

## Mit LTspice Analogschaltungen prüfen

Helmut Stadelmeyer

Gelegentlich ist man auf der Suche nach einer Schaltung und findet im Internet einen auf den ersten Blick gut passenden Vorschlag. Beim Nachbau stellt sich dann heraus, daß doch einige Bauteile zu ändern sind. Nicht viel anders ist es, wenn man selbst eine Schaltung entwirft – auch da sind bei der Inbetriebnahme zumeist Änderungen notwendig.

Nachstehend wird an zwei Beispielen die Anwendung eines kostenfreien Programms beschrieben, mit dem man die richtigen Bauteilwerte und das Verhalten der Schaltung schon vorher am Rechner ermitteln kann.

Jeder, der selbst elektronische Baugruppen anfertigt, kennt das: Man gibt sich bei der Anfertigung der Leiterplatte und bei ihrer Bestückung allergrößte Mühe, damit das Ergebnis herzeigbar wird und kommt bei der Inbetriebnahme drauf, daß Widerstände zu ändern sind und die Werte einiger Kondensatoren auch noch nicht passen. Schlimmstenfalls sind sogar Leiterbahnen zu ändern. Also unter Zähneknirschen Bauteile wechseln und wieder probieren. Funktioniert zu guter Letzt alles, dann schaut die Leiterplatte oft aus, als käme sie aus dem Mülleimer.

Das muß heutzutage nicht mehr sein, weil es kostenfreie Programme zur Schaltungssimulation gibt, die sehr gute Ergebnisse liefern. Eines dieser Programme ist LTspice, das vom Halbleiterhersteller LINEAR TECHNOLOGY (in der Folge LT genannt) entwickelt worden ist und das man bei [1] herunterladen kann. Auch wenn das Programm in erster Linie für die Auslegung von Schaltnetzteilen unter Verwendung der von LT hergestellten ICs gemacht worden ist, kann es ebenso gut zur Simulation aller anderen Analogschaltungen verwendet werden, wie die Beispiele zeigen sollen. Dargestellt werden die Signalverläufe in Abhängigkeit von der Zeit und von Pegelwerten ganz ähnlich wie bei einem Speicheroszilloskop. Die Möglichkeiten der Meßwertdarstellung gehen allerdings über das, was solche Oszilloskope üblicherweise bieten, ein gutes Stück hinaus. Die Arbeit mit dem Programm besteht aus zwei Schritten: Zuerst ist der Schaltplan einzugeben und dann kann man den Signalverlauf an allen nur erdenklichen Punkten der Schaltung anzeigen.

Beginnen wir mit der Erstellung des Schaltplans am Beispiel eines 10-MHz-Referenzoszillators für ein Meßgerät, wobei die Funktion der Oszillator-Ausgangsstufe untersucht werden soll. Zum besseren Verständnis zuerst der Gesamtschaltplan, wobei der uns interessierende Teil grau hinterlegt ist:

