

LTspice

Einführung ins Simulations-Tool

Dieses Skript gibt eine Einführung in die Schaltungs-Analyse mit dem Simulations-Tool LTspice, welches in den Elektronik-Kursen der ZHAW eingesetzt wird.

Bis und mit Kapitel 5 sind die grundlegenden Funktionen erklärt. Diese Kapitel können selbständig in 2 bis 3 Stunden durchgearbeitet werden.

Arbeiten Sie diese Kapitel in der vorgegebenen Reihenfolge durch, weil das Beherrschen der vorangegangenen Schritte jeweils vorausgesetzt und darum nicht nochmals erklärt wird.

Im Kapitel 6 sind spezielle Simulations-Elemente erklärt, welche man seltener benötigt. Bei Bedarf können Sie hier nachgeschlagen werden.

Die besprochenen Beispiele finden Sie auf dem Server <http://dublin.zhaw.ch/~hhrt/LTspice/>

Hinweis:

Wenn eine Schaltung in der Simulation funktioniert, ist noch nicht garantiert, dass der reale Aufbau ebenfalls funktionieren wird. Trotzdem ist die Simulation ein zeitsparendes Hilfsmittel beim Entwurf und später bei den Tests an der realen Schaltung.

Original-URL: http://dublin.zhaw.ch/~hhrt/LTspice/LTspice_Einfuehrung.pdf

© Hanspeter Hochreutener, hhrt@zhaw.ch , 16. Juli 2021

Institute for Signal Processing and Wireless Communications (ISC)
<https://www.zhaw.ch/de/engineering/institute-zentren/isc/>

School of Engineering <https://www.zhaw.ch/de/engineering/>

Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften <http://www.zhaw.ch>

Inhaltsverzeichnis

1.	LTspice installieren.....	3
1.1.	Library für ZHAW-Elektronik-Labor.....	3
1.2.	Europäisches Widerstands-Symbol.....	4
2.	Schema zeichnen (Schematic Capture)	5
2.1.	Komponenten verschieben, verdrahten und löschen	5
2.2.	Passive Komponenten	6
2.3.	Aktive Komponenten	7
2.4.	Spannungs- und Stromquellen mit festem Wert	8
2.5.	Signalgeneratoren	8
2.6.	Signalnamen und Kommentare (Label, Text)	9
3.	Simulation (LTspice Dot Commands)	10
3.1.	Arbeitspunkt (DC Operating Point)	10
3.2.	Transienten-Analyse (Transient)	11
3.3.	Frequenzgang (AC Analysis).....	11
3.4.	Übertragungs-Kennlinie (DC Sweep)	12
4.	Diagramme (Waveform Viewer)	13
4.1.	Kurvenauswahl (Data Trace Selection)	13
4.2.	Zahlenwerte herauslesen	16
4.3.	Diagramm-Einstellungen (Plot Settings)	17
5.	Einstellungen (Control Panel, Color Preferences)	18
6.	Spezielle Simulations-Elemente	19
6.1.	Ohne Arbeitspunkt-Berechnung simulieren	19
6.2.	Anfangswerte (.ic = Set Initial Conditions)	19
6.3.	Schaltungs-Varianten vergleichen	20
6.4.	Änderungen in Funktion der Zeit	22
6.5.	Transformatoren.....	24
6.6.	Simulation beschleunigen.....	24
7.	Hilfe und Tutorials	24

1. LTspice installieren

LTspice (gratis) herunterladen und installieren von <http://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

LTspice kann, via WINE, auch unter Linux eingesetzt werden.

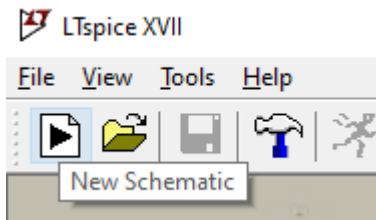
Es gibt auch eine Version für MAC. Die Bedienung ist aber leicht anders.

1.1. Library für ZHAW-Elektronik-Labor

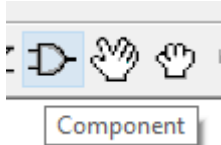
Für die in den Elektronik-Grundkursen der ZHAW eingesetzten Halbleiter habe ich Symbole und eine Library zusammengestellt.

Um diese zu nutzen, müssen Sie nach der Installation von LTspice

- Starten Sie LTspice und klicken Sie auf

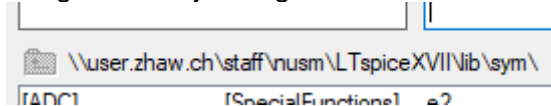


um ein neues Schema zu erstellen. Nun klicken Sie auf

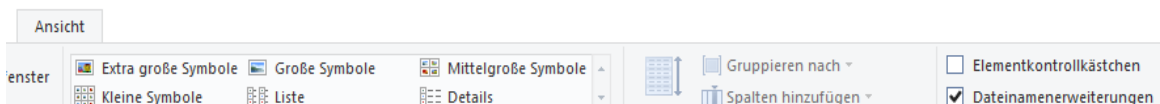


Falls Sie dieses Symbol nicht sehen, müssen Sie allenfalls das LTspice-Fenster horizontal vergrößern.

Merken sie sich den Pfad, welcher in der Komponenten-Wahl oben zu sehen ist. Dieser hängt von der jeweiligen Installation ab.

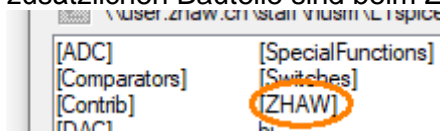


- Laden Sie die Symbol-Datei <http://dublin.zhaw.ch/~hrt/LTspice/Symbole.zip> herunter, und entpacken Sie in dieses Verzeichnis: **...lib\sym\ZHAW**.
- Laden Sie die Spice-Bibliothek <http://dublin.zhaw.ch/~hrt/LTspice/ZHAW.lib> herunter und kopieren Sie sie in dieses Verzeichnis: **...lib\sub**.
Achtung: Der Dateiname muss „ZHAW.lib“ sein; „ZHAW.lib.txt“ funktioniert nicht. MS Windows zeigt standardmässig die Datei-Erweiterung nicht an. Öffnen Sie dazu den Explorer, im Register "Ansicht" aktivieren Sie "Dateinamenerweiterungen".



Hinweis: **Nicht den Browser "Chrome" verwenden**, da er den Datei-Inhalt verändert.

- LTspice neu starten. Gehen Sie vor wie oben. Nun erscheint der Ordner ZHAW und die zusätzlichen Bauteile sind beim Zeichnen eines Schemas verfügbar.



1.2. Europäisches Widerstands-Symbol

Nach der Installation verwendet LTspice ein anglo-amerikanisches Widerstands-Symbol, wie beim abgebildeten Widerstand R1.



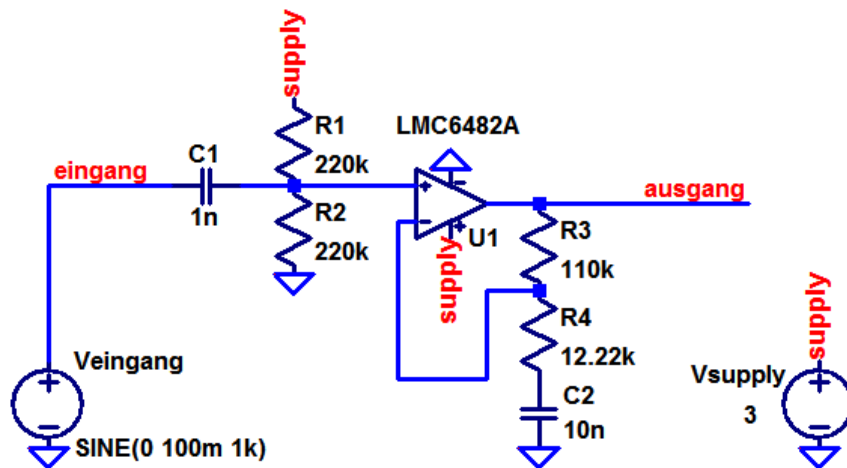
Falls Sie generell das europäische Symbol, wie beim Widerstand R2, vorziehen, können Sie das wie folgt umstellen:

1. Öffnen Sie den Ordner C:\Users***\Documents\LTspiceXVII\lib\sym (für MAC und ältere LTspice-Versionen die im Kapitel 1.1 erwähnten Pfade benutzen).
2. Suchen Sie die Datei "res.asy" und benennen Sie diese um in "res_us.asy".
3. Gehen Sie zum Ordner C:\Users***\Documents\LTspiceXVII\lib\sym\Misc
4. Kopieren Sie die Datei "EuropeanResistor.asy" in den (übergeordneten) Ordner "sym".
5. Nennen Sie die kopierte Datei um in "res.asy".
6. Starten Sie LTspice neu. Alle Schaltungen, auch die bereits vorhandenen, verwenden nun das europäische Symbol. Das Symbol in der Menu-Leiste bleibt ändert allerdings nicht.
7. Rückgängig machen durch umkehren obiger Schritte.

2. Schema zeichnen (Schematic Capture)


Das Zeichnen des Schemas einer Schaltung erlernt man am einfachsten anhand eines Beispiels. Die einzelnen Schritte für einen Vorverstärker mit Single-Supply-Operationsverstärker gemäss untenstehendem Schema werden demonstriert.


Vorverstärker mit Single-Supply-Operationsverstärker




2.1. Komponenten verschieben, verdrahten und löschen


Das sind die Editierbefehle, welche Sie für das Zeichnen des Schemas benötigen:


 (**Edit => Rotate**) zum Drehen eines Bauteils **bevor** es platziert wird. Hinweis: Ein bereits platziertes Bauteil muss zuerst mit Drag oder Move selektiert werden.


 (**Edit => Mirror**) zum Spiegeln eines Bauteil **bevor** es platziert wird. Hinweis: Ein bereits platziertes Bauteil muss zuerst mit Drag oder Move selektiert werden.

 (**Edit => Drag**) zum Verschieben anwählen. Mit **Links-Klick** das gewünschte Bauteil oder einen ganzen Bereich auswählen, an den gewünschten Ort verschieben und durch erneutes Links-Klicken platzieren. Dabei werden die Drahtverbindungen mitgezogen.

