

LTspice – ein Simulationswerkzeug für elektronische Schaltungen

Andreas Czechanowski, DL4SDC

OV P26, 2. November 2017

Was ist SPICE?

... und wofür wurde es entwickelt?

- SPICE steht für Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
- entwickelt an der University of California, Berkeley
- zur Simulation von Halbleiterschaltungen (ICs)
- ursprünglich Kommandozeilen-orientiert:
Eingabedatei → Simulationslauf → Ausgabedatei
- erfordert textuelle Beschreibung der Schaltung und meist eine graphische Visualisierung der Ergebnisse

Was macht SPICE?

... und wie sieht es eine Schaltung?

- Schaltung besteht aus Knotenpunkten (Node, Net), zwischen denen die Bauteile angeschlossen sind
- Jeder Knoten ist durch sein Potential gegenüber einem Referenz-Knoten (GND, 0) definiert: Spannung = Potentialdifferenz
- Durch die Bauteile fließen Ströme zwischen den Knoten
- Von jedem Knoten aus muss es einen Weg zu GND geben
- Unabhängige Strom- oder Spannungs-Quellen versorgen die Schaltung und speisen Signale ein
- SPICE löst ein Gleichungssystem, um die Knotenpotentiale und Ströme zu einem Zeitpunkt oder bei einer Frequenz zu bestimmen

Was genau ist LTspice?

... und warum sollte man sich damit befassen?

- LTspice ist die SPICE-Variante des IC-Herstellers Linear Technology Corporation (LTC), der inzwischen zu Analog Devices (ADI) gehört.
- Das Programm bietet um den Simulator-Kern herum eine graphische Benutzeroberfläche zur einfacheren Bedienbarkeit
- LTspice wurde bei LTC zuerst intern eingesetzt: zur Simulation in der Entwicklung eigener ICs
- Es wird kostenfrei für jedermann zum Download angeboten
- Hauptmotivation: Erleichterung von Designs mit ICs von LTC
- Daher kommt das Programm vor allem mit Modellen der eigenen ICs:
 - Schaltregler (LTspice hieß zuvor SwitcherCAD)
 - Operationsverstärker
 - Power-MOSFETs (für Schaltregler-Controller)

Woher bekommt man LTspice?

... und wird es auf meinem Rechner laufen?

- Download: <http://www.linear.com/designtools/software/>
- Derzeit angeboten werden:
 - für Windows (32 Bit): LTspiceIV, LTspiceXVII
 - für Windows (64 Bit): LTspiceXVII
 - für MacOSX ab V10.7: LTspiceIV
- LTspiceIV wird nicht mehr weiterentwickelt (letzte Version: 4.23l vom 22. Juli 2016)
- Die Windows-Versionen sind unter Linux mit Wine nutzbar
- Neue Features in LTspiceXVII:
 - Modelle für IGBTs, Soft-Recovery-Dioden
 - Arbitrary State-Machine (Ablaufsteuerung)
 - Unicode (Internationale Zeichensätze)
 - Für ICs von ADI werden Modelle sukzessive integriert
- Wird das nicht gebraucht, reicht LTspiceIV völlig aus.

Schaltungssimulation: Ja! – aber was?

authentische Beispiele für Anwendungen

„If you've got a hammer, the world is full of nails.“

- passive (R)LC-Filterschaltungen (Anpassung, Vorselektion, Tiefpass)
- aktive Filterschaltungen mit Operationsverstärkern (OPamps)
- lineare Verstärkerschaltungen mit Transistoren und FETs (HF-, ZF-Stufen)
- nichtlineare Verstärkerschaltungen (HF-Endstufen, Demodulatoren)
- Oszillatoren (LC und RC, Kippschaltungen)
- Dioden-Ringmischer (mit Übertragern)

Siehe LTspice Getting Started Guide: <http://www.linear.com/docs/39806>

Schaltungen zeichnen mit LTspice

mit Maus und Tastatur

- Mit Maus+Tastatur sind Schaltungen schnell zu zeichnen:
Siehe Referenzblatt: <http://www.linear.com/docs/42781>
- Editor erlaubt (fast) unbegrenzte Anzahl „Undo“-Aktionen
- Öfter mal „Save“ oder „Save As...“ verwenden:
Schaltungs-Dateien (*.asc) brauchen nur wenig Platz
- Auch zum reinen Zeichnen von Schaltungen nützlich
(ohne Simulation)

→ Übungen am echten Programm

Mitgelieferte Bauteilbibliotheken

für die Grundversorgung

Verzeichnis `~LTspiceIV/lib/cmp` enthält Modelldateien:

- `standard.dio`: Si(121)-, Schottky(258)-, Zener(144)-Dioden, LEDs(11)
- `standard.bjt`: NPN(51)- und PNP(38)-Transistoren
- `standard.jft`: N-Kanal(16) und P-Kanal(7)-JFETs
- `standard.mos`: N-Kanal(850) und P-Kanal(108)-MOSFETs
- `standard.ind`: Induktivitäten (7526) mit parasitären Elementen
- `standard.cap`: Kondensatoren (4262) mit parasitären Elementen (ESR)
- `standard.bead`: Entstör-Ferrite (227)
- `standard.res`: Widerstände: E96-Reihe 1Ω bis $1M\Omega$

→ Aufteilung weist auf Hauptanwendung Schaltnetzteile hin

Zeichnen der Schaltung

Grundlegendes

- jedes Bauteil braucht einen eindeutigen Referenz-Bezeichner, Anfangsbuchstabe bestimmt Art des Bauteils:
 - R → Widerstand
 - L → Spule, Übertrager-Wicklung
 - C → Kondensator
 - D → Diode
 - Q → Bipolar-Transistor (NPN, PNP)
 - J → JFET (NJF, PJF)
 - M → MOSFET (NMOS, PMOS)
 - V → Spannungsquelle (voltage)
 - I → Stromquelle (current)
 - ...
- restlicher Bezeichner kann aus Zahlen und Buchstaben bestehen, z.B. „D5“, „Q12“, „Vin3“, „Rload“, „Lseries“, ...
- Referenz kann durch rechts-Klick auf Text geändert werden

