

8 Rechnergestützte Simulation

8.1 Netzwerkanalyse

Bei der Berechnung einer elektrischen Schaltung mit dem Maschen- und dem Knotensatz ist die Zahl der Gleichungen umso größer, je mehr Bauelemente die Schaltung enthält.

Wenn die Elemente der Schaltung linear sind, dann entsteht ein lineares Gleichungssystem, welches sich mit geeigneten Verfahren lösen lässt; lineare Elemente sind z. B. OHMSche Widerstände oder Kondensatoren mit konstanter Kapazität.

Enthält die Schaltung jedoch Bauelemente mit nichtlinearer I - U -Kennlinie wie z. B. Dioden oder Transistoren, so wird der Bearbeitungsaufwand bereits bei wenigen Bauelementen sehr hoch und es empfiehlt sich eine rechnergestützte Simulation der Schaltung.

Wir befassen uns hier lediglich mit der **Netzwerkanalyse** (*network analysis*). Unter diesem Begriff versteht man die Berechnung der Ströme und Spannungen einer Schaltung, deren Struktur und Bauelemente gegeben sind.

Das bedeutendste Programm für die Netzwerkanalyse ist **SPICE** (*simulation program with integrated circuit emphasis*), das um 1973 an der Universität Berkeley, Ca. (Kalifornien) entwickelt wurde. Anschließend fügte eine Firma die Programme **Schematics** für die grafische Eingabe und **Probe** für die Ausgabe auf PCs hinzu. Dadurch entstand ein Programmpaket, das **PSpice** genannt wurde.

Seit dem Jahr 2018 ist PSpice nicht mehr erhältlich. Deshalb verwenden wir im Folgenden das Programm **Micro-Cap**, das von der Firma Spectrum Software in Sunnyvale, California entwickelt wurde und zur Zeit (2019) in der Version 12 vorliegt. Von diesem Programm gibt es eine kostenlose Demoversion mit eingeschränktem Funktionsumfang.

In Deutschland wird Micro-Cap von der Firma gsh-Systemelectronik GmbH in München vertrieben. Unter gsh-system.de kann man das kostenlose Demoprogramm herunterladen, das für die im Folgenden beschriebenen Beispiele ausreicht.

In diesem Lehrbuch können wir nur eine kurze Einführung geben. Eine ausführliche Anleitung bietet das Buch *Simulation elektronischer Schaltungen mit MICRO-CAP* von Joachim Vester, das im Verlag Springer Vieweg erschienen ist.

8.2 Schaltplan

Zu Beginn der Netzwerkanalyse mit Micro-Cap muss die Schaltung gezeichnet werden. Wenn das Programm durch Klicken auf das Icon *Micro-Cap 12 Evaluation* gestartet wird, erscheint sofort die Arbeitsfläche für die Zeichnungseingabe und man kann mit einem Widerstand beginnen. Jeder Widerstand lässt sich mit der Maus an die gewünschte Position bewegen; soll er dort verbleiben, so legt man ihn mit einem Klick auf die linke Maustaste ab. Danach öffnet sich ein Fenster, in dem der aktuelle Wert, z. B. 1k, eingetragen werden kann. Damit ist natürlich der Wert 1 k Ω gemeint, denn Spice kennt keine griechischen Buchstaben.

Da Spice nicht zwischen Klein- und Großbuchstaben unterscheidet, ist 1m = 1M und das bedeutet Milli. Für 1 M Ω muss 1Meg oder 1MEG oder 1meg geschrieben werden (ohne Zwischenraum zwischen Zahl und Buchstaben).

Die Widerstände werden vom Programm aufsteigend durchnummeriert.

Zunächst erscheint jeder Widerstand senkrecht. Soll er jedoch waagrecht liegen, so kann er mit den Tasten (Strg) und (R) um 90° gedreht werden. Sind genügend Widerstände platziert, so kann man mit der Taste (Esc) den Vorgang abschließen.

