineare Analyse, bei dem alle Halbleiterbauelemente im Arbeitspunkt linearisiert werden. Der Spannungspegel der Quelle spielt bei einer linearen (bzw. linearisierten) Schaltung keine Rolle. Wenn man dann z.B. die Ausgangsspannung einer Schaltung in der graphischen Ausgabe anschaut, bekommt man direkt die Verstärkung der Schaltung angezeigt.

Verlässt man das Menü, so wird in der Spannungsquelle der Wert mit

**AC 1**

angegeben. Der Eintrag in der SPICE-Netzliste ist dann:

**V<name> <Knoten\_1> <Knoten\_2> AC 1**

Hierbei ist <name> der individuell vergebene Name der Spannungsquelle, <Knoten\_1> der Pluspol des Spannungssymbols, bzw. der untere Anschluss der Stromquelle und <Knoten\_2> der Minuspol des Spannungssymbols, bzw der obere Anschluss der Stromquelle.

### 6.1.2 Transienten-Quelle

Für die Festlegung einer Transientenquelle ist der linke Menüteil zuständig. Insgesamt können sechs verschiedene zeitliche Verläufe festgelegt werden:

**PULSE** pulsförmige Quelle; es können Sprungfunktionen, einzelne Pulse mit beliebiger Anstiegs und Abfallzeit sowie periodische Pulse erzeugt werden.

**SINE** Sinusförmige Quelle, eine abklingende Sinusförmige Schwingung ist ebenfalls möglich

**EXP** Exponentialförmige Quelle; es handelt sich um ein rechteckförmiges Signal, das über eine e-Funktion verschliffen wird, ähnlich der Antwort eines Tiefpasses auf eine rechteckförmige Anregung. Allerdings können Anstiegs und Abfall-Zeitkonstanten unterschiedlich festgelegt werden.

**SFFM** Sinusförmige Quelle, die Frequenzmoduliert ist.

**PWL** Piece-wise-linear Quelle, zu deutsch: stückweise linear; also ein zeitlicher Verlauf, der durch Geradenabschnitte beschrieben ist.

**PWL FILE** wie PWL, die Stützpunkte der Geradenabschnitte werden in einer Datei abgelegt.

Die verschiedenen Verläufe und deren Parameter sind im Handbuch, bzw. im online-Help (Taste F1) ausführlich dokumentiert.

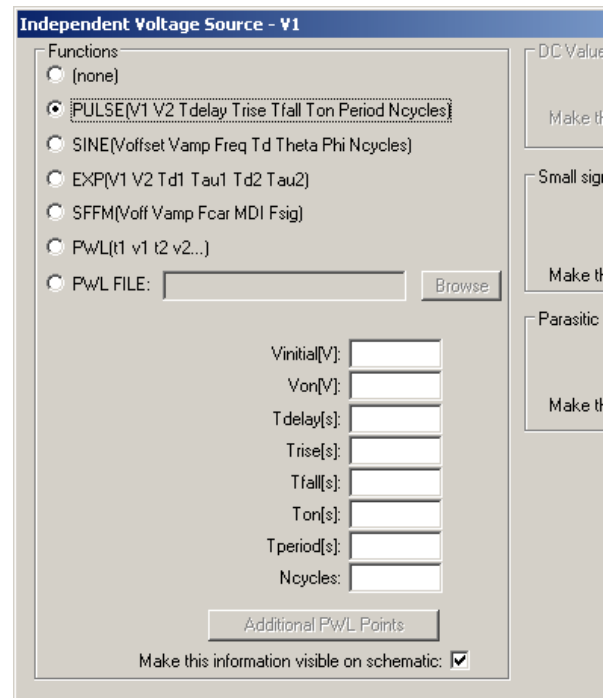
Die beiden wichtigsten zeitlichen Verläufe sind die PULSE-Quelle und die SINUS-Quelle. Auf den folgenden Seiten sind die Kenngrößen dieser beiden Quellen genauer beschrieben.

