

# ANALOGSIMULATION MIT PSPICE

Klaus P. Eckl

PCN-DSK 139, 149; PCN-LIT 12

## 1. Allgemeines

Simulieren von Schaltungen heißt messen. Messen bedeutet bekannte Gegebenheiten überprüfen. Um richtig messen zu können, muß man die Eigenschaften des Prüflings gut kennen, auf Grund des erwarteten Analyseergebnisses die richtigen Methoden zu wählen. Wahlloses Probieren führt in beiden Disziplinen zu Mißerfolg. Die Interpretation des Ergebnisses auf Basis der gewählten Methoden erfordert großes Wissen.

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) ist eine Public Domain Software, weil sie mit Unterstützung öffentlicher Mittel an der University of California ursprünglich für Forschungszwecke entwickelt, aber sehr bald zu einem Industriestandard wurde. Mit Spice lassen sich beliebige Modelle wie auch z.B. mechanische Aufbauten simulieren. Von Softwareherstellern wurde das Kernprogramm nun durch Benutzeroberflächen und Modellbibliotheken erweitert. Die zwei bekanntesten Simulationsprogramme sind PSpice von MicroSim und Micro-Cap von Spectrum Software. Neben den Kosten für Schnittstellen zu CAD Programmen oder graphischen Eingabemöglichkeiten oder Postprozessoren zur graphischen Ergebnisdarstellung, schlagen sich der große Aufwand für Bauteilbibliotheken im hohen Anschaffungspreis der Software nieder.

Spice berechnet die Netzwerke mit der Methode der Knotenpotentialanalyse. Ein Netzwerk mit m Knoten (nodes) wird auf m-1 Knoten reduziert, weil einer zum Bezugspotential (Masse, ground) erklärt wird. Die restlichen Knoten werden numeriert (z.B. von 1 - n) und von diesen führen zum Bezugspotential die Potentialdifferenzen (Knotenspannungen) V1 - Vn. Für die entstehenden Maschen lassen sich mit Hilfe der Kirchhoffschen Regeln das folgende Gleichungssystem aufstellen.

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{pmatrix}$$

Dabei sind die Ströme I1 - In jeweils die Summe aller Ströme, die in die Knoten 1 - n fließen. (Ströme, die aus dem Knoten fließen werden negativ gezählt.) V1 - Vn sind die oben genannten Knotenspannungen. Die Yik sind die Leitwerte der Bauelemente zwischen den Knoten. Dabei sind die Yii gleich der Summe aller Leitwerte, welche an dem jeweiligen Knoten i angeschlossen sind. Yik ist der Leitwert zwischen dem Knoten i und k und er ist mit negativem Vorzeichen zu versehen, wenn man beim Durchlaufen der Masche von i nach k dieselbe Richtung eingeschlagen hat, wie die Zählpfeilrichtung von Vk zeigt.

Für das im **Bild 1** gezeigte Beispiel können die Gleichungen wie anschließend gezeigt lauten.

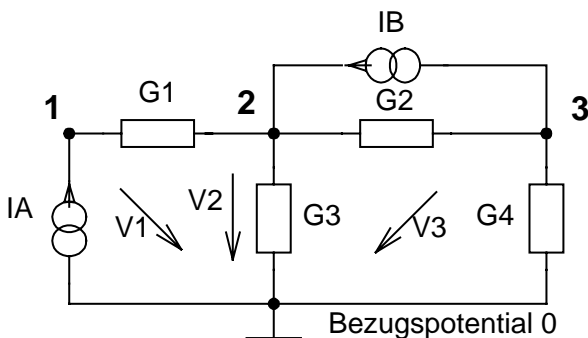


Abbildung 1: Netzwerk mit 4 Knoten

$$\begin{pmatrix} G_1 & -G_1 & 0 \\ -G_1 & G_1 + G_2 + G_3 & -G_2 \\ 0 & -G_2 & G_2 + G_4 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ -I_B \end{pmatrix}$$

Dabei ist zu beachten, daß Spice nur mit idealen Bauteilen rechnen kann und daher folgende Einschränkungen gelten. Spice führt im ersten Schritt eine DC Analyse durch und sucht für jeden Knoten einen Gleichstromweg zum Bezugspotential. Kondensatoren riegeln Gleichstrom jedoch ab und die Serienschaltung von zwei idealen Kondensatoren führt zu einem undefinierten Potential im Verbindungspunkt (floating node). Bei realen Kondensatoren fließt ein sehr geringer Leckstrom und diesen kann man durch Parallelschalten von großen Widerständen (GΩ) nachbilden. Ein ähnliches Problem ergibt sich bei der Parallelschaltung von zwei idealen Spulen. Flußänderungen erzeugen Induktionsspannungen und diese werden als Spannungsquelle nachgebildet. Zwei Spannungsquellen mit Innenwiderstand 0 darf man jedoch nicht parallel schalten. In diesem Fall sind zu den idealen Spulen Serienwiderstände zu setzen. Für Gleichstrom wird die ideale Spule entsprechend dem Innenwiderstand einer Spannungsquelle ein Kurzschluß.