 (**Edit => Move**) macht dasselbe, aber die Drahtverbindungen werden nicht mitgezogen.

 (**Edit => Place GND**) verbindet mit Masse = 0-Volt-Bezugspotential für die Simulation

 (**Edit => Draw Wire**) verbindet Komponenten. Jeweils Links-Klicken bei Drahtanfang, Richtungsänderung und Drahtende.

 (**Edit => Delete**) löscht Verbindungen und Komponenten. Es kann mit der Maus auch ein ganzer zu löschender Bereich markiert werden.

Rechts-Klick auf eine Verbindung und **Delete Net** löscht das ganze Netz und nicht nur ein Drahtsegment.

Taste **ESC** jeweils zum Beenden einer Funktion.

 zum Vergrössern, Zentrieren, Verkleinern und Einpassen des Schema-Ausschnitts.

2.2. Passive Komponenten

Übung

Starten Sie LTspice und öffnen Sie ein leeres Schema durch Anklicken der Schaltfläche  auf der Symbolleiste oder mit dem Menu **File => New Schematic**.

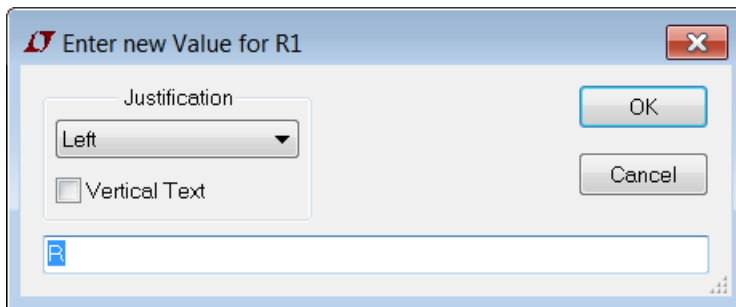
Übung

Für die Widerstände klicken Sie auf das Symbol  (Menu **Edit => Resistor**).

Platzieren Sie die vier Widerstände.

Taste **ESC** zum Beenden.

Widerstands-**Wert** ändern mit **Rechts-Klick** auf den Buchstaben **R** neben dem Symbol




R überschreiben mit 220k, etc.

Analog kann der Bauteil-**Name** angepasst werden durch **Rechts-Klick auf den Namen**.

Für die Zahlenwerte können Sie diese Ingenieurabkürzungen verwenden:

Verwechslungsgefahr: "**M**" oder "**m**" ist **milli** = 10^{-3} "**MEG**" oder "**meg**" ist **Mega** = 10^6


Übung

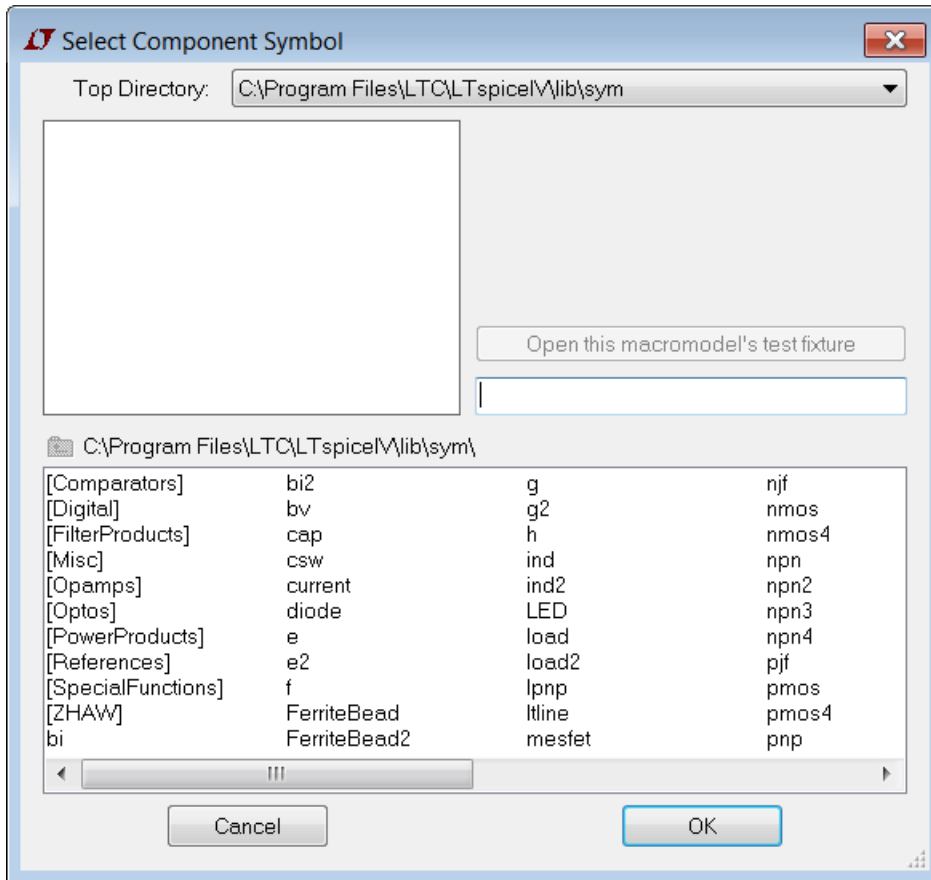
Für die Kondensatoren verfahren Sie analog: Symbol  (Menu **Edit => Capacitor**).

Kondensator-Wert ändern mit **Rechts-Klick** auf den Buchstaben **C** neben dem Symbol.

Suffix	Multiplier
T	1e12
G	1e9
Meg	1e6
K	1e3
Mil	25.4e-6
M	1e-3
u (or μ)	1e-6
n	1e-9
p	1e-12
f	1e-15

2.3. Aktive Komponenten

Auswahl aktiven Komponenten über das Symbol  (Edit => Component).



Grundlegende Komponenten und diskrete Halbleiter sind hier aufgeführt.

Die eckigen Klammern bezeichnen Ordner mit den entsprechenden Komponenten.

Doppelklicken auf **[Opamps]** zeigt die Operationsverstärker von Linear Technology.

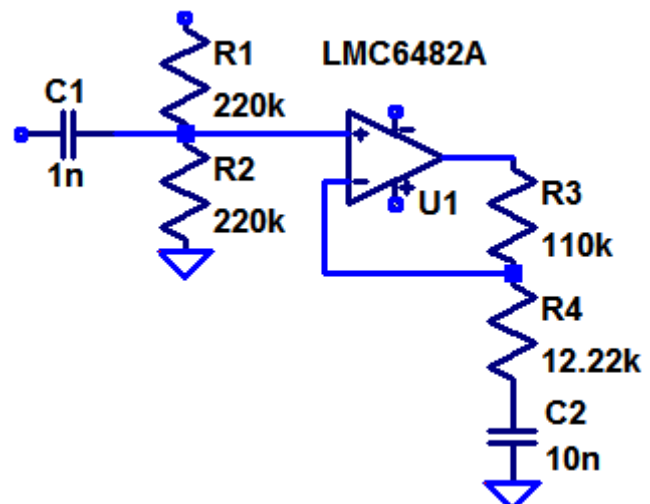
Zurück durch Doppelklicken auf **[..]**.

Im Ordner **[ZHAW]** sind die Halbleiter aufgeführt, welche in den Elektronik-Grundkursen der ZHAW eingesetzt werden.

Übung

Wählen Sie den LMC6482 aus dem Ordner [ZHAW] und bauen Sie ihn ins Schema ein.


Verschieben, drehen und verdrahten Sie die Bauteile, bis das Schema ungefähr so aussieht:

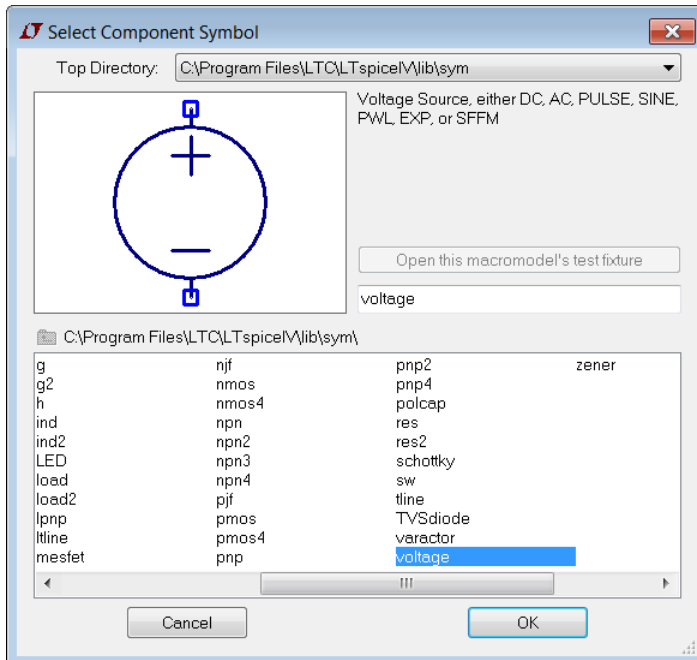


Es fehlen noch die Spannungsversorgung des Operationsverstärkers und das Eingangssignal.

2.4. Spannungs- und Stromquellen mit festem Wert

Übung

Spannungsquelle auswählen über das Symbol  (Edit => Component) dann **voltage** wählen. (Für eine Stromquelle würde man **current** wählen).



Rechts-Klicken auf **V1** und den Namen ändern zu **Vsupply**.

Rechts-Klicken auf **V** und **3** (= 3 Volt) eintippen.

2.5. Signalgeneratoren

Die oben beschriebenen Spannungs- und Stromquellen können universell konfiguriert werden.

Übung

Wählen Sie für das Eingangssignal eine weitere Spannungsquelle aus wie oben beschrieben. Ändern Sie den Namen **V2** auf **Veingang**.