### 6.1.3 Pulse-Quelle

Wählt man beim linken Menü die Zeile **PULSE** aus, so erhält man auf der linken Seite des „Advanced Menus“ einige Eingabefelder, die nun ausgefüllt werden müssen.

Die ersten beiden Einträge lauten **Vinitial** und **Von** bei einer Spannungsquelle und **I1** und **I2** bei einer Stromquelle. Diese beiden Einträge müssen unbedingt angegeben werden, alle anderen Angaben sind optional.

Die folgende Tabelle zeigt die verschiedenen Varianten



ausgefüllte Felder	Funktion	zeitlicher Verlauf
Vinitial Von	Spannungssprung zum Zeitpunkt $t=0$	
Vinitial, Von Tdelay	Spannungssprung zum Zeitpunkt $t=Tdelay$	
Vinitial, Von Tdelay Trise	Spannungssprung zum Zeitpunkt $t=Tdelay$ mit Anstiegszeit	
Vinitial, Von Tdelay Trise, Tfall Ton	Einzelimpuls zum Zeitpunkt $t=Tdelay$	
Vinitial, Von Tdelay Trise, Tfall Ton, Tperiod	periodisch wiederkehrender Pulse	

Mit **Ncycles** kann die Anzahl der Perioden festgelegt werden.



Wenn man das Menü mit OK verlässt, wird an die Spannungsquelle der Wert

**PULSE(Vinitial Von Tdelay Trise Tfall Ton TPeriod Ncycles)**

sichtbar. Je nach gewählter Kurvenform können in der runden Klammer auch nur die ersten Werte der Kenngrößen aufgelistet sein. Der Eintrag in der Spice-Netzliste hat dann die Form:

**V<name> <Knoten\_1> <Knoten\_2> PULSE(Vinitial Von Tdelay Trise Tfall Ton TPeriod Ncycles)**

Hierbei ist <name> der individuell vergebene Name der Spannungsquelle, <Knoten\_1> der Pluspol des Spannungssymbols, bzw. der untere Anschluss der Stromquelle und <Knoten\_2> der Minuspol des Spannungssymbols, bzw. der obere Anschluss der Stromquelle.

#### 6.1.4 Sinus-Quelle

Wählt man beim linken Menü die Zeile **SINE** aus, so erhält man auf der linken Seite des „Advanced Menus“ einige Eingabefelder. Sie haben folgende Bedeutung:

**DC Offset** Zusätzliche Gleichspannungskomponente. Bei einer Quelle mit reinem Wechselstromanteil wird dieser Eintrag freigelassen oder mit 0 besetzt

**Amplitude** Dieser Wert gibt den Amplitudenwert in Volt (Spannungsquelle) bzw. in Ampere (Stromquelle an; dieser Wert muss angegeben werden.

**Freq** Frequenz in Hertz; dieser Wert muss angegeben werden.

**Tdelay** Verzögerungszeit; erst nach dieser Zeit beginnt der sinusförmige Verlauf. Bis zu diesem Zeitpunkt hat die Spannungsquelle den Wert zum Zeitpunkt  $t=0$

**Theta** der reziproke Wert der Zeitkonstante bei einer e-förmig abklingenden Schwingung. Theta=0 oder Wert nicht besetzt bedeutet (Zeitkonstante  $\infty$ ): keine Dämpfung

**Phi** Nullphasenwinkel in Grad. Beispiel: Phi=90 liefert einen Cosinus.

Der zeitliche Verlauf der Spannung wird nach folgender Formel berechnet:

$$v(t) = V_{DCOffset} + V_{Amplitude} \cdot e^{-(t-Tdelay)*Theta} \cdot \sin\left(2\pi \cdot f + Phi \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right) \quad (6.1)$$