Jede Schaltung benötigt auch mindestens eine Quelle. Die Quellen findet man entweder oben in der Symbolleiste oder links unter *waveform sources*: Die Spannungsquelle hat den Kennbuchstaben V und die Stromquelle den Kennbuchstaben I. Eine Auswahl dieser Kennbuchstaben ist in der Tabelle 8.1 aufgelistet.

Dann muss einem Punkt der Schaltung das Potenzial 0 V zugewiesen werden; dies geschieht dadurch, dass das Schaltzeichen *Ground*, welches man im Tableau oben oder links unter *connectors* findet, an geeigneter Stelle platziert wird.

Tabelle 8.1 Kennbuchstaben von Spice (Micro-Cap)

C Kondensator	Q Bipolartransistor
D Diode	R Widerstand
I Stromquelle	SW Schalter
J Sperrschicht-FET	T Leitung
L Induktivität	V Spannungsquelle
M MOSFET	X Operationsverstärker

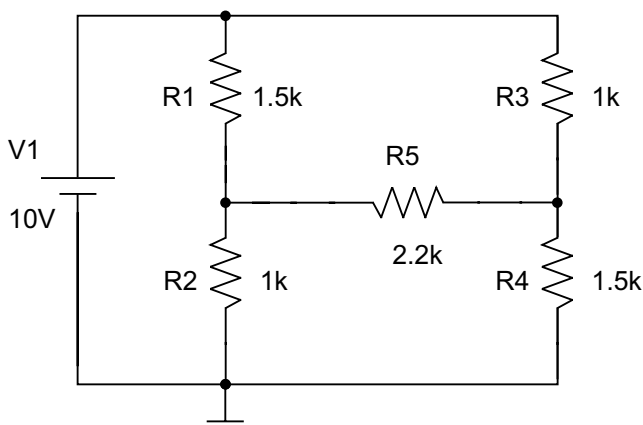
Schließlich müssen die „Bauteile“ durch „Drähte“ verbunden werden; dazu wird in der Symbolleiste das Icon *Wire Mode* angeklickt und dann können die Leitungen mit der Maus gezogen werden. Nach Abschluss der Zeichenarbeit wird die Schaltung mit einem passenden Namen abgespeichert.

8.3 Gleichanalyse

In Spice gibt es drei Analysearten. Wir beginnen mit der **Gleichanalyse**, bei der nur Gleichspannungen und Gleichströme vorliegen. Dazu klickt man im Menü *Analysis* die Zeile *DC...* an, wonach Micro-Cap ein großes Fenster mit der Überschrift *DC Analysis Limits* öffnet, in welchem die geeigneten Werte eingetragen werden.

Beispiel 8.1

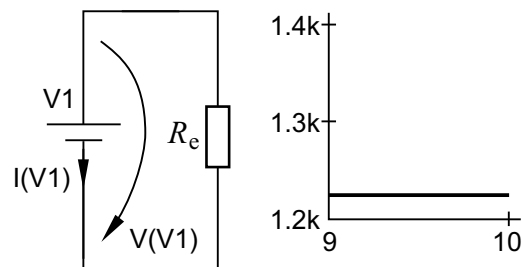
Wir wollen den Widerstand R_e der Schaltung des Beispiels 2.11 für $R_1 = R_4 = 1,5 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ sowie $R_5 = 2,2 \text{ k}\Omega$ berechnen. Zunächst zeichnen wir die Schaltung und tragen die Werte der Bauelemente ein.



Nach dem Klick auf *Analysis* öffnet sich das Fenster *DC Analysis Limits*, in dem wir als *Variable 1* die Bezeichnung V1 eintragen. Dann wählen wir bei

Method die Bezeichnung *Linear* und tragen bei *Range* die Werte 10,9,0.5 ein: Die Variable V1, also die Spannung der Spannungsquelle, wird zwischen den Werten 9 V und 10 V in Schritten von 0,5 V geändert.