Rechts-Klicken auf das **Symbol** und auf die Schaltfläche **Advanced** klicken, öffnet das Menu mit den erweiterten Einstellungen:

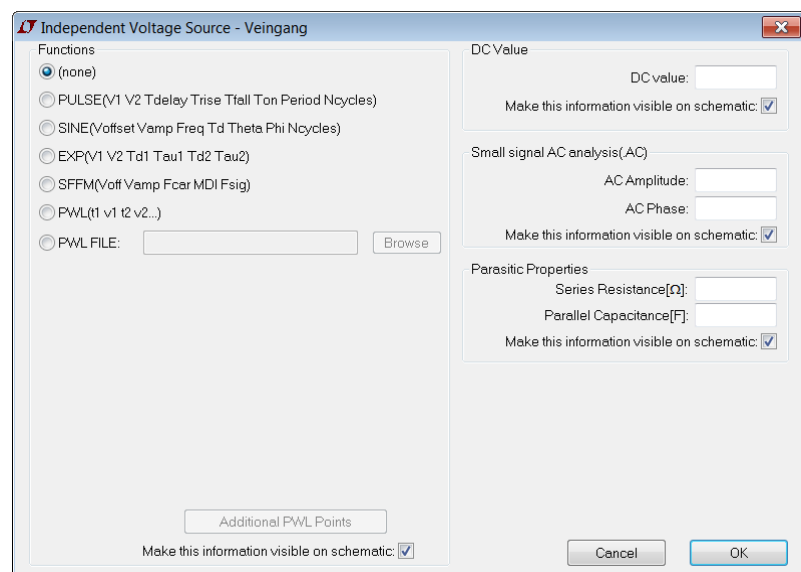
(none) bezeichnet eine Gleichspannungsquelle.

PULSE nimmt man für Rechteck-Signale mit definierten Anstiegs- und Abfallzeiten.

SINE ist ein Sinus-Signal.

Übung

Stellen Sie **1 kHz**, **100 mV** Amplitude ohne DC-Offset ein.



2.6. Signalnamen und Kommentare (Label, Text)

Damit das Schema übersichtlich bleibt, zeichnet man die Leitungen für die Speisespannung oft nicht ein. Man gibt einfach allen Anschlüssen denselben Namen; damit sind Sie automatisch zu einem Schaltungsknoten miteinander verbunden.

 (Edit => Label Net) benennt einen Schaltungsknoten

Übung

Setzen Sie am + Anschluss der Spannungsquelle Vsupply, an der + Speisung des Operationsverstärkers und an den oberen Anschluss des Widerstandes R1 je ein Label mit dem Namen „supply“.

Setzen Sie einen Massen-Anschluss an den - Anschluss der Spannungsquelle Vsupply und an die - Speisung des Operationsverstärkers.

Gehen Sie analog vor für die Eingangsspannung.

Wenn Sie möchten können Sie die Knoten „eingang“ und „ausgang“ ebenfalls beschriften.

 (Edit => Text) für Kommentare, Titel, etc.

Übung

Ergänzen Sie das Schema mit einer Überschrift.

Sieht das Schema jetzt so aus wie am Anfang des Kapitels 2 gezeigt?

3. Simulation (LTspice Dot Commands)

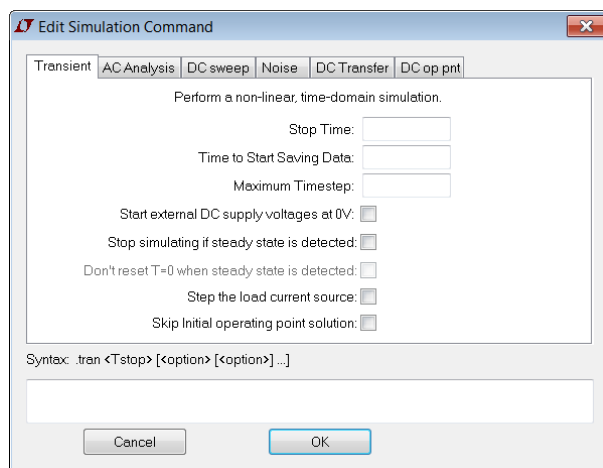
Sie können für die Simulation das vorher gezeichnete Schema verwenden oder das Muster vom Server laden <http://dublin.zhaw.ch/~hhrt/LTspice/Vorverstaerker.asc>

3.1. Arbeitspunkt (DC Operating Point)

Bevor weiterführende Simulationen (oder Messungen) gemacht werden, lohnt es sich, zu überprüfen, ob der Gleichspannungs-Arbeitspunkt stimmt.

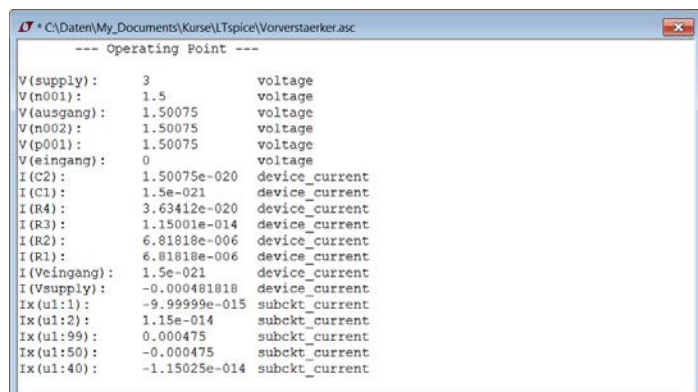
Für die Arbeitspunkt-Berechnungen werden Kondensatoren als Unterbrüche (Strom = 0) und Induktivitäten als Kurzschlüsse (Spannung = 0) betrachtet.

 (**Simulate => Run**) anklicken öffnet dieses Dialog-Fenster



Register **DC op pnt** anklicken und **OK** zeigt das Resultat der Berechnungen (alle Knotenspannungen und Ströme).

Wo Sie einen Namen angegeben haben wird dieser übernommen; die anderen Knoten werden von LTspice durchnummeriert.



Wenn der Cursor im Schema auf den Knoten zwischen R1 und R2 ist, zeigt die Statuszeile (links unten): **This is node N001. DC operating point: V(n001) = 1.5V**

Oder Cursor über R1: **Right click to edit R1. DC operating point: I(R1) = 6.81818µA Dissipation=10.2273µW**

Dieselben Informationen, wie in der Tabelle, erhalten Sie also auch wenn Sie mit dem Cursor im Schema an die entsprechende Stelle fahren.

Wichtig: Sie müssen nach jeder noch so kleinen Änderung in der Schaltung, die Simulation neu durchführen, damit die Resultate stimmen.

Im Schema steht nun **.op**. Wenn ein Text mit einem **Punkt beginnt**, ist es ein **Spice-Befehl**.


Übung

Auf welche Spannung wird der Kondensator C2 aufgeladen?

3.2. Transienten-Analyse (Transient)

Rechts-Klicken Sie auf den Spice-Befehl **.op** (Simulate => Edit Simulation Cmd), um eine andere Simulationsart zu wählen.

Wählen Sie das Register **Transient** und tragen Sie bei **Stop Time 3m** (= 3 ms) ein. Der Spice-Befehl lautet nun **.tran 3m**.

 (**Simulate => Run**) anklicken öffnet ein leeres Diagramm-Fenster.

Klicken Sie im Schema auf die Knoten „eingang“ und „ausgang“, um die Signale anzuzeigen.

Übung

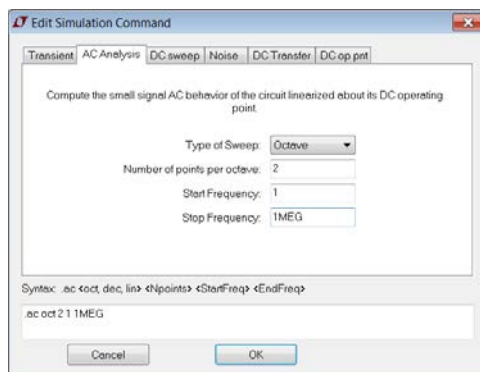
Wie gross ist die Signalverstärkung $\Delta V(\text{ausgang})/\Delta V(\text{eingang})$?

Stimmt Sie mit der theoretischen Formel $v = 1 + R3/R4$ überein?

Hinweis: Bei der Transienten-Analyse wird vor dem Einschalten der Signalquellen als erstes der Arbeitspunkt berechnet. Falls das, z.B. bei getakteten Schaltungen, nicht gewünscht ist, sollte beim Simulations-Befehl eine der Optionen „Start external DC supply voltage at 0V“ (startup) oder „Skip Initial operating point solution“ (uic) gewählt werden. Mehr dazu im Kapitel 6.1 .

3.3. Frequenzgang (AC Analysis)

Passen Sie den Simulations-Befehl wie folgt an



Hinweis: **Octave** entspricht einer Frequenzverdoppelung, **Decade** einer Verzehnfachung

Im Schema steht nun **.ac oct 2 1 1MEG**

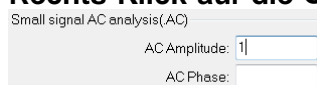
 (**Simulate => Run**) anklicken zeigt ein Fenster mit der Fehler-Meldung

No AC stimulus found:

Set the value of a current or voltage source to "AC 1."
to make it behave as a signal generator for AC analysis.

Das bedeutet, dass Sie noch angeben müssen, welche Quelle als Eingang benutzt werden soll.

Rechts-Klick auf die Quelle Veingang und auf der rechten Seite eine 1 (= 1 V) eintragen bei



 (**Simulate => Run**) anklicken **im Schema auf die Knoten** „ausgang“

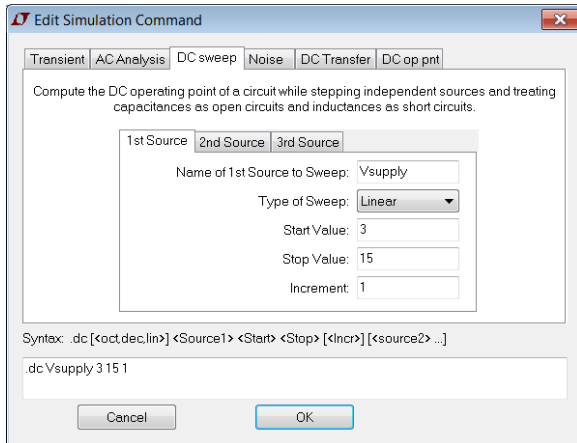
Übungen

Wie gross sind Verstärkung und Phasenverschiebung bei 10 kHz?