Zeichnen der Schaltung

Grundlegendes

- jedes Bauteil braucht auch einen Wert, das ist
 - ein Zahlenwert für R, L, C
 - ein Modellname (= Typ) bei aktiven Bauteilen, z.B. 1N4148, BC548, 2N4416, LT1677
 - Angaben zu I (Stromquellen), V (Spannungsquellen) (genauerer hierzu später)
- Wert wird ebenfalls durch rechts-Klick auf Text geändert

Zeichnen der Schaltung

Angabe von Zahlenwerten

- Dezimalstellen mit Punkt trennen, kein Komma: 15.625
- Einheiten sind automatisch gegeben:
Frequenz: Hz ; Zeit: s ; Strom: A ; Spannung: V
Widerstand: Ω ; Kapazität: F ; Induktivität: H
- Präfixe ohne Abstand hinter den Zahlenwert setzen:

f	Femto	10^{-15}	k	Kilo	10^3
p	Piko	10^{-12}	Meg	Mega	10^6
n	Nano	10^{-9}	G	Giga	10^9
u	Mikro	10^{-6}	T	Tera	10^{12}
m	Milli	10^{-3}	(andere: ignoriert)		
- SPICE unterscheidet keine Groß-/Kleinschreibung:
meg oder MEG zur Unterscheidung von Milli zwingend notwendig
- Einheiten dürfen zur Verdeutlichung angehängt werden:
„2.66ns“, „35uA“, „3.58MegHz“, „4.7mH“, „22kOhm“

Simulationsarten: .op, .ac, .tran, ...

welche wofür – und warum?

Simulation auf das Wesentliche beschränken bzw. aufteilen:

- Simulation eines kompletten Transceivers würde unnötig lange dauern
- Aufteilung in überschaubare Stufen und Module
- Je nach Schaltungsart Simulationsart(en) wählen

Überlegen, welche Aussage die Simulation liefern soll:

- Verstärkung, Bandbreite, Frequenzgang, Ein-/Ausgangsimpedanz
→ .ac (Kleinsignal-Wechselspannungsanalyse)
- Arbeitspunkt einer aktiven Schaltung (über VCC und Temperatur)
→ .op (Arbeitspunkt-Analyse)
- Zeitverlauf, Verzerrungen, Mischprodukte, Einschwingverhalten
→ .tran (Transienten-Analyse)
- andere Simulationsarten (.noise, .dc, .tf) hier nicht behandelt

Statische Schaltungs-Analyse

- Voraussetzung: Min. eine Gleichspannungsquelle in der Schaltung
- Prinzip: Ersetzt Spulen durch Kurzschluss, Kondensatoren durch Leerlauf (Unterbrechung), sucht nach Gleichgewichtspunkt
- Grundsätzlich sinnvoll bei aktiven Schaltungen
- Hilft bei Wahl der Dimensionierung
- Zeigt Einfluss der Betriebsspannung
- Zeigt Abhängigkeit von der Temperatur
- Vorsicht bei bistabilen Schaltungen, z.B. astabiler Multivibrator

Simulationsarten: .ac

Kleinsignal-Wechselspannungsanalyse

Analyse im Frequenzbereich

- Voraussetzung: Mindestens eine (Strom-/Spannungs-)Quelle mit AC: Betrachtung sinusförmiger Signale, Frequenz als Parameter
- Führt zuerst eine .op durch: Arbeitspunkt-Bestimmung
- Berücksichtigt frequenzbestimmende Bauteile (L und C), auch Kapazitäten in Transistoren, Dioden, ...
- Simulation im Frequenzbereich, an n Frequenzpunkten („Sweep“)
- Linearisiert Schaltung um den Arbeitspunkt – gültig daher vor allem für kleine Aussteuerungen
- zur Bestimmung der Amplituden- und Phasenbeziehungen
- zur Bestimmung von Eingangs- und Ausgangsimpedanz

Simulationsarten: .tran

Transientenanalyse

Analyse im Zeitbereich

- Authentischste, komplexeste und zeitaufwändigste Simulationsart
- Simulation im Zeitbereich, über vorgegebene Zeitspanne
- Berechnen aller Ströme und Spannungen zur Zeit t_2 aus den Zustandsgrößen der vorherigen Zeit t_1
- Zeitschritte werden ständig der Situation angepasst
- Nichtlineare Effekte und Startverhalten simulierbar
- Kann sehr große Datenfiles erzeugen
- zur Beschleunigung der Simulation: Verhältnis höchste zu niedrigste Frequenz bzw. Zeitkonstante begrenzen

Simulationsarten: .op, .ac, .tran, ...

Simulationsart wählen und starten

Simulationskommando mit Parametern in den Schaltplan setzen:

- Menü: Simulate → Edit Simulation Cmd
- Simulationsart mit Registerkarte wählen,
- Parameter (Zeiten, Frequenzen, Optionen) eingeben, OK
- Simulations-Kommandozeile im Schaltplan platzieren

Simulation starten:

- Menü: Simulate → Run oder Symbol  anklicken

Simulationsarten: .op, .ac, .tran, ...