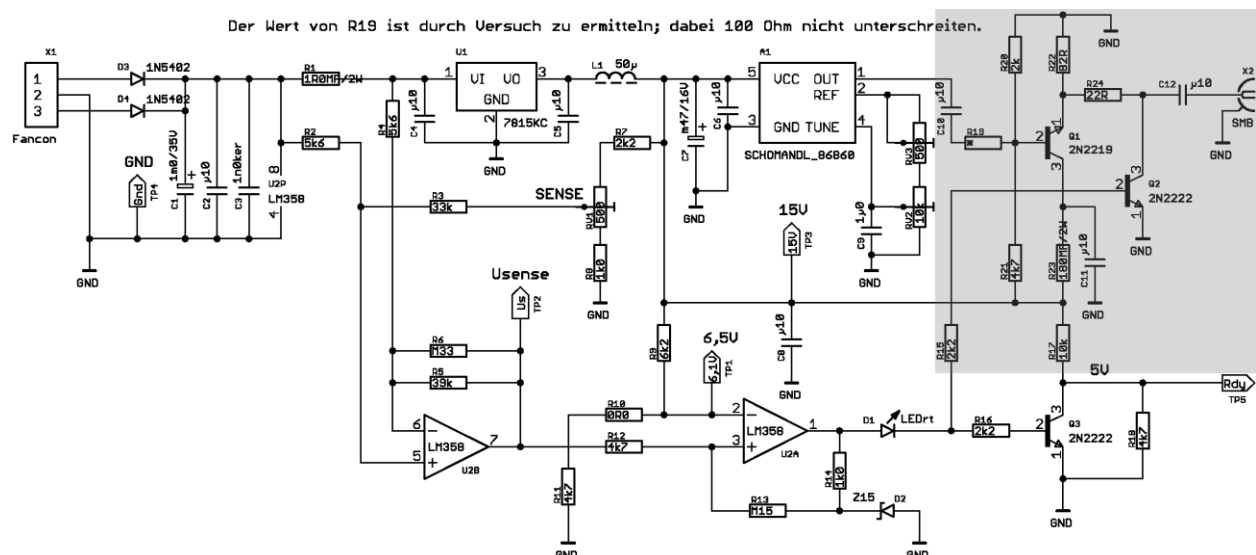



Abb. 1: Beispiel 1. Gesamtschaltbild der Baugruppe

Nach dem ersten Start des Programms ist im Menü „File“ der Punkt „New Schematic“ anzuklicken; damit öffnet sich eine leere Zeichenfläche mit Rasterpunkten. Die Vergrößerung lässt sich, wie bei vielen Programmen üblich, mit dem Mausekranz verstellen. Für den Anfang ist es keine schlechte Idee, im Menü „View“ die unteren drei Zeilen anzuhaken.

Wer gerne mit Tastenkürzeln arbeitet (sehr empfehlenswert für das Zeichnen der Schaltung!), findet unter „Tools | Control Panel | Drafting Options | Hot Keys“ die ganze Liste, die sich übrigens nach dem Geschmack des Anwenders ändern lässt. Zum Zeichnen stellt LTspice eine große Anzahl von fertigen Bau-

teilen zur Verfügung, die durch einen Klick auf das Symbol  erreichbar sind. Beim Zeichnen beginnen wir mit der Spannungsversorgung, die als Batteriesymbol dargestellt wird und auf der linken Seite nach einem Doppelklick auf „[Misc]“ als „battery“ zur Verfügung steht. Man wird am Anfang ein wenig suchen müssen, bis man alle gewünschten Bauteile hat, aber nur so lernt man, was es an fertigen Bauteilen schon alles gibt.

Ist das Symbol auf der Zeichenfläche, fährt man mit dem Cursor in seine Nähe, wobei der sich dann in einen Zeigefinger verwandelt. Ein Klick mit der rechten Maustaste öffnet das Fenster zur Eingabe der Bauteilwerte. Bei unserer Stromquelle kann man neben der Spannung einen „Series Resistance“ angeben, der den Innenwiderstand der Quelle darstellt; wir lassen dieses Feld frei oder geben 0 Ohm ein, weil es sich bei unserem Beispiel um eine stabilisierte Stromquelle mit sehr geringem Innenwiderstand handelt. Bauteilname und Bauteilwert lassen sich mit der rechten Maustaste ändern, wenn man den Cursor auf die Schrift stellt.

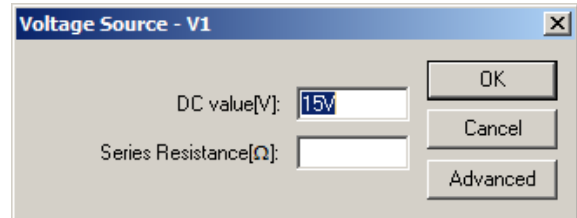


Abb. 2: Fenster zum Eingeben der Bauteilwerte

Für den Oszillator A1 wählen wir aus „[Misc]“ das Bauteil „signal“ und geben dafür die in Abb. 3 ersichtlichen Parameter an. Mit SINE liefert unser Oszillator A1 ein Sinus-Signal, die Frequenz legen wir mit 10MHz fest. Ncycles legt die Anzahl der von A1 abgegebenen Perioden fest; in diesem Fall reichen 1000, was einer Signaldauer von 100 µs entspricht.

Weil der Oszillator eine Ausgangsimpedanz von 50 Ohm hat, ist dieser Wert im Feld „Parasitic Properties“ einzutragen.