Bei *X Expression* steht bereits DCINPUT1. Da am Widerstand R_e der Strom $I(V1)$ der Quelle entgegen dem Bezugssinn der Spannung $V(V1)$ fließt, tragen wir bei *Y Expression* die Bezeichnung $V(V1)/(-I(V1))$ ein, wählen bei *X Range* 10,9 und bei *Y Range* 1.4k,1.2k und klicken *Run* an.



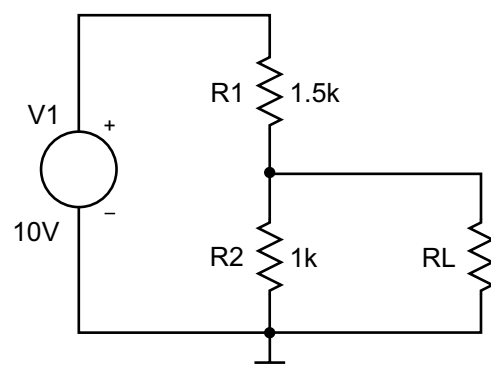
Mithilfe der Maus lesen wir in der Grafik den Wert $R_e = 1,232 \text{ k}\Omega$ ab.

8.4 Variation von Bauelement-Werten

Bei Micro-Cap ist es ohne weiteres möglich, anstelle einer Quellengröße einen anderen Parameter zu verändern.

Beispiel 8.2

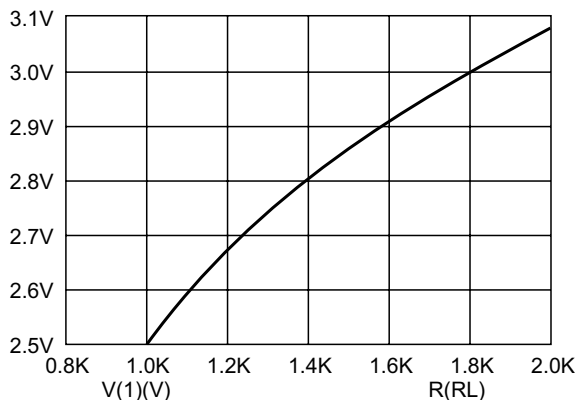
Wir wollen einen belasteten Spannungsteiler aus $R_1 = 1,5 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ an $U_1 = 10 \text{ V}$ untersuchen, dessen Lastwiderstand R_L den Bereich von $1 \text{ k}\Omega$ bis $2 \text{ k}\Omega$ durchläuft. Die Spannung am Lastwiderstand R_L (Bild 7.3) soll als Funktion des Widerstandswertes R_L aufgetragen werden.



Zunächst zeichnen wir die Schaltung und weisen der Quelle V1 den Wert 10 V zu.

Wir stellen nach einem Klick auf *Node Numbers* fest, dass der obere Anschluss von RV die Knotennummer 1 erhält. Nach dem Klick auf *Analysis* und *DC...* tragen wir im Fenster *DC Analysis Limits* als *Variable 1* den Namen RV ein und wählen bei *Range* die Werte 2k,1k,10.

Dann tragen wir bei *Y Expression* die Bezeichnung V(1) ein. Bei *X Range* wählen wir 2k,0.8k,0.2k und bei *Y Range* die Werte 3.1,2.5,0.2. Nach dem Klick auf *Run* erhalten wir das folgende Ergebnis.



8.5 Transientanalyse

Bei der **Transientanalyse** (*transient analysis*) wird ein Schaltvorgang berechnet. Diese Analyseart ist das „Herzstück“ von Spice.