**Beispiel 1:** einen ungedämpften Cosinus ohne DC-Anteil erhält man mit den Werten:

**DC Offset** = 0 (oder freilassen)

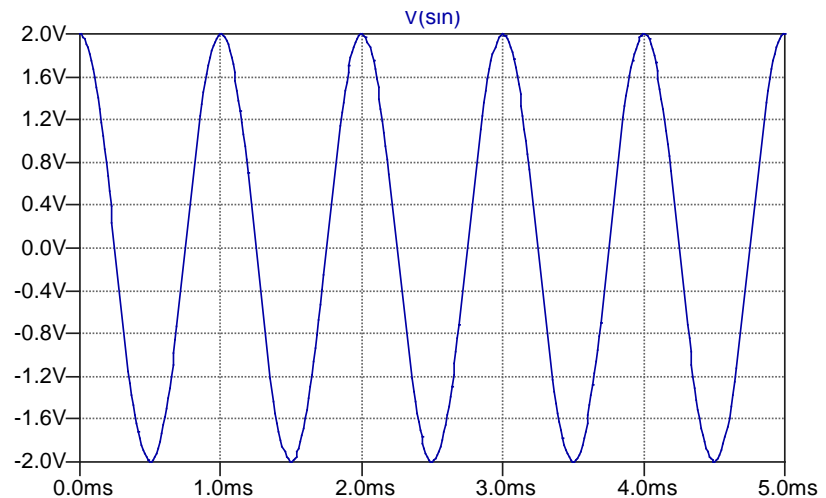
**Amplitude** = 2V (bzw. gewünschte Amplitude)

**Freq** = 1kHz (bzw. gewünschter Wert)

**Tdelay** = 0

**Theta** = 0

**Phi** = 90



**Beispiel 2:** einen gedämpften phasenverschobenen Sinus mit DC-Anteil, wie im rechten Bild gezeigt, erhält man mit den Werten:

**DC Offset** = 1

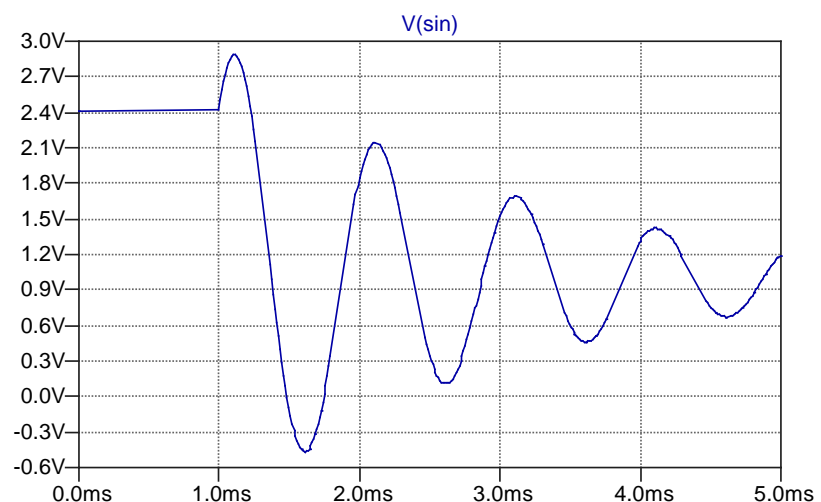
**Amplitude** = 2V

**Freq** = 1kHz

**Tdelay** = 1ms

**Theta** = 500

**Phi** = 45



Auch bei der Sinus-Quelle kann man mit **Ncycles** die Anzahl der Perioden festlegen.

Wenn man das Menü mit OK verlässt, wird an die Spannungsquelle der Wert

**SINE(DCoffset Amplitude Freq Tdelay Theta Phase Ncycles)**

sichtbar. Je nach gewählter Kurvenform können in der runden Klammer auch nur die ersten Werte der Kenngrößen aufgelistet sein. Der Eintrag in der Spice-Netzliste hat dann die Form:

**V<name> <Knoten.1> <Knoten.2> SINE(DCoffset Amplitude Freq Tdelay Theta Phase Ncycles)**

Hierbei ist **<name>** der individuell vergebene Name der Spannungsquelle, **<Knoten.1>** der Pluspol des Spannungssymbols, bzw. der untere Anschluss der Stromquelle und **<Knoten.2>** der Minuspol des Spannungssymbols, bzw. der obere Anschluss der Stromquelle.