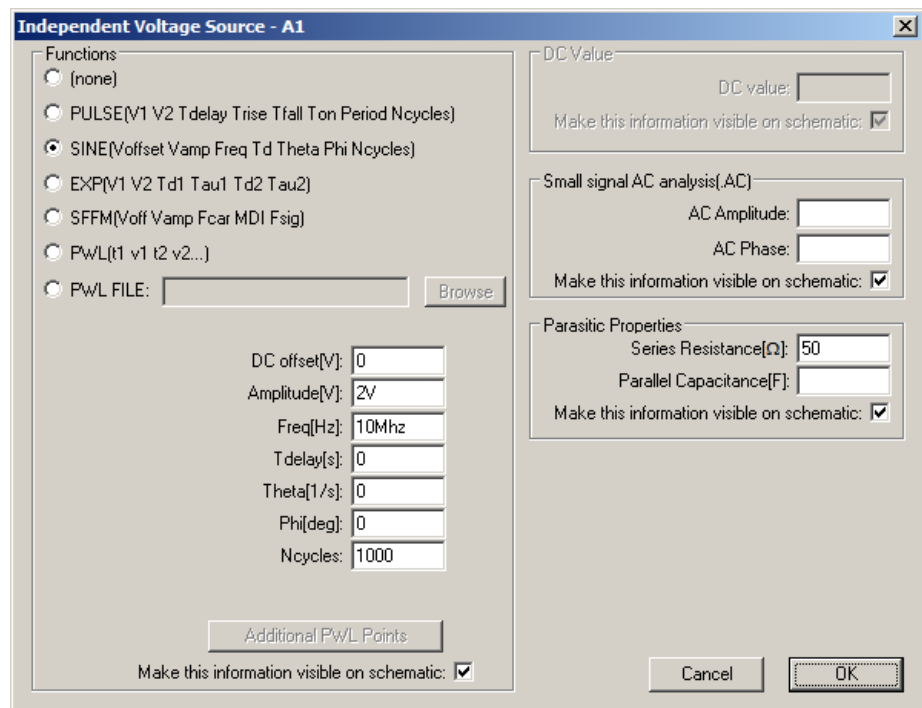


Abb. 3: Festlegen der Bauteilwerte für A1

Damit die Werte im Schaltbild erscheinen, müssen die Zeilen „Make this information visible on schematic“ angehakt sein. Zum Zeichnen des Schaltbildes sind die Tasten F2 bis F9 gemäß Abb. 4 sehr hilfreich. Bei Widerständen und Kapazitäten kann man zwischen amerikanischen und europäischen Symbolen wählen: Die amerikanischen sind in der Menüleiste über dem Zeichenfeld, die europäischen findet man wieder unter „[Misc]“.

Die Bauteile sind mit Linien (F3) in der gewünschten Weise zu verbinden, bis das Schaltbild fertig ist. Den Zeichenmodus verläßt man mit der Taste „Esc“. Das gilt gleichermaßen für alle übrigen Zeichnungsfunktionen.

Beim Schaltbild Abb. 6 gibt es gegenüber der Abb. 1 zwei Unterschiede:

Zur korrekten Simulation ist eine Ausgangslast anzugeben, die hier aus einem ohmschen Widerstand RL und einer dazu parallelgeschalteten Kapazität CL besteht (z.B. ein längeres, nicht angepaßtes Koaxialkabel).

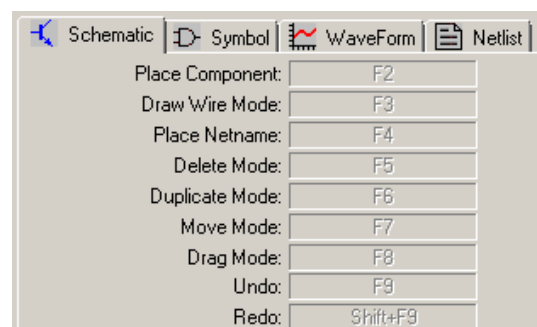


Abb. 4: Zuordnung der Funktionstasten

## Simulationsprogramm LTspice

Der zweite Unterschied ist die Ansteuerung von Q2, die in der Baugruppe durch U2A zustande kommt. Wir stellen das in LTspice mit R1 und einer wahlweise anzuschließenden Masseverbindung dar.

Zu guter Letzt ist im Menü „Simulate | Edit Simulation Command“ die Tabelle „Transient“ auszufüllen. Bei unserem Beispiel beenden wir die Aufzeichnung nach 50  $\mu\text{s}$ , gestartet wird sie nach 49,8  $\mu\text{s}$ . Somit ist das Zeitfenster für die Aufzeichnung 0,2  $\mu\text{s}$  lang, was genau für zwei Perioden der 10-MHz-Schwingung ausreicht. Die um 49,8  $\mu\text{s}$  verzögerte Aufzeichnung ist deshalb gewählt worden, weil jede Schaltung eine bestimmte Zeit braucht, bis sich nach dem Einschalten ein stabiler Betriebszustand einstellt. Die Simulation berücksichtigt auch das. Wer will, kann das Zeitfenster zum Beginn hin verschieben und den Einschwingvorgang untersuchen.

Steht der jetzt entstandene Text an einer ungünstigen Stelle, so kann er mit dem Move-Befehl (F7) an eine beliebige Stelle verschoben werden. Das gilt genauso für alle übrigen Texte und alle Symbole. Im Move-Modus kann man mit der linken Maustaste ein beliebig großes Fenster aufziehen und damit ein einzelnes Symbol oder eine ganze Gruppe verschieben.

Mit F4 kann einem Leitungsstück ein besonderer Name zugewiesen werden. In Abb. 6 sind das die Signale A – D, die für die Funktionsprüfung aufschlußreich sind.