Die Analyse selbst läuft im **Zeitbereich** (*time domain*) ab, wobei für jeden Zeitpunkt ein System von Differenzialgleichungen gelöst werden muss. Die Autoren von Spice verwendeten hierfür ein neu entwickeltes Verfahren, das mittlerweile als BDF-Verfahren in die Mathematik-Literatur eingegangen ist. Im Gegensatz zu früher verwendeten Verfahren zur Lösung von Differenzialgleichungssystemen ist das BDF-Verfahren stabil, denn es neigt auch bei ungünstig gewählten Zeitintervallen nicht zu Schwingungen.

Die Vorteile dieses Verfahrens haben entscheidend zum Erfolg von Spice beigetragen.

Ist die Schaltung gezeichnet, so kann bei einem Grundeintor *C* bzw. *L* eine **Anfangsbedingung** (*initial condition*, IC) eingetragen werden; beim Grundeintor *C* handelt es sich um die Ladung *Q*, die zum Zeitpunkt $t=0$ vorliegt, und beim Grundeintor

L um den Fluss Φ , der zum Zeitpunkt $t=0$ fließt. Im Tableau des jeweiligen Elements kann entweder beim Grundeintor *C* unter CHARGE oder beim Grundeintor *L* unter FLUX ein Wert eingetragen werden. Ist kein Wert eingetragen, so nimmt Micro-Cap automatisch den Wert 0 an.

Mit der Quelle *Voltage Source* lässt sich eine Gleichspannung simulieren, die eingeschaltet und dann wieder ausgeschaltet wird. Folgende Größen können bei dieser Quelle eingestellt werden:

- V1: Spannung während der Pausen
- V2: Pulshöhe
- TD: Verzögerungszeit (*time delay*)
- TR: Anstiegszeit (*rise time*)
- TF: Abfallzeit (*fall time*)
- PW: Pulsweite (*pulse width*)
- PER: Periodendauer (*period*)

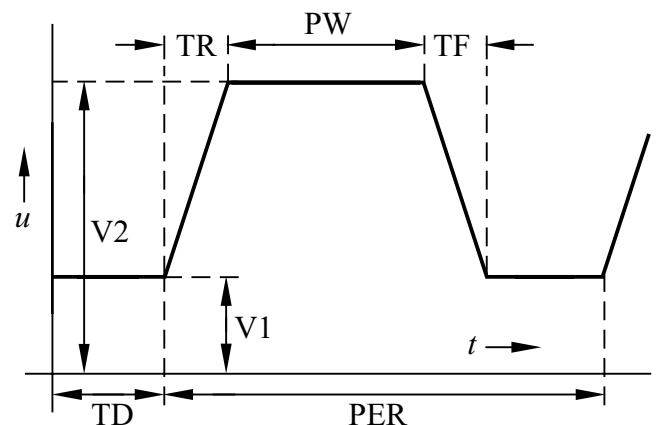


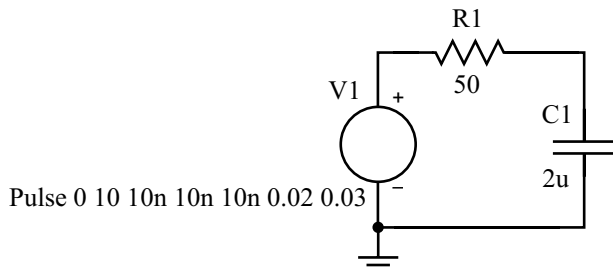
Bild 8.1 Zeitdiagramm der Pulsquelle

Die Anstiegszeit TR und die Abfallzeit TF können beliebig klein gewählt werden, aber diese Werte dürfen nicht null sein. Im Tableau der Quelle werden außerdem die Attribute DC und AC angeboten; für eine Pulsquelle werden hierbei zweckmäßig die Werte 0 eingetragen.

Beispiel 8.3

Wir wollen den im Bild 4.10 dargestellten und im Beispiel 4.4 beschriebenen Schaltvorgang mithilfe von Micro-Cap berechnen.