## 6.2 Source-Vmarker

Hinter diesem Symbol verbirgt sich eine ideale DC-Spannungsquelle, die einseitig an Masse liegt. Der Spannungswert kann geändert werden. Transient-Anregung und AC-Anregung kann nicht eingestellt werden. Gegenüber dem Symbol **Source-V** spart man sich den Anschluss der Quelle nach Masse.

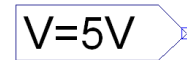


Abbildung 6.3: Symbol Source-Vmarker

## 7 Digitale Elemente der Bibliothek EIT\_Digital

LTspice ist ein Spice-Derivat, das zur Analyse von Halbleiterschaltungen eingesetzt werden kann. Die Variablen sind Spannungen und Ströme. Es wird die erweiterte Knotenadmittanzmatrix aufgestellt und das Gleichungssystem iterativ und Zeitschritt für Zeitschritt simuliert.

Eine Reihe von Schaltungssimulatoren hat neben den Berechnungsalgorithmen für die Spannungen und Ströme auch noch einen Simulationskern für digitale Schaltungen, der event-getrieben ist, also von log. Zustand zu log.Zustand springt. Hierbei sind neben den Zuständen log 0 und log 1 noch diverse andere Zustände definiert (Rising, falling, tri-state, undefined...). Damit kann man unter anderem auch Setup- und Hold-time Verletzungen erkennen. Hochkomplexe digitale Schaltungen (Mikrokontroller, CPU's, FPGA's) lassen sich mit diesen Tools wirkungsvoll simulieren. Der bekannteste Vertreter solcher eventgetriebenen Digitalsimulatoren ist das Programm **Modelsim** der Fa. Mentor-Graphics. Sozusagen das Flaggschiff der Digitalsimulation.

Viele Analogsimulatoren haben auch abgespeckte Versionen eines eventgetriebenen Simulators implementiert. In diesem Zusammenhang sei auf das Programm PSPICE der Fa. Cadence (ehemals Microsim) verwiesen.

LTspice, entwickelt von der Firma Linear Technologies auf der Basis des Standard SPICE - Programms, hat keinen eventgetriebenen Simulator implementiert. Es ist jedoch möglich, einfachere digitale Schaltungen mit den Elementen der Klasse der „Special Functions“ zu implementieren. Diese Elemente beginnen mit dem Buchstaben **A**. Im Handbuch und der online-Hilfe sind diese Komponenten erklärt, zugegebenermaßen etwas sehr dürftig.

Mit Hilfe dieser A-Elemente wurden einige wichtige digitale Funktionsblöcke erstellt, die in der Bibliothek EIT\_Digital enthalten sind. Diese Elemente sind auf der nächsten Seite tabellarisch aufgelistet.

Diese Elemente beziehen sich nicht auf eine bestimmte Logik-Familie. Sie sind eher als Funktionsblöcke zu verstehen, mit denen digitale Schaltungen von ihrem prinzipiellen Aufbau her simuliert verstanden werden können. Da es sich nicht um einen eventgetriebenen Simulator handelt, sind die digitalen Signale nach wie vor Spannungen.