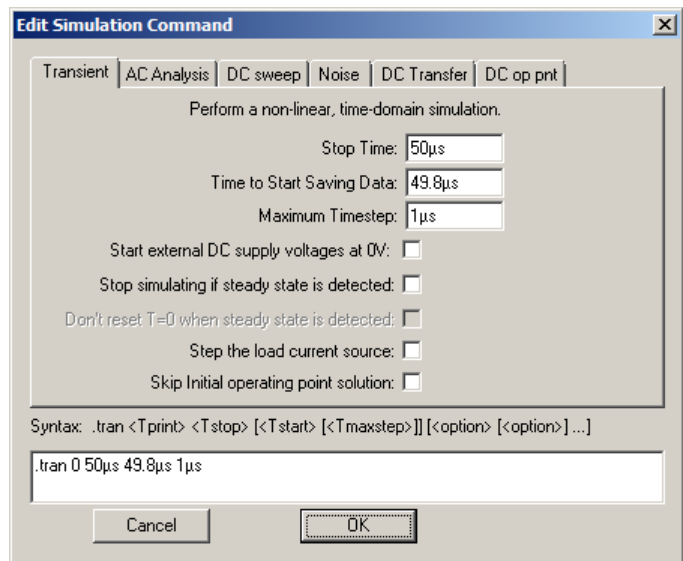


Abb. 5: Auswahl des darzustellenden Zeitfensters

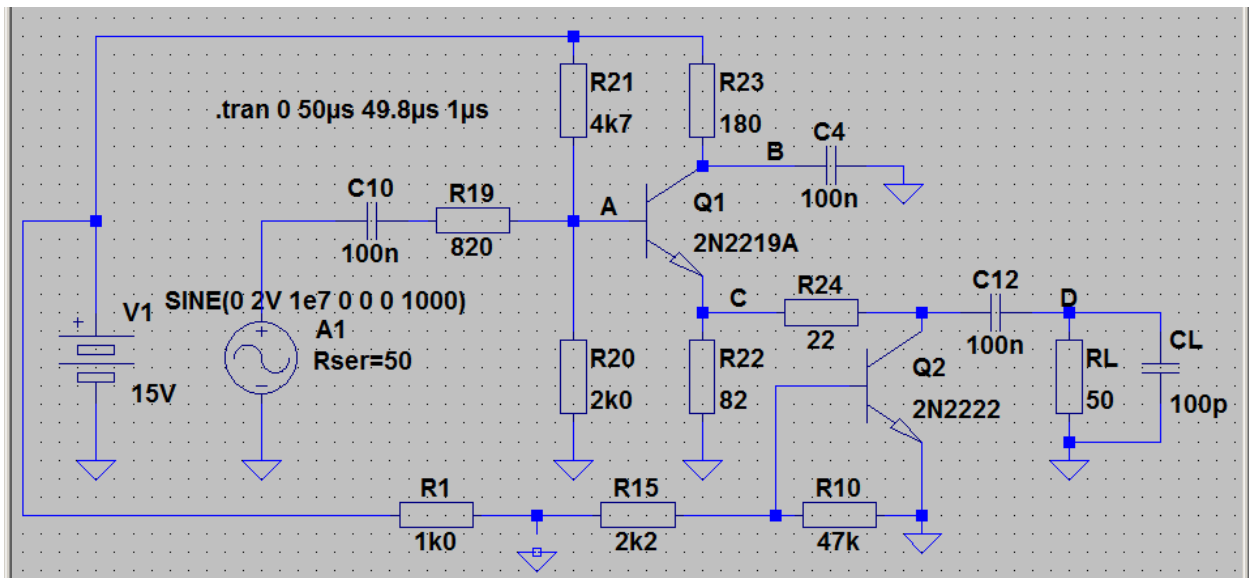


Abb. 6: Der fertige Schaltplan

Klickt man auf „Simulate | Run“, dann öffnet sich ein zweites Fenster zur graphischen Darstellung der Signalverläufe. Die beiden Fenster sind entweder nebeneinander oder übereinander angeordnet. Möchte man die Anordnung anders haben, dann ist im Menü „Simulate | Control Panel | Operation“ die Einstellung unter „Default Window Tile Pattern“ zu ändern. Das aktive Fenster ist durch eine blaue Kopfleiste gekennzeichnet, Befehle sind immer nur für das aktive Fenster gültig.

Ist der Schaltplan aktiv und bringt man den Cursor in die Nähe einer Verbindungslinie, dann verwandelt sich der Pfeil in ein Tastkopfsymbol zur Anzeige von Spannungen und der jeweilige Wert ist in der Fußleiste des Fensters abzulesen. Ein Klick mit der linken Maustaste macht den Signalverlauf im Kurvenfens-

## Simulationsprogramm LTspice

ter sichtbar, der Signalname steht dabei in derselben Farbe ganz oben. RUN ist nach jeder Änderung eines Bauteilwertes zu starten, ein geänderter Zustand wird nicht automatisch erkannt und dargestellt.

Steht der Cursor in der Nähe eines Bauteils, dann ändert er sich in das Symbol einer Stromzange und es wird der Verlauf des Stromes dargestellt, der durch das Bauteil fließt. Drückt man dazu noch die kleine Alt-Taste, dann erscheint ein Thermometer und es wird beim Drücken der linken Maustaste der Verlauf der Leistung aufgezeichnet.