Simulationsart ändern

Umschalten auf andere Simulationsart (LTspiceIV):

- Vorgehen wie zuvor, neue Simulationsart mit Registerkarte wählen
- Vorherige Simulationsart wird automatisch inaktiv geschaltet (vorangestelltes Semikolon)
- Bei Wieder-Umschalten auf andere Simulationsart werden deren Parameter wieder verwendet

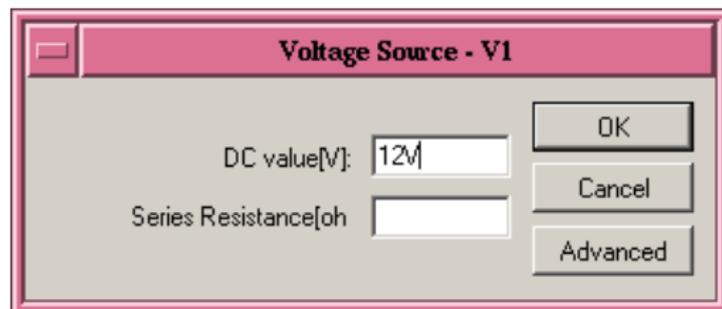
Umschalten auf andere Simulationsart (LTspiceXVII - Stand Mai 2017):

- Ctrl + Klick mit rechter Maustaste auf Simulations-Kommandozeile
- Umschalten von „SPICE directive“ auf „Comment“, OK
- Vorgehen wie zuvor, neue Simulationsart mit Registerkarte wählen, Simulations-Kommandozeile im Schaltplan platzieren

Spannungsquellen und Stromquellen einstellen

Für jede Simulationsart die richtige Wahl

- Rechts-Klick auf eine Spannungsquelle öffnet den einfachen Editor für DC-Wert und Innenwiderstand Rser:



- Spannungsversorgung für die Schaltung, in allen Simulationsarten
- Beliebig viele Quellen möglich, alle gleichzeitig aktiv
- Wird „Series Resistance [ohm]“ leer gelassen, ist $R_{ser}=0$: ideale Spannungsquelle → kein Abblock-C erforderlich
- Klick auf „Advanced“ erlaubt weitergehende Einstellungen

Spannungsquellen und Stromquellen einstellen

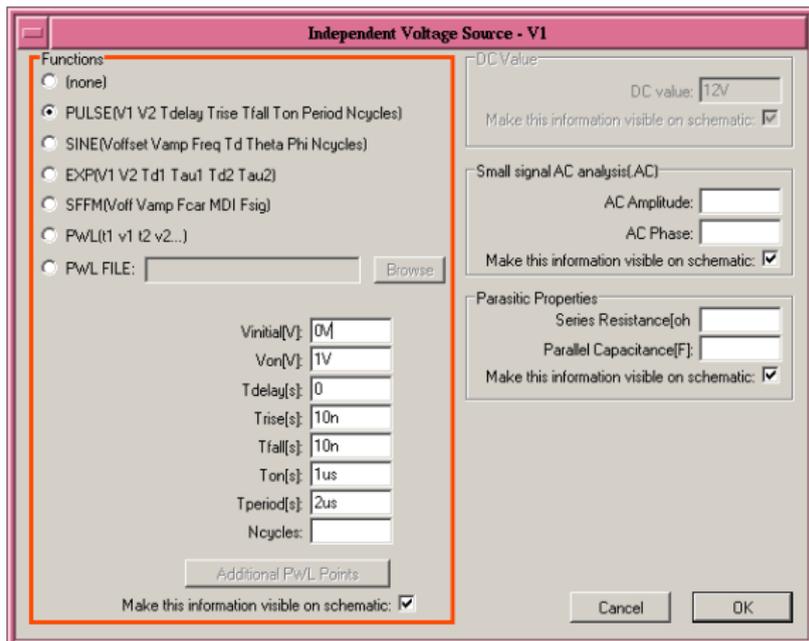
Für jede Simulationsart die richtige Wahl

Advanced Editor Fenster: Functions

Funktionsgenerator, gilt in .tran- Simulationen

Achtung:

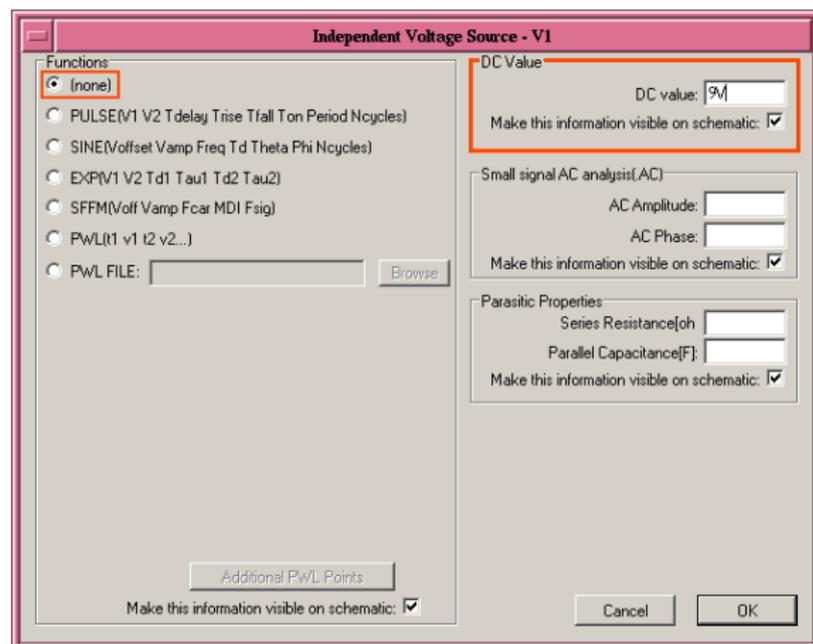
Einstellung definiert DC-Wert in .op- und .ac-Simulationen



Spannungsquellen und Stromquellen einstellen

Für jede Simulationsart die richtige Wahl

Advanced Editor Fenster: DC Value



mit Functions = (none)
gilt der DC value:
Gleichspannungsquelle
für alle Simulationsarten,
entspricht Einstellung im
einfachen Editor

Spannungsquellen und Stromquellen einstellen

Für jede Simulationsart die richtige Wahl

Advanced Editor Fenster: Small signal AC analysis (.AC)