Wo liegen die untere und die obere Grenzfrequenz (3 dB Abfall)?

3.4. Übertragungs-Kennlinie (DC Sweep)

Um die Abhängigkeit des Arbeitspunktes von der Versorgungsspannung zu simulieren, ändern Sie den Simulations-Befehl zu



Übung

Wie sollte der Arbeitspunkt von der Versorgungsspannung abhängen?

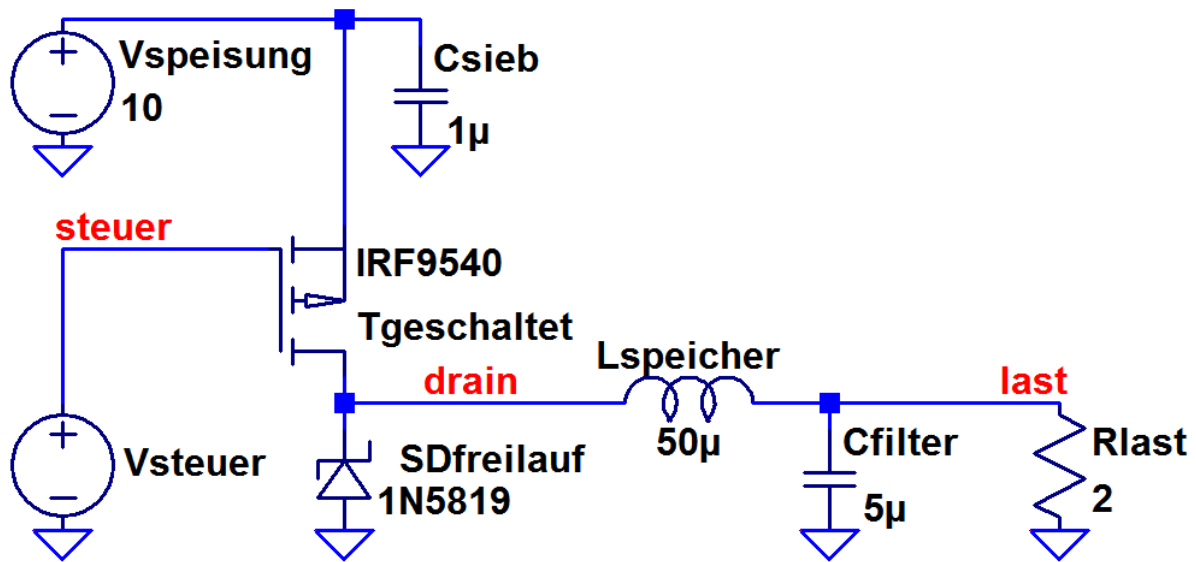
Was zeigt die Simulation?

DC Sweep wird auch verwendet für das Plotten von (nicht-linearen) Halbleiter-Kennlinien.

4. Diagramme (Waveform Viewer)

Um die Möglichkeiten der Auswertungen und Diagramme zu veranschaulichen, wird das Beispiel eines getakteten Abwärtswandlers verwendet.

Getakteter Abwärtswandler



PULSE(0 20 6u 100n 100n 3.9u 10u)

.tran 100u uic

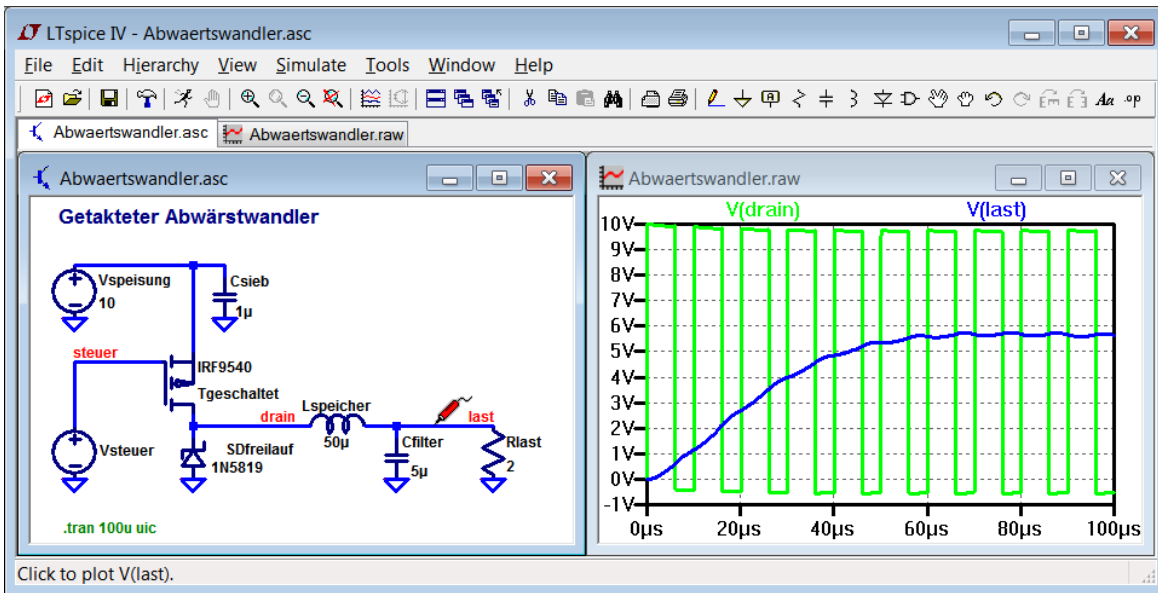
Sie können das Schema der Schaltung selbst zeichnen oder vom Server laden <http://dublin.zhaw.ch/~hhrt/LTspice/Abwaertswandler.asc>

Hinweis: Bei getakteten Schaltungen ist es definitionsgemäss sinnlos bei der Transienten-Analyse zuerst den Arbeitspunkt zu berechnen. Deshalb wurde hier die Option „Skip Initial operating point solution“ (uic) gewählt. Mehr dazu im Kapitel 6.1 .

4.1. Kurvenauswahl (Data Trace Selection)

Nachdem die Simulations-Resultate vorliegen, können die Kurvenverläufe geplottet werden.

4.1.1. Spannung gegen Masse



Im Schema auf den Knoten (Leitungen) klicken von dem man den Spannungsverlauf sehen möchte. Im Screenshot sieht man die rote Messspitze auf der Leitung mit dem Namen „last“.

Übung

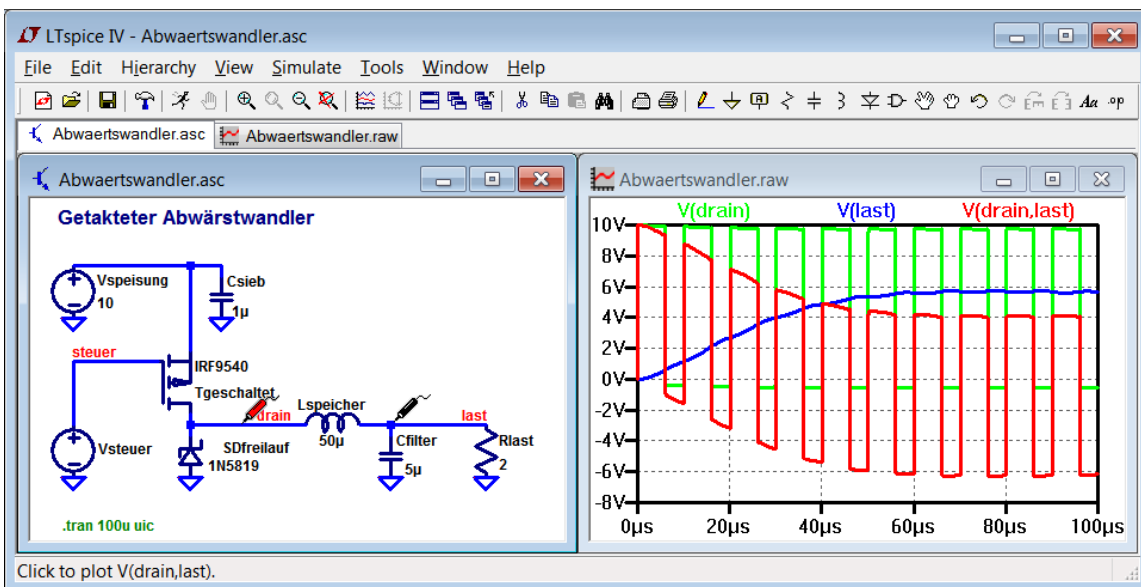
Plotten Sie die Spannung am Drain des Transistors.

Hinweis: Wo sind Source, Drain und Gate bei einem p-Kanal-FET?

4.1.2. Spannungs-Differenz

Wenn, z.B. die Spannung über der Spule Lspeicher interessiert, **Links-Klick** auf den Knoten rechts der Spule, **Maus-Taste gedrückt halten**, zum Knoten links der Spule bewegen und hier die Maus-Taste loslassen.

Alternativ kann man durch **Rechts-Klick** auf den Knoten rechts der Spule **Mark Reference** wählen (**schwarze Messspitze**). **Links-Klick** auf den Knoten links der Spule (**rote Messspitze**) zeigt die gewünschte Differenz-Spannung $V_{\text{drain,last}} = V(\text{drain}) - V(\text{last})$




Taste **ESC** löscht die Referenz.

Übung

Plotten Sie die Spannungen zwischen Drain und Source sowie zwischen Gate und Source des Transistors.


4.1.3. Strom durch ein Bauteil

Fährt man mit der Maus auf ein Bauteil, ändert die Form zu einer Strommesszange . **Links-Klicken** plottet den Strom.

Übung

Plotten Sie den Drain-Strom.


4.1.4. Strom durch eine Leitung

Fährt man mit der Maus auf eine Leitung und drückt gleichzeitig die **ALT**-Taste, ändert die Form zu einer Strommesszange . **Links-Klicken** plottet den Strom.

Übung

Plotten Sie den Strom auf der Leitung zum Widerstand Rlast.

4.1.5. Leistung

Fährt man mit der Maus auf ein Bauteil und drückt gleichzeitig die **ALT**-Taste, ändert die Form zu einem Thermometer . **Links-Klicken** plottet den Verlauf der Leistung.

Übung

Plotten Sie die Leistung im Widerstand Rlast.