Um die Skalierung der Kurven braucht man sich dabei nicht zu kümmern, denn die wird automatisch angepaßt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, eine Skalierung auch von Hand vorzugeben: Führt man mit dem Cursor auf die Skala und drückt die rechte Maustaste, dann öffnet sich ein Fenster mit einer ganzen Reihe von grafikbezogenen Funktionen. Das Häkchen bei „Autoranging“ ist in diesem Fall zu entfernen, weil sonst beim nächsten RUN-Kommando der alte Maßstab wieder angezeigt wird. Ein Druck auf die linke Maustaste öffnet ein Fensterchen zur Eingabe der gewünschten Werte.

In Abb. 7 gilt die hellgrüne Kurve für das Ausgangssignal des Oszillators A1, die graue zeigt den Verlauf der Leistung an RL. Man erkennt gut die durch das RC-Glied R19/C10 hervorgerufene Phasenverschiebung gegenüber der Spannung am Punkt A (Kurve V[a]) und die nahezu völlig gleiche Form der Leistungskurve in den positiven und negativen Halbwellen von V[d]. Die Kurven A und C haben, abgesehen vom unterschiedlichen Gleichspannungsoffset, exakt denselben Verlauf, Q1 wird also im linearen Bereich betrieben. Die Kurve D hat wegen der RC-Glieder wieder eine ganz geringe Phasenverschiebung gegenüber A und C.

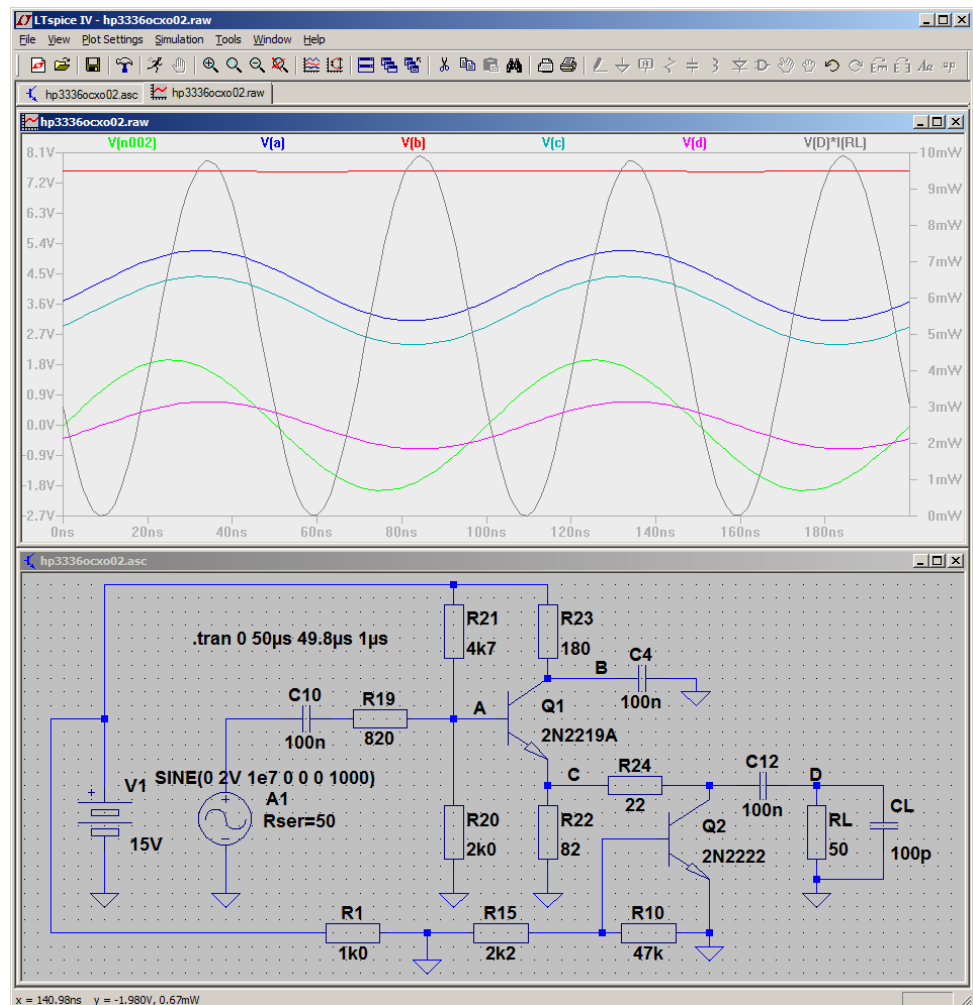


Abb. 7: Simulation einiger Werte

Der geschätzte Leser ist aufgefordert, mit den Bauteilwerten nach Herzenslust zu experimentieren. Auf diese Art erkennt man sehr gut, welchen Einfluß die Änderung eines Bauteils auf das Ausgangssignal hat. Für eine Änderung bieten sich C10, R19 bis R24, C4, C12, RL, CL und nicht zuletzt die Brücke zum Massesymbol an.