In der Schaltung mit der Pulsquelle tragen wir die Pulshöhe 10 V ein und stellen nach einem Klick auf das Icon (*Node Numbers*) fest, dass der Knoten über dem Kondensator die Nummer 2 erhält.



Nun klicken wir im Menü auf (*Analysis*) und dann auf (*Transient*). Es öffnet sich ein Fenster, in dem wir folgende Werte eintragen:

Maximum Run Time: 1m

X Expression: T

Y Expression: V(2)

X Range: 0.4m,0

Y Range: 10,0

Schließlich klicken wir auf *Run* und erhalten nach kurzer Rechenzeit das Ergebnis.

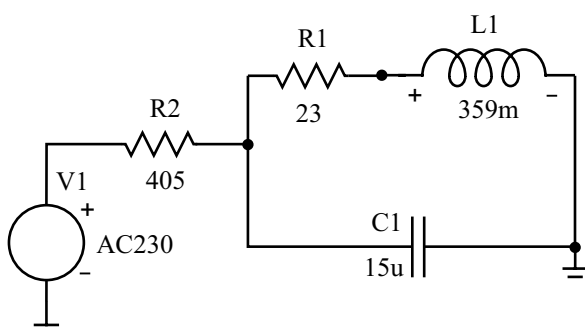
8.6 Sinusanalyse

Als weitere Analyseart kennt Spice die **Sinusanalyse** (*AC Analysis*), bei der ein Frequenzbereich durchlaufen wird. Dabei wendet Spice die komplexe Rechnung an und deshalb sind nur Bauelemente mit linearer Kennlinie zulässig.

Enthält die Schaltung Bauelemente mit nichtlinearer Kennlinie, so werden diese in der Umgebung des Arbeitspunktes linearisiert. Man spricht dabei von einer **Kleinsignalanalyse**, bei der die Spannungen und Ströme bestimmte Maximalwerte nicht überschreiten dürfen.

Beispiel 8.4

Wir wollen die Ergebnisse des Beispiels 6.14 mit Micro-Cap überprüfen und zeichnen die Schaltung mit der Voltage Source, deren Spannung wir auf 230 V einstellen.



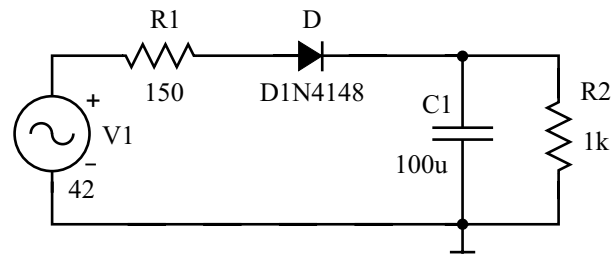
Wir stellen nach einem Klick auf *Node Numbers* fest, dass der Kondensator am Knoten mit der Nummer 3 liegt, und tragen bei *Y Expression* die Bezeichnung V(3) ein. Bei *Frequency Range* und *X Range* wählen wir 51,49 und bei *Y Range* die Werte 110,90. Nach dem Klick auf *Run* lesen wir für 50 Hz den Wert 100,055 V ab.

8.7 Großsignalanalyse

Enthält eine Schaltung ein nichtlineares Bauelement und soll ein größerer Bereich der *I-U*-Kennlinie durchlaufen werden, so handelt es sich um eine **Großsignalanalyse**, die von Spice nur als Transientanalyse bearbeitet werden kann.

Beispiel 8.5

Wir wollen den Maximal- und den Minimalwert der Verbraucherspannung der Einpulschaltung im eingeschwungenen Zustand berechnen. Bei der Quelle *Sine Source* stellen wir die Amplitude 42 V und die Frequenz 50 Hz ein.



Für die Transientanalyse wählen wir *Maximum Run Time* 0.4 und *Output Start Time* 0.36.

Im Plot für das Ergebnis lesen wir die Spannungswerte $u_{max} = 25,1$ V und $u_{min} = 21,6$ V ab.