4.1.6. Kurve hinzufügen (Add Trace)

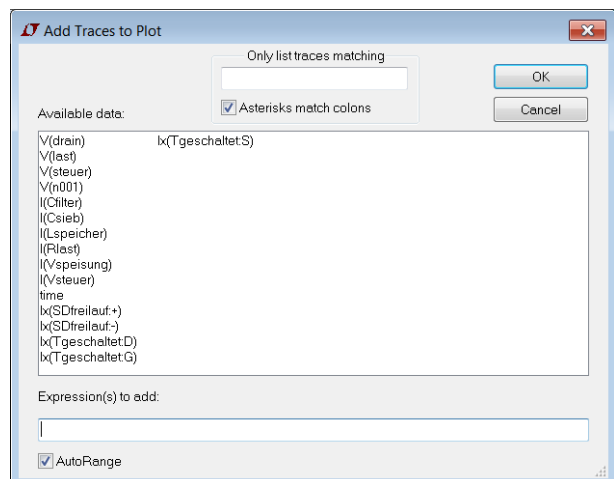
Damit können auch Größen oder Ausdrücke, welche nicht direkt mit dem Cursor angewählt werden können, geplottet werden.

Rechts-Klick ins Diagramm-Fenster => Add Trace

Um z.B. die Spannung an der Spule zu plotten, kann man „V(drain)“ anklicken, im Feld unten „-“ eintippen und oben „V(last)“ anklicken.

Natürlich hätte man auch „V(drain)-V(last)“ direkt eintippen können oder den gleichwertigen Ausdruck „V(drain,last)“.

Oder um die in der Spule gespeicherte Energie ($W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$) anzuzeigen, kann man „ $\frac{1}{2} \cdot 50 \mu\text{Vs} / 1\text{A} \cdot I(\text{Lspeicher})^2$ “ eintippen. Wenn die Spule mit den korrekten Masseinheiten eingegeben wird ($50 \mu\text{H} = 50 \mu\text{Vs} / \text{A} = 50 \mu\text{Vs} / 1\text{A}$) ist auch die Achsenbeschriftung mit μJ korrekt.



Hinweis: Alle Funktionen: **Help => Help Topics => Register: Index => Waveform Arithmetic**

Übung

Plotten Sie die im Kondensator Cfilter gespeicherte Energie.

Kontrolle: Wenn ihre Formel stimmt, ist die Masseinheit μJ .

4.1.7. Kurven-Auswahl (Visible Traces)

Rechts-Klick ins Diagramm-Fenster => Visible Traces

Mit Taste **CTRL** und **Links-Klicken** können einzelne Kurven aus-/abgewählt werden.

Übung

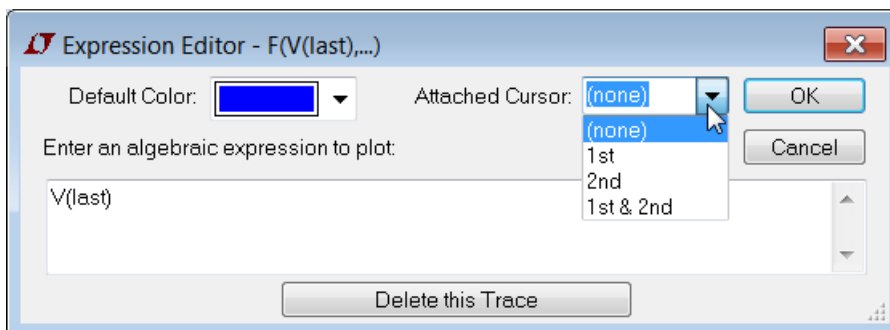
Plotten Sie für den Kondensator Cfilter Spannung, Strom und gespeicherte Energie.

4.2. Zahlenwerte herauslesen

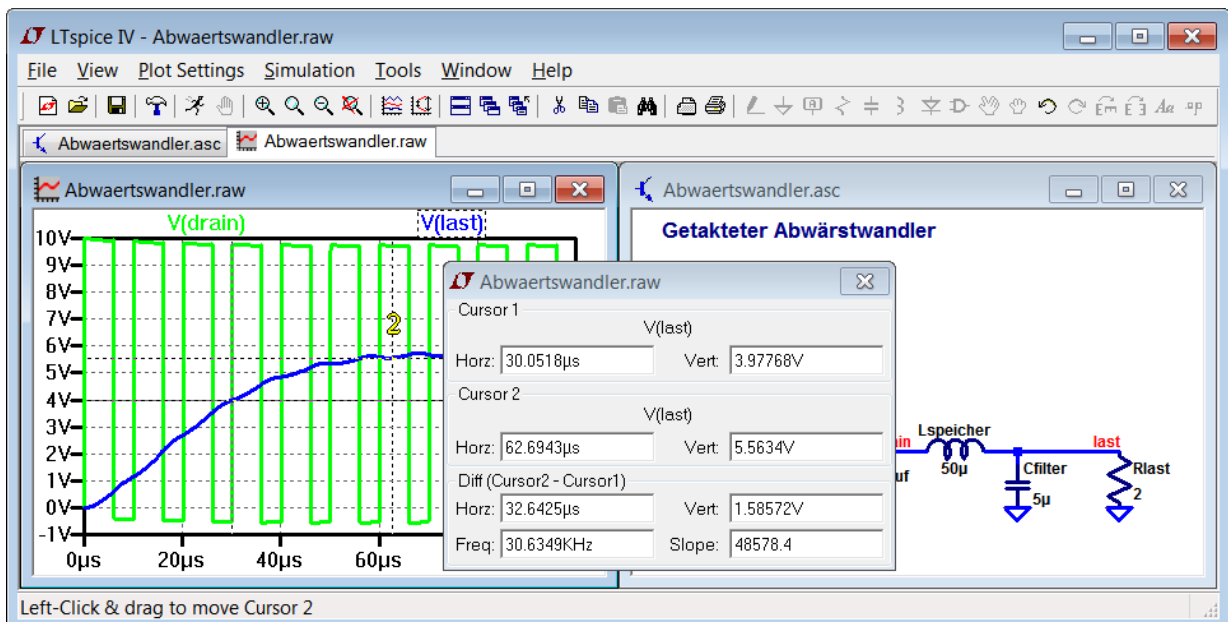
Der grafische Verlauf einer Kurve zeigt auf einen Blick, ob Sie qualitativ den Erwartungen entspricht. Für eine genauere Analyse benötigt man oft auch quantitative Aussagen.

4.2.1. Momentanwerte (Attached Cursors)

Rechts-Klick auf Kurven-Name im Diagramm-Fenster öffnet



Bei **Attached Cursor** kann die Anzahl Cursor gewählt werden. Bei 2 sieht es z.B. so aus



Die Cursors sind mit 1 resp. 2 gekennzeichnet und können mit der Maus bewegt werden.

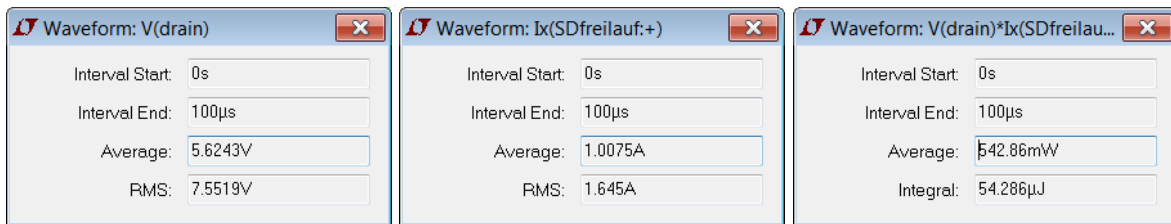
Im Cursor-Fenster sind deren Positionen und die Differenzen angegeben.

Übung

Lesen Sie die Taktfrequenz aus dem Verlauf von V(drain) heraus.

4.2.2. Mittel-, Effektivwert (Average, RMS, Integral)

Mit Taste **CTRL** und **Links-Klicken auf Kurven-Name** im Diagramm-Fenster auf Spannung, Strom und Leistung der Schottky-Diode öffnet diese Fenster



Hinweis: Die Berechnungen erfolgen über den ganzen sichtbaren Zeitbereich.

Übung

Wie gross sind die drei Mittelwerte für den Zeitraum 80µs bis 100µs?

4.2.3. Fourier-Analyse (Fourier Component)

Diagramm-Fenster aktivieren, dann Menu **View => FFT** öffnet einen Dialog indem ausgewählt werden kann, von welchen Kurven das Frequenzspektrum berechnet werden soll.

Hinweis: Aus **Frequenzauflösung = 1/Simulationszeit** ergibt sich, dass die Simulationszeit relativ lang gewählt werden muss, z.B. 10 bis 100 Perioden der tiefsten Frequenz.

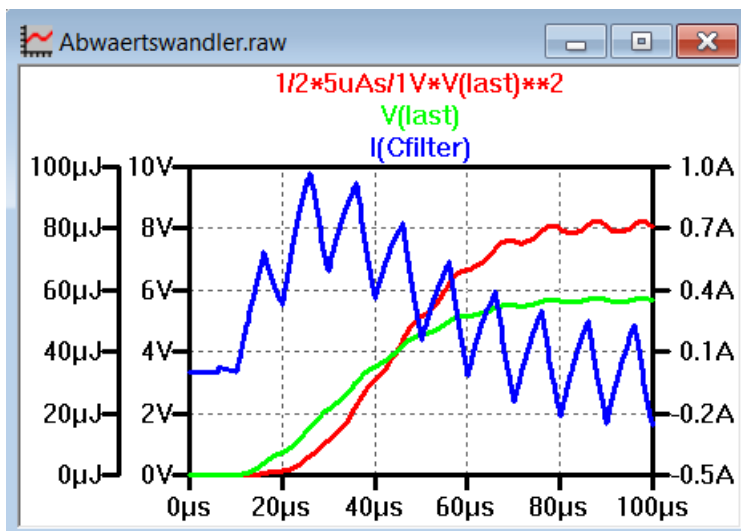
4.3. Diagramm-Einstellungen (Plot Settings)

4.3.1. Achsen manuell festlegen (Axis Control)

Wenn die Maus über einer Achse ist, erscheint ein Massstab. Klicken um diese anzupassen.