Im zweiten Beispiel wird das Programm zur Bauteildimensionierung eines Pulsweitenmodulators verwendet, der bei einem kleinen Gleichstrom-Gebläse die DrehzahlEinstellung ermöglichen soll. Abb. 8 zeigt den Gesamtschaltplan, der untersuchte Teil ist wiederum eingefärbt. Die Abb. 9 ist das mit LTspice-Mitteln erstellte Schaltbild, wobei die positive und negative Spannungsversorgung für den Operationsverstärker diesmal mit einem anderen Symbol gemacht worden ist, das genauso funktioniert.

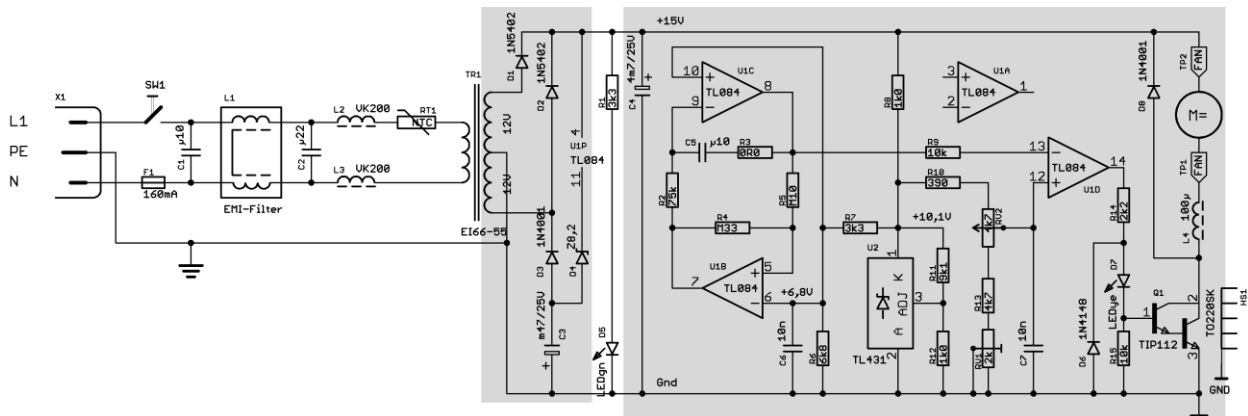


Abb. 8: Beispiel 2, Gesamtschaltbild der Baugruppe Pulsweitenmodulator

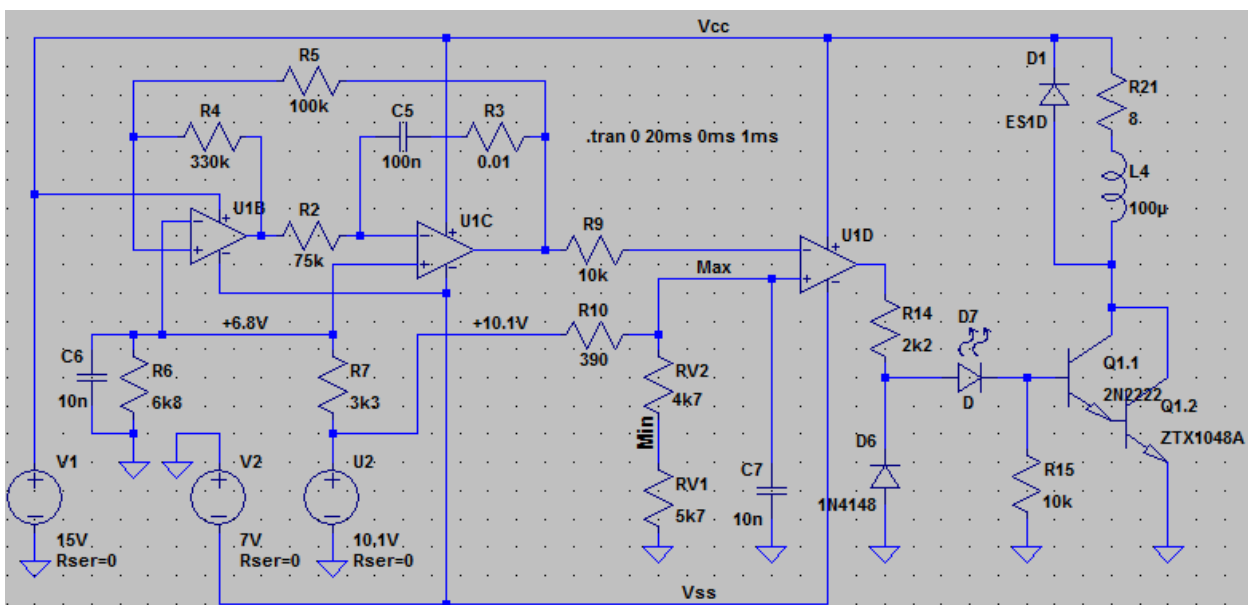


Abb. 9: Fertiger LTspice-Schaltplan mit RV2 in Max-Position

Der Darlington-Transistor Q1 ist durch zwei normale Transistoren nachgebildet, die Werte von R13 und RV1 in Abb. 8 sind bei Abb. 9 in RV1 zusammengefaßt. Das Hauptziel der Simulation war die richtige Funktion des Sägezahn-Oszillators, der von U1B und U1C gebildet wird, sowie passende Widerstandswerte zur Einstellung des Tastverhältnisses (RV1 und RV2) am nicht invertierenden Eingang des Komparators U1D. Der obere und untere Endwert von RV2 wird mit einer entsprechenden Verbindung bei Max oder Min eingestellt. Nach dem Start von RUN verharrt bei diesem Beispiel das Programm in der Berechnungsschleife, ein Druck auf die Esc-Taste bringt das Diagramm auf den Schirm.