Independent Voltage Source - V1

Functions

- (none)
- PULSE(V1 V2 Tdelay Trise Tfall Ton Period Ncycles)
- SINE(Voffset Vamp Freq Td Theta Phi Ncycles)
- EXP(V1 V2 Td1 Tau1 Td2 Tau2)
- SFFM(Voff Vamp Fcar MDI Fsig)
- PWL(t1 t2 v2...)
- PWL FILE:

DC offset[V]:

Amplitude[V]:

Freq[Hz]:

Tdelay[s]:

Theta[1/s]:

Phi[deg]:

Ncycles:

Make this information visible on schematic:

DC Value

DC value:

Make this information visible on schematic:

Small signal AC analysis(.AC)

AC Amplitude:

AC Phase:

Make this information visible on schematic:

Parasitic Properties

Series Resistance[oh]:

Parallel Capacitance[F]:

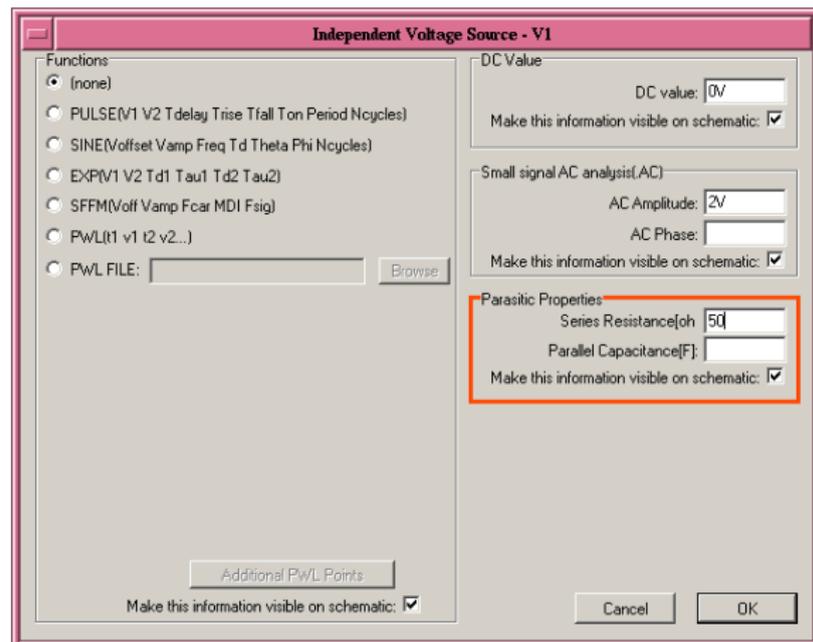
Make this information visible on schematic:

AC Amplitude: gilt nur für .ac (SINE nur für .tran), 1V entspricht 0dB im Plot-Diagramm
Bei HF-Schaltungen mit 50Ω Impedanz: 2V eintragen und Series Resistance auf 50 setzen
AC Phase: z.B. für Quadratsignale mit zwei Quellen

Spannungsquellen und Stromquellen einstellen

Für jede Simulationsart die richtige Wahl

Advanced Editor Fenster: Parasitic Properties



Series Resistance:

Innenwiderstand, gilt für alle Simulationsarten, bei HF-Schaltungen Quellimpedanz für .ac und .tran (z.B. 50 Ω) eintragen

Parallel Capacitance:

Abblock-Kondensator am Ausgang, für Spannungsversorgungen

Spannungsquellen und Stromquellen einstellen

Funktionsgenerator für .tran

Advanced Editor: Functions

- PULSE: Pulsgenerator, Parameter sind [optional]:
 - Ruhewert, Pulswert (Vinitial, Von)
 - Verzögerung bis zum ersten Anstieg (Tdelay)
 - Anstiegs- und Abfallzeit 0%–100% (Trise, Tfall)
 - Zeit auf Pulswert (Ton)
 - Periodenzeit (Tperiod) = 1/Frequenz
 - [Zyklenzahl (Ncycles): einmaliger Burst]
- eignet sich für Rechteck-, Dreieck- und Sägezahn-Signale
- Vinitial gilt als DC-Wert für .op und .ac

Spannungsquellen und Stromquellen einstellen

Funktionsgenerator für .tran

Advanced Editor: Functions

- SINE: Sinusgenerator, Parameter sind [optional]:
 - Mittelwert (DC Offset)
 - Amplitude: Scheitelwert–Mittelwert
 - Frequenz
 - [Verzögerung bis Start der Schwingung (Tdelay)]
 - [Abklingrate (Theta): exponentieller Amplitudenabfall]
 - [Anfangsphase (Phi): +90° ergibt Kosinus]
 - [Zyklenzahl (Ncycles): einmaliger Burst]
- Für .op und .ac gilt als DC-Wert:
 $DC_Offset + Amplitude \cdot \sin(Phi)$