Übung

Passen Sie die Achsen wie folgt an



4.3.2. Ausschnitte (Zooming)

Ausschnitte können mit den Zoom-Tools oder wie oben beschrieben über manuelles Anpassen der Achsen gewählt werden.

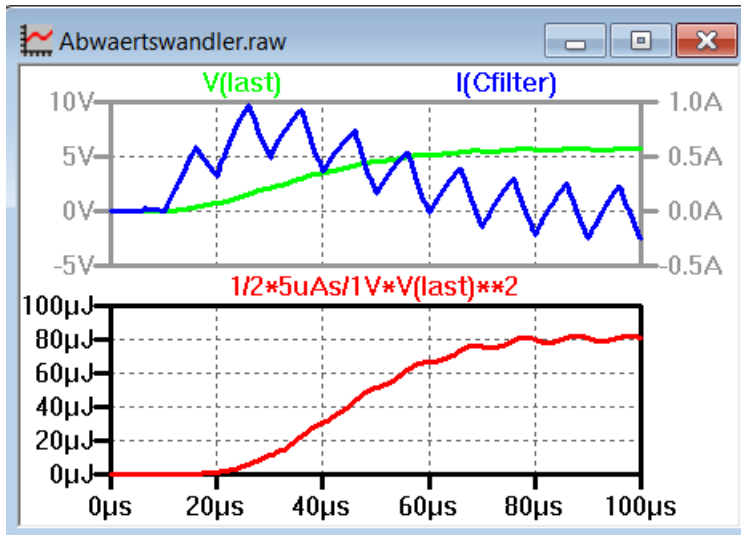
4.3.3. Kurven separieren (Plot Panes)

Bei vielen Kurven leidet schnell die Übersicht. **Rechts-Klick ins Diagramm-Fenster => Add Plot Pane** öffnet ein zusätzliches Diagramm.

Die Kurven können von einem Diagramm ins andere verschoben werden, indem man die **Kurven-Beschriftung mit der Maus hinüberzieht**.

Übung

Separieren Sie die Kurven so



4.3.4. Diagramm Einstellungen speichern (Save Plot Settings)

Diagramm-Fenster aktivieren, dann Menu **Plot Settings => Save Plot Settings**

Die Einstellungen können mit **Plot Settings => Reload Plot Settings** wieder geladen werden.

5. Einstellungen (Control Panel, Color Preferences)

Bei **Tools => Control Panel** sind folgende Register interessant:

SPICE (Solver, Integrations-Methode und Genauigkeit für die Simulation)

Drafting Options (Schriftgröße und -schnitt, Liniendicke im Schema)

Waveforms (Schriftgröße und -schnitt, Liniendicke im Diagramm)

Mit **Tools => Color Preferences** lassen sich die Farben für Schemata und Diagramme wählen. Z.B. ziehe ich einen weissen Hintergrund der Default-Einstellung schwarz vor.

6. Spezielle Simulations-Elemente

Die SPICE-Elemente lassen sich sehr detailliert parametrisieren. Zusätzlich stehen neben den üblichen mathematischen Funktionen auch spezielle „Simulations“-Funktionen zur Verfügung. Mit anderen Worten: mit SPICE lässt sich fast jede elektronische Schaltung simulieren, wenn man den wüsste wie.

In diesem Kapitel zeige ich einige mächtige und gleichzeitig einfache Anwendungen.

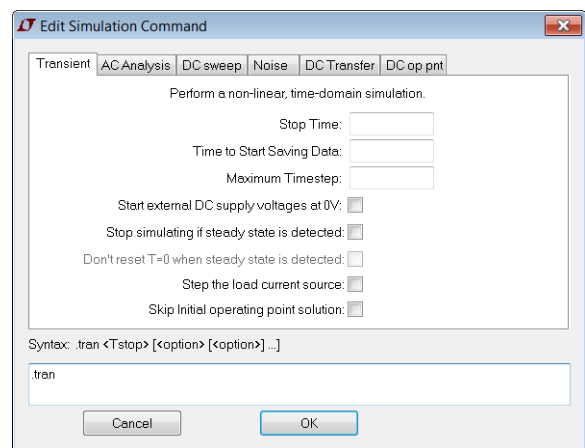
6.1. Ohne Arbeitspunkt-Berechnung simulieren

Üblicherweise berechnet SPICE vor der Transienten-Analyse zuerst den Gleichspannungs-Arbeitspunkt um die Anfangswerte für die Simulation zu bestimmen. Für die Arbeitspunkt-Berechnungen werden Kondensatoren als Unterbrüche (Strom = 0) und Induktivitäten als Kurzschlüsse (Spannung = 0) betrachtet.

Bei getakteten Schaltungen ist die vorgängige Arbeitspunkt-Berechnung sinnlos, da definitionsgemäss einige Spannungen schnell umgeschaltet werden.

Skip Initial operating point solution schaltet bei Simulationsbeginn alle Quellen gleichzeitig und augenblicklich ein.

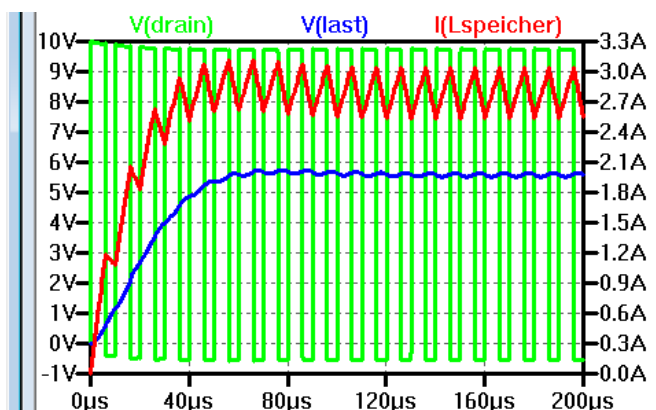
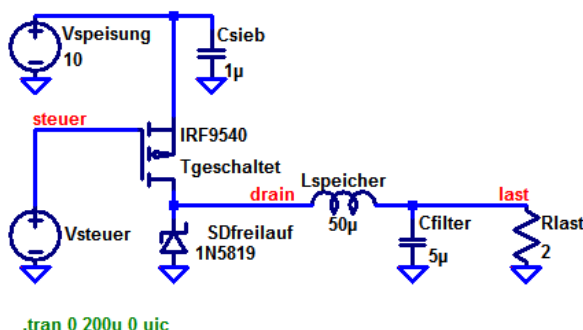
Start external DC supply voltages at 0V schaltet die Gleichspannungsquellen bei Simulationsbeginn innerhalb von $20\mu\text{s}$ ein. Das verhindert Stromspitzen beim anfänglichen Laden von Kondensatoren.



6.2. Anfangswerte (.ic = Set Initial Conditions)

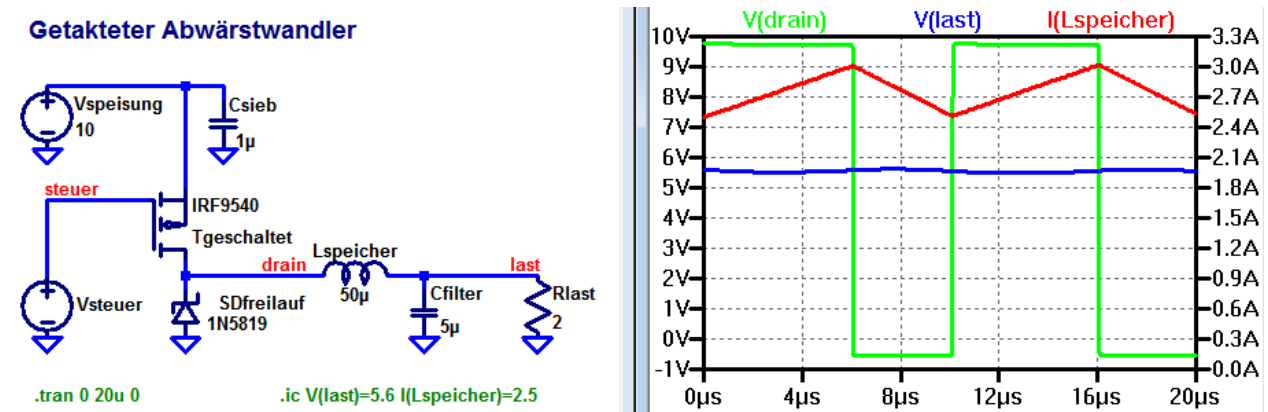
Oft dauern Einschwingvorgänge relativ lange und benötigen entsprechend viel Simulationszeit.

Getakteter Abwärtsrichter



Viel schneller geht es, wenn für Knotenspannungen (bei Kondensatoren) und für Spulenströme sinnvolle Anfangswerte gesetzt werden mit denen die Simulation starten soll.

Sinnvolle Anfangswerte können aus einer einmaligen langen Simulation, aus vorgegebenen Randbedingungen oder Spezifikationen gewonnen werden.



Mit dem SPICE-Befehl `.ic V(last)=5.6 I(Lspeicher)=2.5` startet die Simulation mit einem Strom von 2.5A durch die Spule Lspeicher und mit einer Spannung von 5.6V am Kondensator Cfilter.

Beachten Sie, dass im Simulationsbefehl `.tran` weder **Skip Initial operating point solution** noch **Start external DC supply voltages at 0V** gewählt werden dürfen, wenn Anfangsbedingungen berücksichtigt werden sollen.

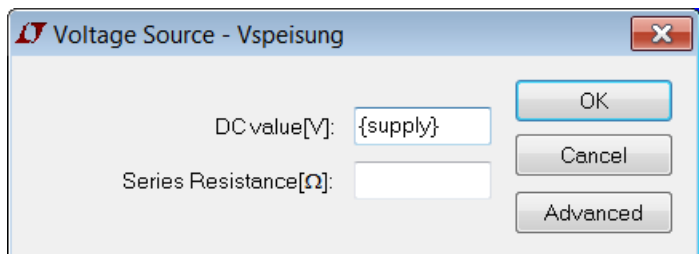
6.3. Schaltungs-Varianten vergleichen

Wenn man das Verhalten für verschiedene **Bauteil-Werte miteinander vergleichen** möchte, muss man mit Hilfe von **SPICE-Befehlen und Parametern** die Bauteile entsprechend konfigurieren. Hier werden einige häufig benötigte Elemente vorgestellt.