Die rote Kurve ist der Sägezahn am invertierenden Eingang von U1D, die graue der Strom durch R21 und die dunkelgrüne die Verlustleistung an Q1. Die an der fallenden Flanke erkennbaren Leistungsspitzen entstehen beim Übergang vom Durchlaß- in den Sperrzustand durch den noch

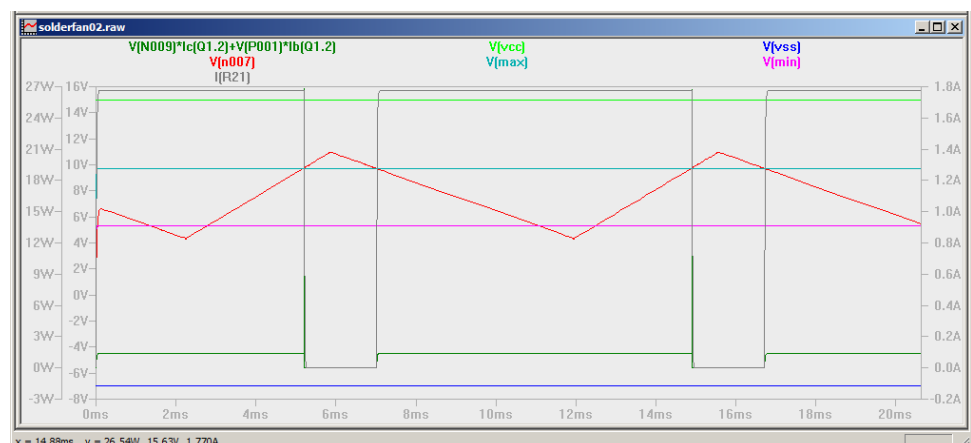


Abb. 10: RV2 in Max-Position, große Pulsbreite

fließenden Strom und die bereits erhebliche Spannung am Transistor während der Sperrverzugszeit (das ist jene Zeit, die ein bipolarer Halbleiter braucht, bis in seiner Sperrschicht alle Ladungsträger ausgeräumt sind und kein Strom mehr fließt).

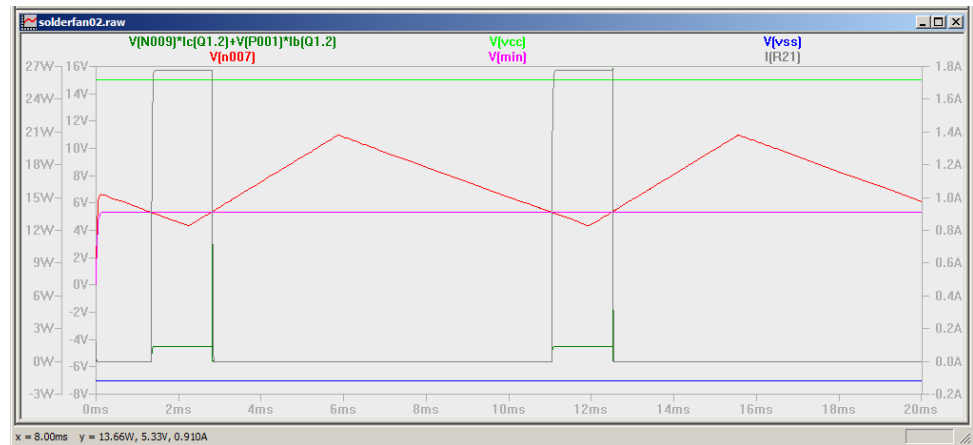


Abb. 11: RV2 in Min-Position, geringe Pulsbreite

Diese Kurve wird in den Abb. 10 und 11 von der Stromkurve auf der fallenden Flanke teilweise überdeckt und ist deswegen nicht zur Gänze sichtbar. Erkennbar ist auch der Einschwingvorgang am Beginn der Zeitskala. Bei der Änderung von Bauteilwerten kann man wiederum den Einfluß auf das Verhalten der Schaltung schön sehen.