Spannungsquellen und Stromquellen einstellen

Funktionsgenerator für .tran

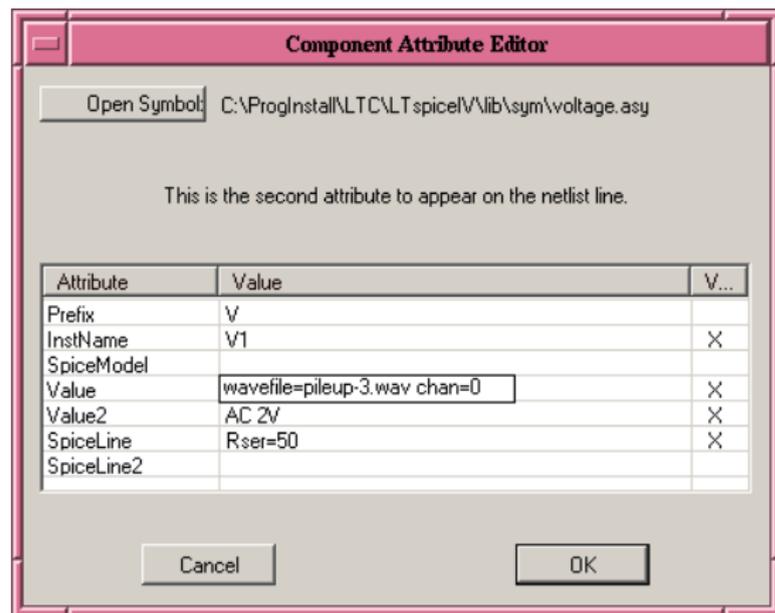
Advanced Editor: Functions

- PWL: Kurvenzug mit linearer Interpolation zwischen Punkten
- Wertepaar (Zeit t_n , Spannung v_n) definiert einen Punkt
- bei wenigen Punkten Direkteingabe im Fenster
- PWL FILE: besser bei vielen Punkten, Daten aus Textdatei:
0.0ms 6.0V
0.5ms 9.0V
3.5ms 9.0V
3.6ms 4.5V
...
- Erster Punkt gilt als DC-Wert für .op und .ac
- Spannung bleibt nach letztem Punkt auf dessen Wert stehen

Spannungsquellen und Stromquellen einstellen

Audio-Signale ein- und ausgeben

Expert Editor: WAV-Datei (Audio) als Signalquelle (nur für .tran)
Ctrl+rechts-Klick auf Spannungsquelle öffnet Editor-Fenster:



In Zeile Value Dateiname und ggf. Kanal angeben:
wavefile=test.wav chan=0
Abspielen in Echtzeit:
1s Audio = 1s in .tran
Spannungsbereich bei Vollaussteuerung: -1V bis +1V

Spannungsquellen und Stromquellen einstellen

Audio-Signale ein- und ausgeben

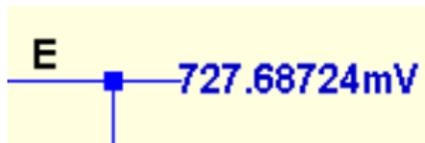
WAV-Datei (Audio) mit Simulationswerten aufnehmen (nur für .tran)

- Editor für Spice-Befehle öffnen: „S“ drücken oder  klicken
- Ausgabebefehl eingeben, Beispiel:
`.wave output.wav 16 48kHz V(out_left) V(out_right)`
erzeugt WAV-Datei mit 16-Bit, 48kHz, 2 Kanälen (stereo)
- Textrahmen in Schaltplan setzen
- Aufnahme in Echtzeit: 1s in .tran = 1s Audio
- Spannungsbereich für Vollaussteuerung: $-1V$ bis $+1V$

Nach Simulationslauf: Anzeigen der Ergebnisse

nach .op Arbeitspunkt-Analyse

- nach .op-Simulation öffnet ein Fenster mit Strömen und Spannungen
- mit Mauszeiger an Knoten, auf Bauteilen und an Ports wird der Arbeitspunkt aus .op oder .ac bzw. der Startwert aus .tran an unterer Fensterkante angezeigt
- Arbeitspunkt-Anzeige im Schaltplan: auf freier Fläche: rechte Maustaste → View → Place .op Data Label, Textrahmen auf Netz setzen



zeigt Arbeitspunkt aus .op oder .ac
bzw. Startwert aus .tran

Spannungen können mit ausgedruckt werden (Menü: File → Print...)

Nach Simulationslauf: Plotten der Ergebnisse

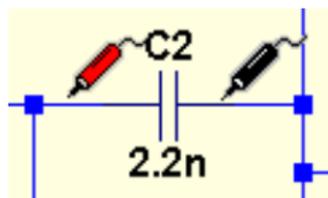
Spannungen anzeigen

- Spannungen an Knoten plotten:



auf Knoten wird der Mauszeiger zum Probe-Symbol, Klicken plottet Spannung im Diagramm

- Spannungen zwischen Knoten plotten:



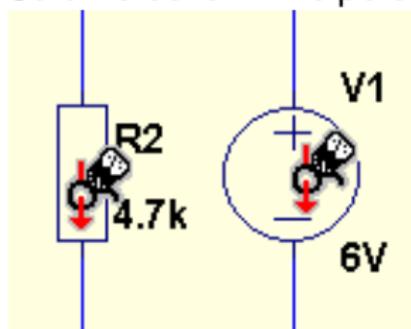
auf erstem Knoten linke Maustaste drücken und festhalten, Maus zum zweiten Knoten ziehen, Maustaste loslassen, plottet Spannungsdifferenz im Diagramm

erster Knoten ist positiver Anschluss der Differenz-Probe

Nach Simulationslauf: Plotten der Ergebnisse

Ströme anzeigen

- Ströme durch Zweipole plotten:



über Bauteil wird der Mauszeiger zum Stromzangen-Symbol, Klicken plottet Strom im Diagramm

- Pfeil zeigt in positive Stromrichtung (+ nach -)
- an Spannungsquellen bedeutet negativer Strom Leistungsabgabe

Nach Simulationslauf: Plotten der Ergebnisse

Ströme anzeigen

- Ströme an Transistoren, MOSFETs, ICs, ... plotten:



am Anschlusspin wird der Mauszeiger zum Stromzangen-Symbol, Klicken plottet Strom im Diagramm

- positiver Strom fließt in Bauteil hinein,
negativer Strom fließt aus Bauteil heraus

Nach Simulationslauf: Plotten der Ergebnisse

Leistungen anzeigen

- Verlustleistung von Bauteilen plotten:



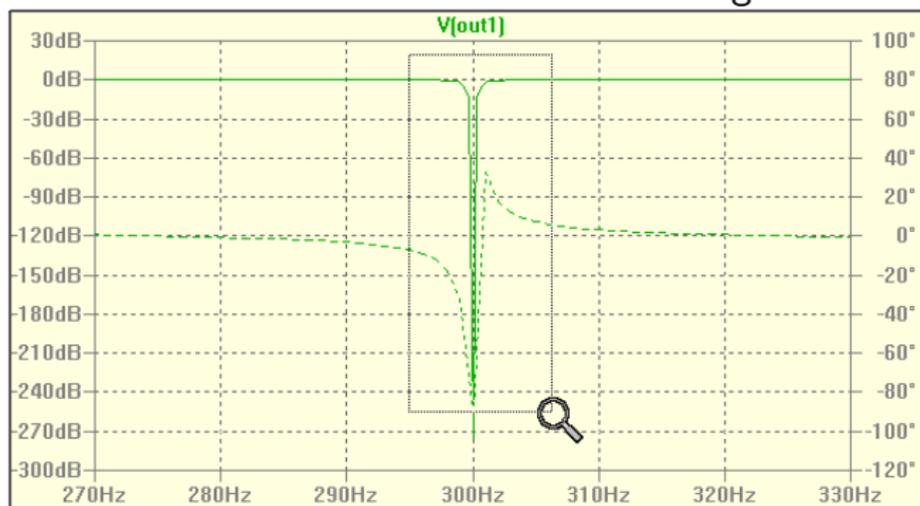
mit gedrückter Alt-Taste wird der Mauszeiger über Bauteilen zum Thermometer, Klicken plottet (Momentan-)Leistung

- Positive Leistung bedeutet Energieaufnahme aus der Schaltung
= Verlustleistung bei aktiven Bauteilen
= Energiespeicherung in L_s und C_s

Darstellung der Ergebnisse

Plot-Fenster

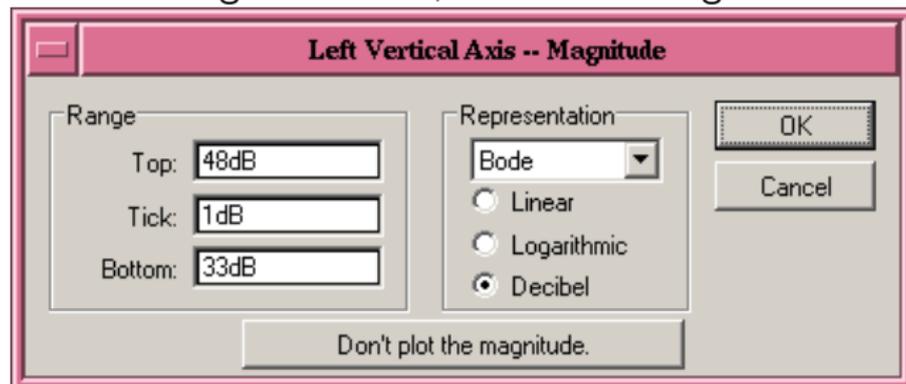
- .tran: Diagramm zeigt Spannungen und Ströme über der Zeit
→ Oszilloskop
- .ac: Diagramm zeigt Spannungen und Ströme über der Frequenz
→ Netzwerk-Analyzer, vektoriell (Betrag und Phase)
- Zoomen durch Ziehen eines Rahmens bei gedrückter linker Maustaste



Darstellung der Ergebnisse

Plot-Fenster

- Klick auf eine der Skalen öffnet Skalierungs-Fenster, erlaubt manuelles Zoomen – Beispiel .ac:
- Bode: Betrag und Phase, lineare oder logarithmische Skala

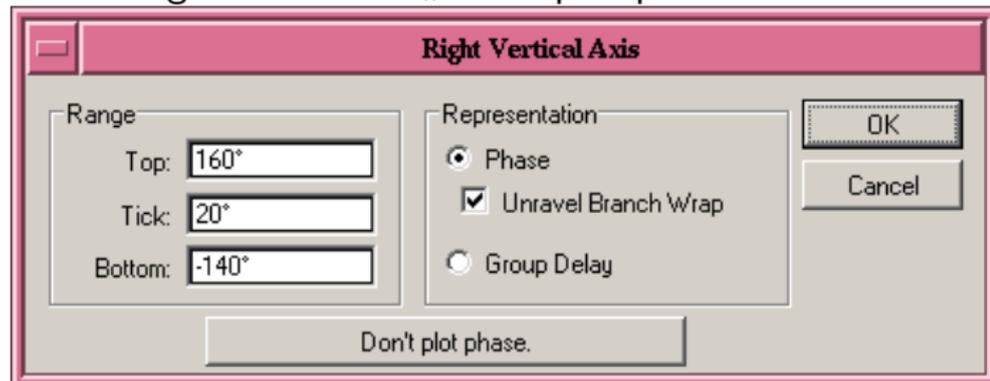


- Cartesian: Real- und Imaginärteil ($\Re\{\}$, $\Im\{\}$), linear
- Nyquist: Ortskurve ($\Re\{\}:\Im\{\}$), Frequenz als Parameter

Darstellung der Ergebnisse

Plot-Fenster

- falls Phasengang im .ac-Diagramm (gestrichelt) stört:
Klick mit Maus auf rechte Skala (Phase in $^{\circ}$), im Skalierungs-Fenster auf „Don't plot phase“ klicken

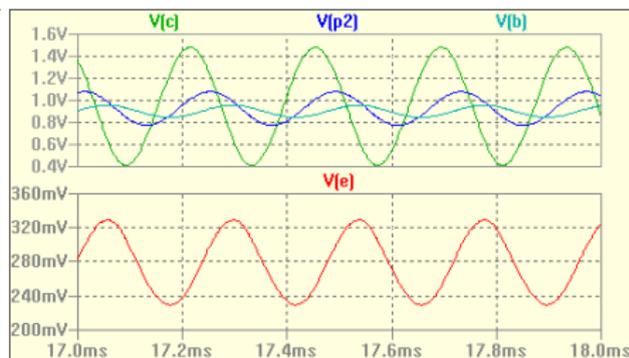
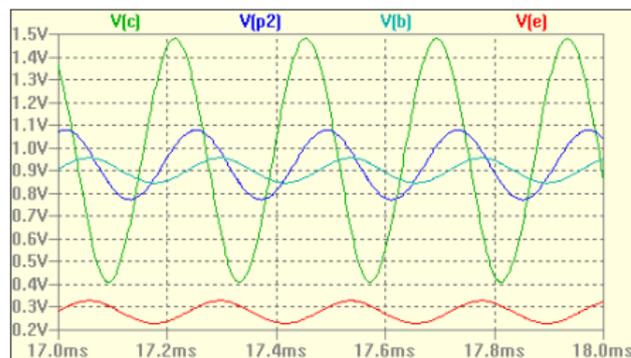