Digitale Elemente der Bibliothek EIT_Digital		
Element	Funktionsklasse	Funktion
AND_2	Gatter	Gatter mit invertierendem und nichtinvertierendem Ausgang; je nach gewähltem Ausgang AND oder NAND mit zwei Eingängen
AND_3	Gatter	Gatter mit invertierendem und nichtinvertierendem Ausgang; AND oder NAND mit drei Eingängen
AND_4	Gatter	Gatter mit invertierendem und nichtinvertierendem Ausgang ; AND oder NAND mit vier Eingängen
AND_5	Gatter	Gatter mit invertierendem und nichtinvertierendem Ausgang ; AND oder NAND mit fünf Eingängen
OR_2	Gatter	Gatter mit invertierendem und nichtinvertierendem Ausgang; OR oder NOR mit zwei Eingängen
OR_3	Gatter	Gatter mit invertierendem und nichtinvertierendem Ausgang; OR oder NOR mit drei Eingängen
OR_4	Gatter	Gatter mit invertierendem und nichtinvertierendem Ausgang ; OR oder NOR mit vier Eingängen
OR_5	Gatter	Gatter mit invertierendem und nichtinvertierendem Ausgang ; OR oder NOR mit fünf Eingängen
EXOR_2	Gatter	Gatter mit invertierendem und nichtinvertierendem Ausgang ; EX-OR (Exclusive-OR) mit zwei Eingängen
INVERTER	Gatter	Inverter
BUFFER	Gatter	Buffer
DFF	Flip-Flop	flankengetriggertes D-Flipflop
DFF_R	Flip-Flop	flankengetriggertes D-Flipflop mit zusätzlichem Reset-Eingang
DFF_S	Flip-Flop	flankengetriggertes D-Flipflop mit zusätzlichem Set-Eingang
DFF_RS	Flip-Flop	flankengetriggertes D-Flipflop mit zusätzlichem Set- und Reset-Eingang
DFF4_RS	Flip-Flop	vier flankengetriggerte D-Flipflops mit je 4 D-Eingängen und 4 Q-Ausgängen mit zusätzlichem gemeinsamem Set- und Reset-Eingang
JKFF	Flip-Flop	flankengetriggertes JK-Flipflop
JKFF_R	Flip-Flop	flankengetriggertes JK-Flipflop mit zusätzlichem Reset-Eingang
JKFF_S	Flip-Flop	flankengetriggertes JK-Flipflop mit zusätzlichem Set-Eingang
JKFF_RS	Flip-Flop	flankengetriggertes JK-Flipflop mit zusätzlichem Set- und Reset-Eingang
TFF	Latch	Transparent Latch
TFF_R	Latch	Transparent Latch mit zusätzlichem Reset-Eingang
TFF_S	Latch	Transparent Latch mit zusätzlichem Set-Eingang
TFF_RS	Latch	Transparent Latch mit zusätzlichem Set- und Reset-Eingang



Digitale Makro-Elemente der Bibliothek EIT_Digital		
Element	Funktionsklasse	Funktion
schmitt-trigger-diff	Schmitt-Trigger	Schmitt-Trigger mit Differenz-Eingang
schmitt-trigger-single	Schmitt-Trigger	Schmitt-Trigger mit Einzel-Eingang
Bin_Up_Counter	Zähler	4-bit Binärzähler, kaskadierbar
Bin_Up_Down_Counter	Zähler	4-bit Up-Down-Binärzähler, kaskadierbar
converter_DAC_8bit	DAC	Digital-Analog-Wandler, 8bit
converter_ADC_8bit	ADC	Analog-Digital-Wandler, 8bit

Digitale Sonder-Elemente der Bibliothek EIT_Digital		
Element	Funktionsklasse	Funktion
level-high	logische Konstante	logisch high (Vpwr\$_digital\$)
level-low	logische Konstante	logisch low (0Volt)
probe_dig	Spannungskonverter	transformiert digitales Signal zu einem definierten Spannungspegel

## 7.1 Wahl der Verzögerungszeit TD

Standardmäßig sind alle digitalen Elemente mit einer Verzögerung (Gatterlaufzeit) von **TD=10ns** versehen. Diese Zeit kann geändert werden. Bei kombinatorischer Logik kann diese Zeit auf null gesetzt werden (ideal schnelle Gatter). Vorsicht ist jedoch bei den Registerelementen angebracht (Flipflops). Prinzipiell könnte man auch bei diesen Elementen die Zeit **TD** auf null setzen, bei Rückkopplungen bekommt der Simulator aber Probleme und bleibt „hängen“: wenn man beispielsweise bei einem Binärteiler, bei dem der Ausgang  $Q_{quer}$  mit dem Eingang D verbunden ist, eine positive Taktflanke am Eingang CLK anlegt, weiss der Simulator nicht, was er machen soll, verkleinert die Rechenschrittweite immer mehr, bis er schließlich mit einer Fehlermeldung aufgibt. Also Regel: Bei Flipflops TD nie zu null setzen!