Abb. 12 zeigt den ungestörten Verlauf der Verlustleistungskurve. Klickt man bei gedrückter Strg-Taste mit der linken Maustaste auf den in der Kopfzeile stehenden Diagrammtext, dann zeigt ein Fenster die mittlere Verlustleistung an – eine wunderbare Hilfe zur richtigen

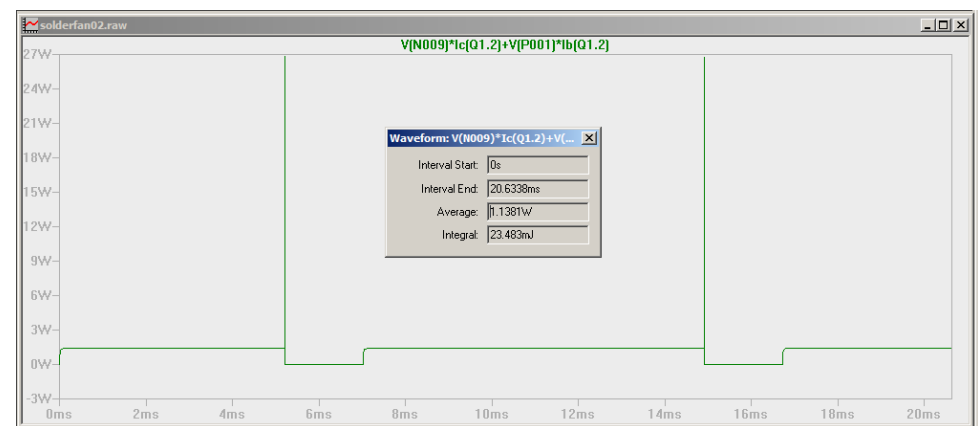


Abb. 12: Tatsächlicher Verlauf der Verlustleistung an Q1, große Pulsbreite

Auslegung des Kühlkörpers. Die Leistungsspitze tritt nur im Mikrosekunden-Bereich auf und ist abhängig von den Eigenschaften des Transistors. Wer will, kann sie durch Ändern der Zeitmaßstabes genauer untersuchen.

Wer sich weiter in das Programm einarbeiten möchte, findet im Verzeichnis PROGRAMME/LTC/LTspiceIV/DOC die Datei „LTscad3.pdf“, die auf über 200 Seiten genaue Auskunft über Möglichkeiten und Anwendung gibt.

OE5EBL hat mich dankenswerter Weise darauf hingewiesen, daß OM Gunthard Kraus, DG8GB, der ein Meister der Schaltungssimulation ist, in den UKW-BERICHTEN dazu eine Reihe von Einführungsbeiträgen verfaßt hat:

- Heft 2/2009, S62-83:  
"Möglichkeiten und Grenzen der Schaltungssimulation für Funkamateure", ein Vortrag von der UKW-Tagung in Bensheim 2009, der unter anderem auch LTSpice IV behandelt. In nachfolgenden Heften hat OM Gunthard exzellente Beiträge zur Einführung in LTSpice IV unter Angabe der dazu notwendigen Arbeitsschritte veröffentlicht:
- Heft 4/2009, S195-213:  
"Simulation von HF-Schaltungen mit LTSpice IV, Teil 1"
- Heft 1/2010, S15-29 und S58-62:  
"Signal-Plaudereien, Teil 1"

## Simulationsprogramm LTspice

- Heft 2/2010, S75-85:  
"Signal-Plaudereien, Teil 2" sowie  
S111-123:  
"Simulation von HF-Schaltungen mit LTSpice IV, Teil 2"
- Heft 3/2010, S131-150:  
"Simulation von HF-Schaltungen mit LTSpice IV, Teil 3" und  
S175:  
Hinweis zu 2/2010, Seite ab 111:  
"Stabilitäts-Kontrolle"

## Zusammenfassung

Dieses Programm ist ein ausgezeichnetes Hilfsmittel zur Dimensionierung von Schaltungen aller Art und nicht nur auf die Analogtechnik beschränkt, weil in der Bibliothek ebenso digitale Bauteile enthalten sind. Der Beitrag soll zeigen, daß auf einfache Weise sehr wirklichkeitsgetreue Simulationen durchgeführt werden können und er erhebt keinerlei Anspruch auf die vollständige Erläuterung der vom Programm gebotenen Möglichkeiten. Wahrscheinlich wird hier gerade einmal die Oberfläche ein wenig angekratzt ...

Helmut, OE5GPL

## Verweise und Quellen:

- [1] Linear Technology Corporation, Design Simulation and Device Models, LTspice IV:  
<http://www.linear.com/designtools/software/>
- [2] OAFV-HomePage, TECHNIK / SOFTWARE / HELFER, Mit LTspice Analogschaltungen prüfen:  
<http://www.oe5.oevsv.at>