- Klick mit Maus auf die dann leere rechte Skala stellt Plot des Phasengangs wieder her

Darstellung der Ergebnisse

Plot-Fenster

- mehrere Diagramme möglich: im Diagramm rechte Maustaste → Add Plot Pane

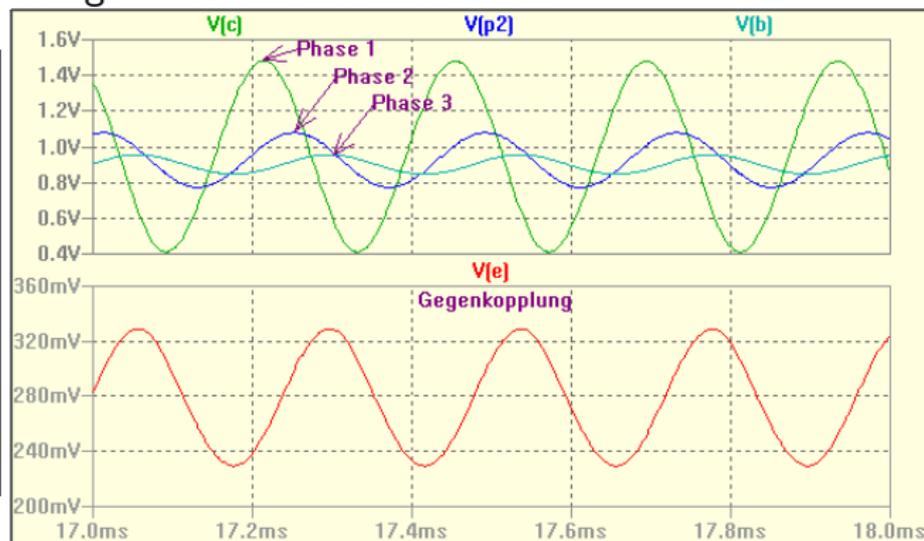
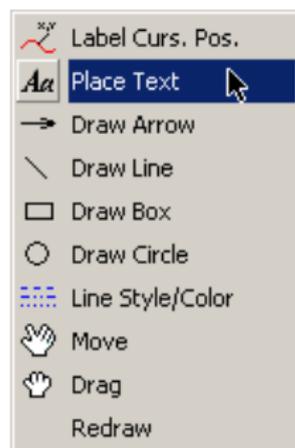


- Signale können per „drag-and-drop“ zwischen Diagrammen verschoben werden

Darstellung der Ergebnisse

Plot-Fenster

- Kommentare und Pfeile ins Diagramm setzen:
Menü: Plot Settings → Notes & Annotations



Darstellung der Ergebnisse

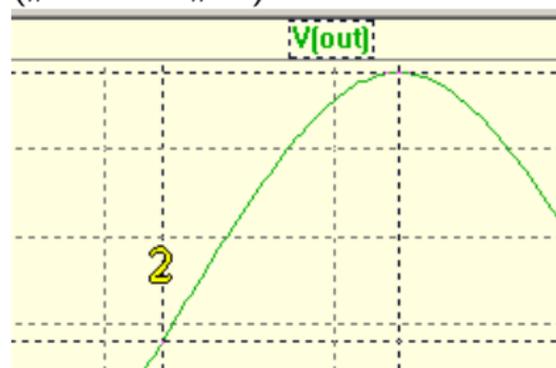
Plot-Fenster

- Rechnen mit Größen: im Diagramm rechte Maustaste → Add Trace oder Ctrl-A, dann Berechnungsformel mit den gelisteten Größen eingeben, z.B.:
 - $V(\text{amp}) * I(C4)$: Momentanleistung (.tran)
 - $V(\text{src}) - V(\text{zf})$: Spannungsdifferenz (.tran, .ac)
 - $V(\text{out}) / V(\text{in})$: Spannungsverhältnis (.ac)
 - $V(\text{mix}) / I(R7)$: Impedanz (.ac)
 - → weitere Operatoren und Funktionen im Handbuch (F1)
- Einstellungen können per Menü: Plot Settings → Save Plot Settings in Datei gespeichert werden
→ hilfreich auch bei Weitergabe von Simulationsdateien

Darstellung der Ergebnisse

Cursors in Plot-Fenster

- Klick auf Signalname am oberen Rand schaltet Cursor ein, und öffnet Cursor-Anzeigefenster
- Mauszeiger über Cursor-Linienkreuz zeigt dessen Nummer an („1“ oder „2“)



- Cursor kann bei gedrückter Maustaste horizontal verschoben werden

Darstellung der Ergebnisse

Cursors in Plot-Fenster

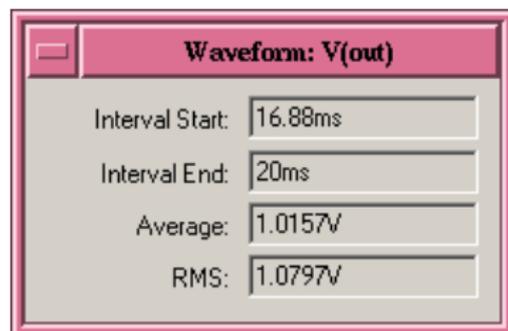
- rechte Maustaste auf Signalname öffnet Editorfenster, darin kann
 - die Linienfarbe verändert,
 - zugewiesene Cursor-Nummern ausgewählt,
 - das zugewiesene Signal geändert, oder
 - eine Berechnungsformel eingeben werden