## 7.2 Versorgungsspannung der digitalen Elemente

Wenn eines der in den Tabellen angegebenen Digitalelemente verwendet wird, muss die Versorgungsspannung (und damit auch der High-Pegel der Digitalbausteine) über folgendes Parameter-Kommando definiert werden:

**.param Vpwr\$\_digital\$=5V**

Die angegebene Spannung (hier 5V) kann je nach Wunsch geändert werden. Der Eingang aller Logikbausteine liegt auf der halben Versorgungsspannung. D.h.

Eingangsspannungen  $> \frac{1}{2} V_{pwr\_digital}$  werden als logisch 1,

Eingangsspannungen  $< \frac{1}{2} V_{pwr\_digital}$  werden als logisch 0



interpretiert.

Der Bezugsknoten aller in der Bibliothek **EIT\_digital** enthaltenen digitalen Bausteine ist grundsätzlich Masse.

Bei den beiden Schmitt-Trigger-Elementen kann noch die Hysterese (VTH) in Volt angegeben werden.

### 7.3 Verwendung des Blockes probe\_dig

Baut man eine komplexere digitale Schaltung auf, so hat man eine Menge logischer Signale, die man sich im **Waveform-Viewer** anschauen möchte. Da LTspice alle digitalen Signale als Spannungen darstellt, werden so alle logischen Signale übereinandergeschrieben. Man kann dann praktisch nichts mehr erkennen. Um diesem Umstand abzuweichen, wurde der Block **probe\_dig** zur Verfügung gestellt. Er hat einen Eingang und einen Ausgang. Der Eingang wird mit dem zu beobachtenden digitalen Signal verbunden, am Ausgang kommt ein kleines Stück Verbindungsdraht (Wire) der mit einem Netzwerknamen versehen wird. Der Parameter T des Elements wird auf einen gewünschten Integer-Wert gesetzt, und entspricht der Nummer der Kurve. Die Ausgangsspannung dieses Blockes errechnet sich nach der Formel:

$$V_{out} = T + 0,05 + \frac{0,67 \cdot V_{IN}}{V_{pwr\$digital}} \quad (7.1)$$

Damit ist

$$V_{out} = (T + 0,05)\text{Volt} \quad \text{für } V_{in} \text{ auf logisch 0} \quad (7.2)$$

$$V_{out} = (T + 0,72)\text{Volt} \quad \text{für } V_{in} \text{ auf logisch 1} \quad (7.3)$$

Am besten ist es, man fasst im **Waveform-Viewer** alle digitalen Signale als Ausgangssignale der **probe\_dig** Bausteine in einem PANE zusammen. Wenn man die T-Attribute in jedem der **probe\_dig** - Blöcke verschieden wählt, liegen die digitalen Signale schön übereinander, wie man das auch von den bekannten „echten“ Digital-Simulatoren kennt.

Es sei in diesem Zusammenhang auf die Beispielschaltungen im Ordner **EIT.examples** verwiesen. Dort sind unter anderem auch einige digitale Beispielschaltungen angegeben.

### 7.4 Verwendung der Bibliothek LT\_original\_libs/Digital

In der Original Digital-Bibliothek von LT sind alle digitalen Elemente als A-Elemente verfügbar. Der Einsatz dieser Elemente verlangt eine etwas genauere Kenntnis der Syntax der A-Elemente. Dies haben nämlich grundsätzlich 5 Eingänge, 2 Ausgänge und einen Referenzknoten. Je nach Beschaltung der Eingänge werden dann bei der Übersetzung der Netzliste bestimmte Eingänge unterdrückt und der Simulation nicht zugänglich gemacht.

Im Handbuch und der online-Hilfe ist diese Vorgehensweise genauer beschrieben.