6.3.1. Spannungsquelle parametrisieren

Um z.B. zu sehen, wie sich der Abwärtswandler bei verschiedenen Speisespannungen verhält, muss man die Quelle Vspeisung parametrisieren. Zwei Schritte führen zum Resultat

Rechts-Klick auf die Quelle Vspeisung und als DC value [V]: `{supply}` eintragen

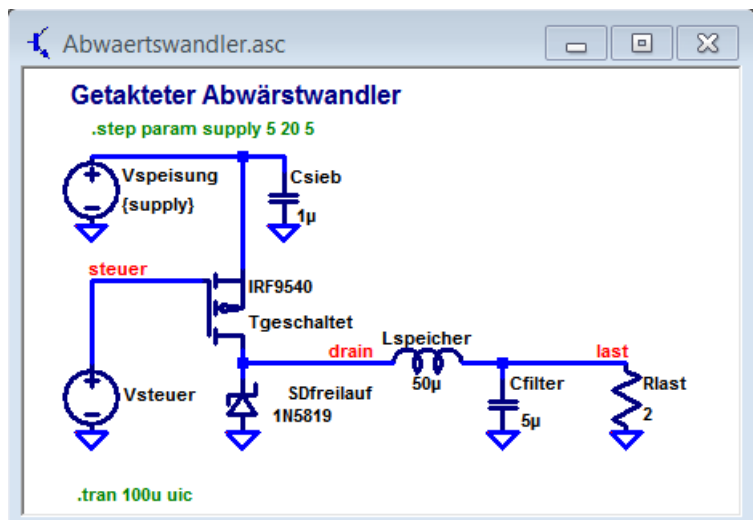


Die **geschweiften Klammern {...}** bedeuten, dass der Ausdruck erst zur Simulationszeit ausgewertet wird. **supply** ist ein **beliebig wählbarer Name**.

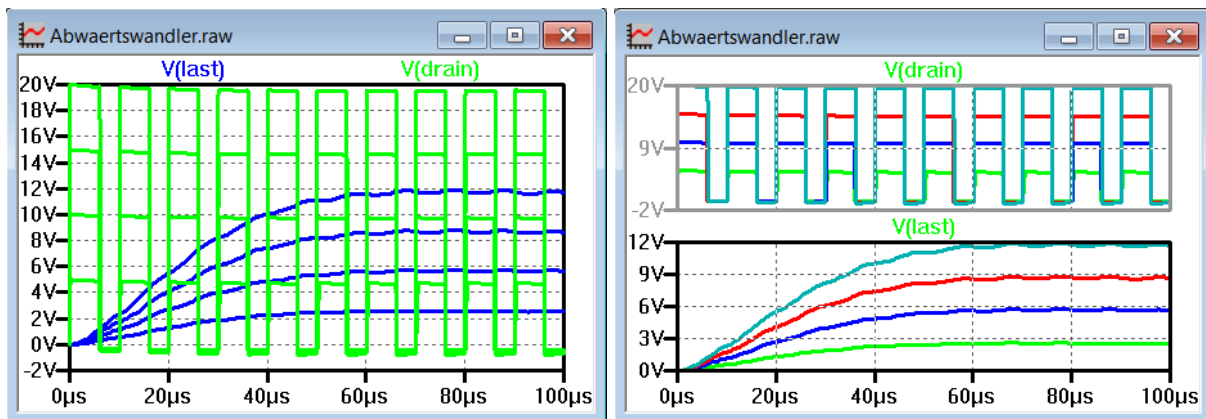
Um zu definieren, was mit dem **Ausdruck supply** gemacht werden soll, platziert man mit `.op` (**Edit => SPICE Directive**) diesen Befehl im Schema

`.step param supply 5 20 5`

`.step` ist der Befehl; auf `param` folgt der Parametername, von 5 bis 20 mit Schrittweite 5



Hier sind die Simulations-Resultate, dargestellt auf zwei Arten:

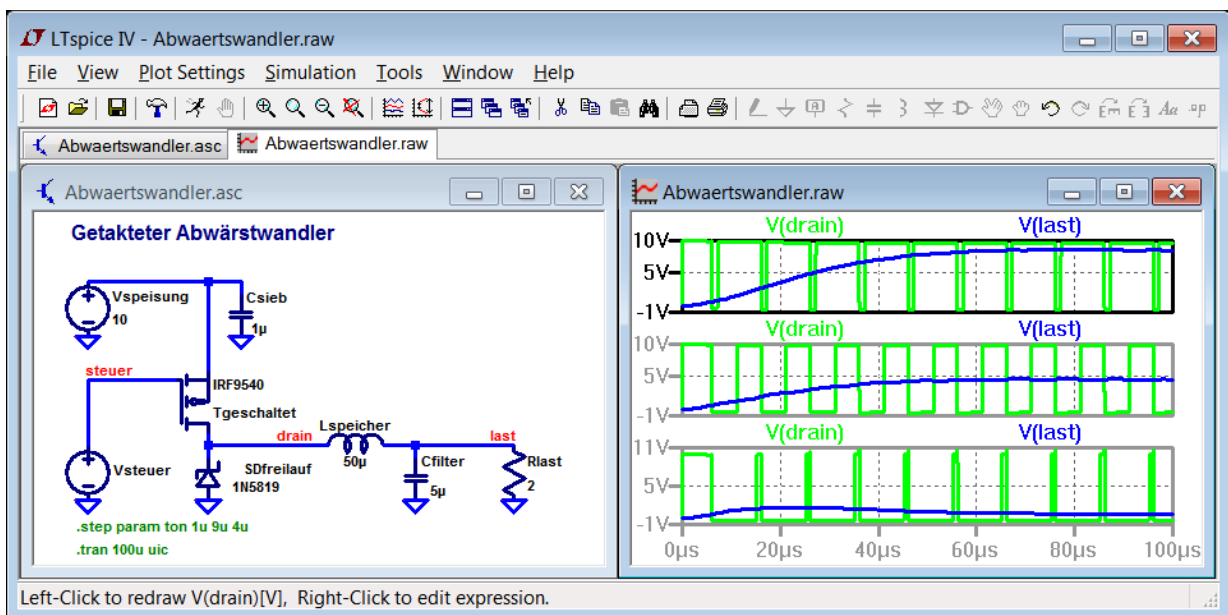


Ich persönlich finde das Diagramm rechts mit den separierten Kurven übersichtlicher.

6.3.2. Puls-Breite parametrisieren

Um z.B. zu sehen, wie sich der Abwärtswandler bei verschiedenen Pulsbreiten verhält, muss man die Quelle Vsteuer parametrisieren. Das Vorgehen ist analog zum oberen Beispiel. Zwei Schritte führen zum Resultat

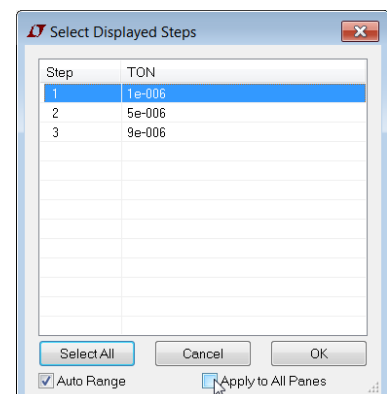
- **Rechts-Klick auf die Quelle Vsteuer** und bei Ton [s]: **{ton}** eintragen.
- mit **.op** (**Edit => SPICE Directive**) aufnehmen ins Schema **.step param ton 1u 9u 4u**



Im oberen Diagramm wurden ausschliesslich die Kurven von Schritt 1 ausgewählt; im mittleren jene von Schritt 2 und im unteren jene von Schritt 3.

Zum Anzeigen der Kurven von Schritt 1 im obersten Diagramm **Rechts-Klick** auf das obere Diagramm und **Select Steps** wählen

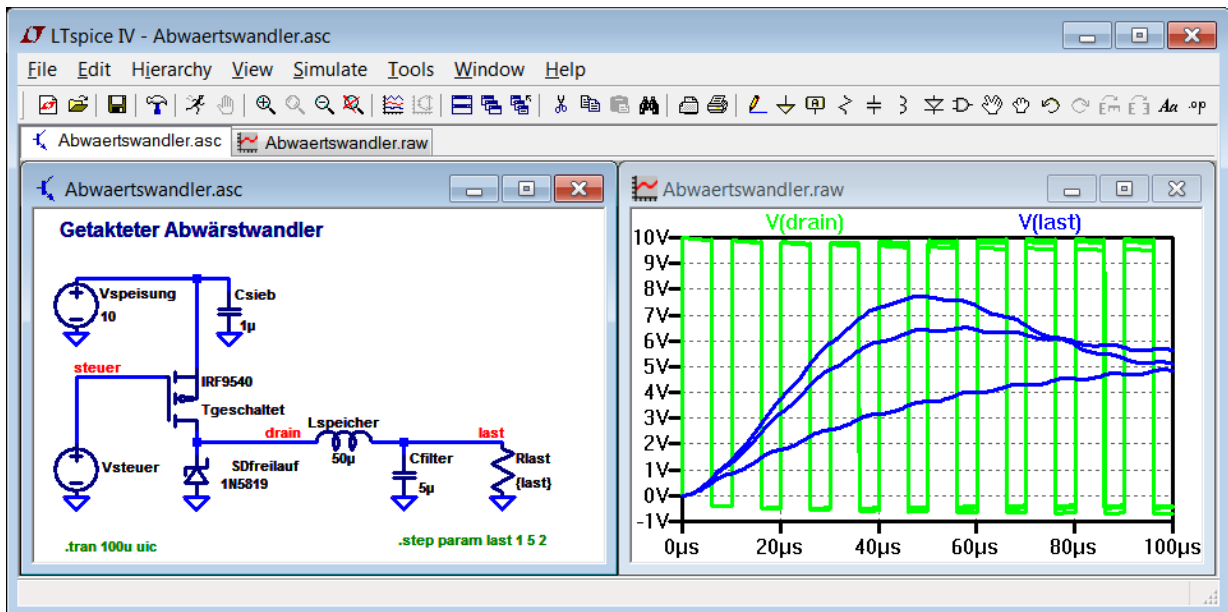
Wichtig ist das **abwählen von Apply to All Panes** unten im Dialog-Fenster.