Integrator: Mittelwert und Effektivwert

Ergebnisanalyse nach .tran-Simulation

- Ctrl + Klick auf Signalname öffnet „Integrate“-Fenster:



Tipp: AC-Effektivwert:

$$\text{RMS}_{\text{AC}} = \sqrt{\text{RMS}^2 - \text{Average}^2}$$

- Interval Start / End: Zeitbereich des Plot-Diagramms
- Average: Mittelwert des Signals über angezeigten Zeitbereich
- RMS: $\sqrt{\text{Mittelwert des (Signals)}^2}$ über angezeigten Zeitbereich
- Bei periodischen Signalen: Ganze Anzahl Perioden darstellen, um korrektes Ergebnis zu bekommen

FFT (Fast Fourier Transform)

Grundsätzliches

Nach .tran-Simulation: Spektrum-Analyzer statt Oszilloskop

- FFT ist eine schnell zu rechnende DFT (Discrete Fourier Transform):
abgetastetes, periodisches,
periodisches \iff abgetastetes
Zeitsignal Spektrum
- N äquidistante Punkte im Zeitbereich ergeben
 N äquidistante Punkte im Frequenzbereich (symmetrisch zu $N/2$)
- kleinste Zeiteinheit entspricht Teilung des Zeitintervalls T :
 $dt = T/N$
- kleinste Frequenzeinheit entspricht Kehrwert des Zeitintervalls:
 $df = 1/T$
- höchste Frequenz entspricht halber Abtastfrequenz des Zeitsignals:
 $f_{max} = N/2 \cdot df = N/(2 \cdot T) \rightarrow$ Shannon

FFT (Fast Fourier Transform)

Signal richtig wählen

Bedingungen für aussagekräftige FFT-Ergebnisse

- Möglichst Zeitintervall mit m ganzen Perioden des Signals wählen:
 - Signal nach Einschwingvorgang nehmen
 - Auswahl durch Zoom im Plot-Fenster: Use current zoom Extent
 - Direkte Eingabe: Specify a time range
 - Einschwingvorgang schon in `.tran` ausblenden:
Time to Start Saving Data
- Anzahl FFT-Punkte N hoch genug wählen, dass höchste erwartete Signalfrequenz noch erfasst wird (Aliasing vermeiden)
- für N Zweierpotenz (4, 8, 16, ... 1048576) oder Zehnerpotenz (10, 100, 1000, ... 1000000) wählen, keine Primzahl
- Amplitudenangaben nach FFT sind Effektivwerte (RMS)

Schaltungssimulation: Erste Probleme

worauf der Neueinsteiger bald stoßen wird

Wo gibt es ein Modell für *diesen* Transistor?

- Suche auf Hersteller-Webseite und im Datenblatt
- Datenbanken im Netz:
 - http://ltwiki.org/?title=Components_Library_and_Circuits
 - <http://robustdesignconcepts.com/files/pspice/pmindex.htm>
 - http://www.gunthard-kraus.de/Spice_Model_CD/
- Muss es *genau der* sein, oder funktioniert ein ähnlicher Typ, für den ein Modell verfügbar ist?
- Grundsätzlich: Modelle berücksichtigen keine Parameter-Streuung, sondern nehmen Mittelwerte oder Mindestwerte aus Datenblatt (z.B. $V_{GS,off}$ bei JFETs, β bei NPN oder PNP)

Schaltungssimulation: Erste Probleme

worauf der Neueinsteiger bald stoßen wird

Wo finde ich ein Modell für *diesen* OPamp?

- Manchmal gibt es Modelle vom Hersteller (ADI, TI)
- Diese funktionieren aber manchmal nicht (z.B. Microchip)
- Funktioniert ein ähnlicher Typ von LTC aus der Standard-Datenbank?
- Reicht sogar das einfache Modell mit GBW + Slew-Rate?
- Modell-Erstellung aus Datenblatt (für Fortgeschrittene):

<http://masteringelectronicsdesign.com/buildi-an-op-amp-spice-model-from-its-datasheet/>

Schaltungssimulation: Erste Probleme

worauf der Neueinsteiger bald stoßen wird

Gibt es ein Modell für *dieses* Spezial-IC?

- Beispiele: (De-)Modulatoren, PLLs, integrierte Empfänger, AGC-Verstärker, ...
- Nur selten gibt es Modelle vom Hersteller
- Versuche, Modell in LTspice-Group zu finden:
<https://groups.yahoo.com/neo/groups/LTspice/conversations/messages>
- Bei moderater Komplexität oder Abstrahierung der Funktion:
Eigenes Modell erstellen (für Fortgeschrittene)

Weiterführende Links

Allgemein: im Netz nach Begriffen suchen wie. . . :

[SPICE LTspice example circuits models libraries tutorial](#)

LTspice Download:

<http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice>

LTspice Yahoo group, unterstützt von LTC, Anmeldung erforderlich:

<https://groups.yahoo.com/neo/groups/LTspice/info>

LTwiki (ohne Bezug zu LTC), FAQ, Links auf viele andere Seiten:

http://ltwiki.org/?title=Main_Page

Gunthard Kraus, deutsche Anleitung, Beispiele, Modelle:

http://www.gunthard-kraus.de/LTSwitcherCAD/index_LTSwitcherCAD.html

LTspice Einführung mit Beispielen von Daniel, DC2PCC:

http://www.hb9f.ch/bastelecke/pdf/Vortraege/2012/LT_Spice_DC2PCC.pdf

vielen Dank!

Fragen? Anregungen? Verbesserungen?

dl4sdc@gmx.de