6.3.3. Widerstand parametrisieren

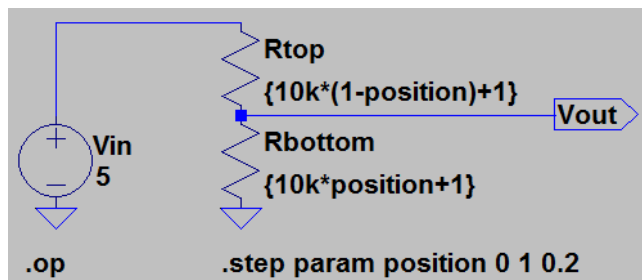
Das Vorgehen ist genau gleich, wie bei der Spannungsquelle beschrieben.

Z.B. verschiedene Lastwiderstände vergleichen



6.3.4. Potentiometer

werden mit Hilfe von zwei gegenläufig parametrisierten Widerständen gebildet.



position	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Rtop	10001Ω	8001Ω	6001Ω	4001Ω	2001Ω	1Ω
Rbottom	1Ω	2001Ω	4001Ω	6001Ω	8001Ω	10001Ω

Um bei der Simulation eine mögliche Division durch 0 auszuschliessen, wird bei jedem Widerstand je 1 Ω addiert.

6.4. Änderungen in Funktion der Zeit

Wie ändert sich das Verhalten bei einem **Last- oder Signalwechsel**? Einem Element in der Schaltung kann mitgeteilt werden, dass sich ein Wert im Laufe der Simulation ändert, indem man diesen mit Hilfe der **SPICE-Funktionen und Zeitvariablen time** laufend neu berechnet. Hier werden einige häufig benötigte Elemente vorgestellt.

6.4.1. Zeitgesteuerte Spannungsquelle

ist als Standard in SPICE bereits vorhanden. Man muss dafür als Quellenfunktion lediglich **PULSE**, **SINE** oder **PWL** wählen muss.

Interessant sind auch die Parameter **delay** (Signal verzögert aktivieren) und **Ncycles** (nach einer gewünschten Anzahl Perioden Signal deaktivieren).

6.4.2. Zeitgesteuerte Stromquelle (als Last)

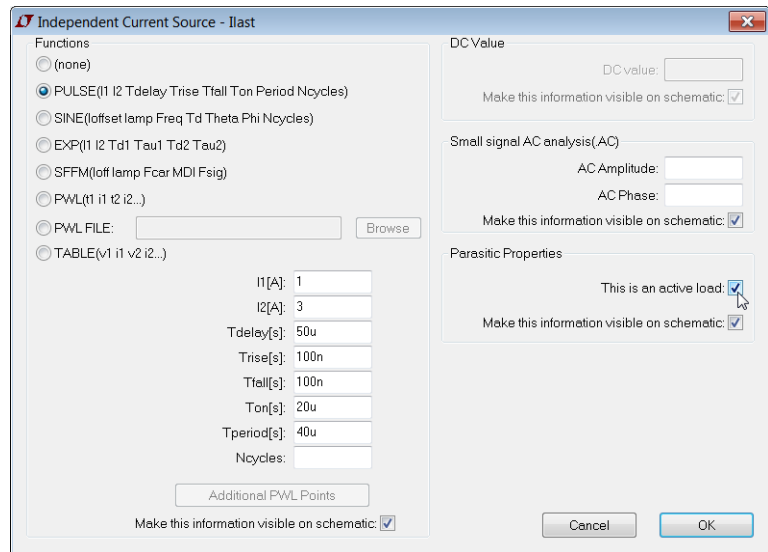
Für das untersuchen des Regelverhaltens wird oft eine Stromquelle anstelle eines Widerstandes als Last verwendet. Interessant ist dabei die Reaktion auf einen Lastsprung.

Das Vorgehen ist analog wie bei der zeitgesteuerten Spannungsquelle beschrieben.

Beispiel:

Strom während $50\mu\text{s}$ 1A, dann für $20\mu\text{s}$ 3A und wieder 1A mit Wiederholung alle $40\mu\text{s}$

Wenn Sie „**This is an active load**“ anwählen, ist garantiert, dass sich die Quelle als aktive Last verhält. D.h. bei Spannungen ≤ 0 ist der Strom = 0.

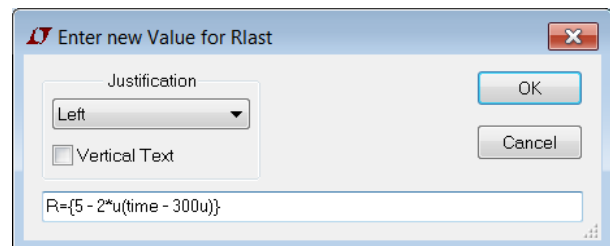


6.4.3. Zeitgesteuerter Widerstand

Illustration anhand eines Beispiels:

Beim Abwärtswandler soll der Widerstand R_{last} während $300\mu\text{s}$ 5Ω sein und anschliessend 3Ω . Der Widerstandswert muss also mit einer Formel mit der Zeit als Variablen beschrieben werden.

Rechts-Klick auf den Wert des Widerstandes R_{last} und $R=\{5 - 2*u(\text{time} - 300u)\}$ eingeben

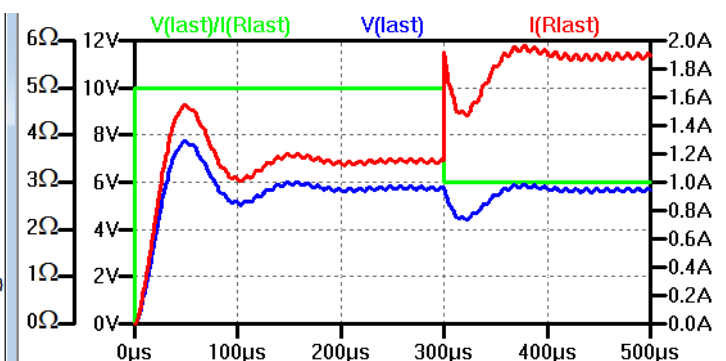
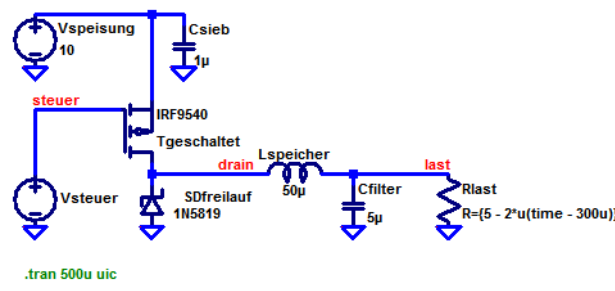


Die Funktion u steht für unit-step (Einheitssprung): $u(x) = \text{Unit step, i.e., } 1 \text{ if } x > 0., \text{ else } 0.$

Mit der Variablen $\text{time} = \text{Simulationszeit}$ berechnen sich die Widerstandswerte zu

$\text{time} \leq 300\mu\text{s} \Rightarrow R = 5 - 2*0 = 5\Omega$ und $\text{time} > 300\mu\text{s} \Rightarrow R = 5 - 2*1 = 3\Omega$

Getakteter Abwärtswandler



Hinweis:

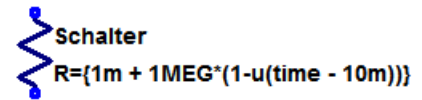
Die verfügbaren Funktionen finden Sie in **Help => Help Topics => Register: Index => .PARAM**

6.4.4. Zeitgesteuerter „Schalter“

Zeitgesteuerte Schalter gibt es nicht als SPICE-Element. Sie werden oft mit einem spannungsgesteuerten Schalter und einer Spannungsquelle mit gewünschtem zeitlichen Verlauf implementiert.

Einfacher scheint mir anstelle dieser Konstruktion ein zeitgesteuerter Widerstand (Beschreibung siehe oben) mit einem grossen (Schalter offen) und kleinen (Schalter geschlossen) Wert.

Beispiel: Ein „Schalter“, welcher nach 10ms schliesst: Widerstand ist zuerst 1MΩ und „schaltet“ nach 10ms auf 1mΩ.



Hinweis:

Die verfügbaren Funktionen finden Sie in **Help => Help Topics => Register: Index => .PARAM**

6.5. Transformatoren

einbinden ist etwas gewöhnungsbedürftig. Hier ist ein Tutorial: Using Transformers in LTspice <http://www.analog.com/en/technical-articles/using-transformers-in-ltspice-switcher-cadiii.html>

6.6. Simulation beschleunigen

Je nach Schaltung und Eingangssignal, kann es vorkommen, dass die Berechnungen nur langsam konvergieren.

Konvergenz beschleunigen mit:

- Im Menu **Tools => Control Panel** das Register **SPICE** anklicken und bei **Solver: Alternate** wählen.
- Falls das nicht reicht, können, ebenfalls im Register **SPICE**, zusätzlich **Abstol: 1e-011** und **Reltol: 0.01** gesetzt werden.

7. Hilfe und Tutorials

Für den Start gibt es das Tutorial: LTspice Getting Started Guide (Folien 14 - 38) in Englisch: <http://www.analog.com/media/en/simulation-models/spice-models/LTspiceGettingStartedGuide.pdf>

Mathis Nussberger hat eine deutsche Kurzanleitung geschrieben <http://dublin.zhaw.ch/~hhrt/LTspice/LTSpice%20Tutorial%201%20V03.pdf> und für Fortgeschrittene eine Anleitung zum Einbinden zusätzlicher Spice-Modelle <http://dublin.zhaw.ch/~hhrt/LTspice/LTSpice%20Tutorial%202.pdf>

Ich benutze oft die LTspice-interne Hilfe (Taste F1).

Falls diese mal zu knapp ausfällt, gibt es ein ausführliches Deutsches Tutorial http://www.gunthard-kraus.de/LTSwitcherCAD/CD_LTSwitcherCAD/pdf-file/LTspice_4_d.pdf