## 2. Programmversionen

Am TGM stehen zwei Versionen zur Verfügung. Eine Evaluationversion von PSpice 6 für Windows, welche den Vorteil der graphischen Schaltungseingabe, aber nur eine sehr eingeschränkte Bauteilbibliothek und geringe Anzahl an Knoten zuläßt, und eine Vollversion von PSpice 5 für DOS, bei welcher man die Schaltung textuell mit Hilfe eines Editors eingeben muß. Die Vollversion besitzt auch eine Shell, kann aber wegen des benötigten DOS-Extenders nicht unter Windows gestartet werden. Für die Eingabe von Stimuli (Eingangstestspannungen unterschiedlichster Kurvenform) stehen ebenso wie für die Einstellung der Simulationsparameter Menüs bez. Programme in beiden Versionen zur Verfügung. Die Kenntnis der Bauteile, Funktionen oder Parameter ist bei beiden Versionen erforderlich.

## 3. Komponenten, Parameter und Funktionen

Im xxx.CIR File wird die Schaltung, welche man simulieren will, beschrieben. Jedes Element steht mit seinem Namen in einer neuen Zeile und der erste Buchstabe ist signifikant für das Bauteil. (Siehe **Tabelle 1**). Durch Leerzeichen getrennt folgen nun die Knotennamen (Nummern)(für einen Widerstand zwei, für Transistoren drei usw.) und wenn erforderlich, als Zusatzangabe der Bauteilwert. Eingegeben kann mit Kommastellen oder den Zeichen der technischen Notation werden. (siehe **Tabelle 2**).

Tabelle 1: Bauteilnamen in PSpice		
Name:	type	Bauteil:
Vxxx	VS	Spannungsquelle
Ixxx	CS	Stromquelle
Exxx	VCVS	spannungsgesteuerte Spannungsquelle
Fxxx	CCCS	stromgesteuerte Stromquelle
Gxxx	VCCS	spannungsgesteuerte Stromquelle
Hxxx	CCVS	stromgesteuerte Spannungsquelle
Sxxx	VSWITCH	spannungsgesteuerter Schalter
Wxxx	ISWITCH	stromgesteuerter Schalter
Rxxx	RES	Ohmscher Widerstand
Cxxx	CAP	Kondensator
Lxxx	IND	Induktivität
Dxxx	D	Diode
Qxxx	NPN	NPN Transistor
Qxxx	PNP	PNP Transistor
Qxxx	LPNP	lateral PNP Transistor
Jxxx	NJF	n Kanal J-FET
Jxxx	PJF	p Kanal J-FET
Mxxx	NMOS	N Kanal MOS FET

Mxxx	PMOS	P Kanal MOS FET
Kxxx	CORE	nichtlinearer magnetischer Kreis
Bxxx	GASFET	N Kanal GaAs MESFET
Nxxx	DINPUT	digitaler Eingang (von digitalem Ausgang gesteuert)
Oxxx	DOUTPUT	digitaler Ausgang (von digitalem Eingang gesteuert)
Uxxx	UIO	digitales I / O Modell
Uxxx	UGATE	Standard Gatter
Uxxx	UTGATE	Tri state Gatter
Uxxx	UEFF	Flankengesteuertes Flip Flop
Uxxx	UGFF	Zustandsgesteuertes Flip Flop
Uxxx	UWDTH	Pulsbreitentester
Uxxx	USUHD	setup und hold Prüfer
Uxxx	UDLY	digitale Verzögerungsleitung
Uxxx	UADC	n bit DAC
Uxxx	UDAC	n Bit DAC
Xxxx		Subcircuits wie OP, 555 timer etc.

Wie in den folgenden Beispielen ersichtlich muß jedes Design eine Titelzeile erhalten. Weitere Kommentarzeilen müssen mit einem \* beginnen bez. in einer Eingabezeile trennt der „ ; “.

Symbol	Faktor	Symbol	Faktor		
f	F	10-15	m	M	10-3
p	P	10-12	k	K	103
n	N	10-9	meg	MEG	106
u	U	10-6	g	G	109
mil	MIL	25.4*10-6	t	T	1012

In Spice 6 erfolgt die Schaltungseingabe graphisch. Dabei wird automatisch ein Referenzdesignator (z.B. R1) und für Bauteile ein Defaultwert vergeben. Ebenso werden die Knoten mit Nummern versehen. Mit einem Doppelklick der Maus auf solche Werte wird ein Fenster geöffnet und man kann die Werte verändern. Um an bestimmten Knoten messen zu können, ist es vorteilhaft diese zu benennen (einen Label zu vergeben). Mit einem Doppelklick auf die Leitung und benennt man diese (z.B. IN oder OUT). Dies erleichtert beim Arbeiten mit dem Postprozessor zur graphischen Darstellung das Auffinden von Meßpunkten.

Spice 6 ist ein Programm, das voll die Oberfläche von Windows benutzt und über Pull Down Menüs ausgeführt werden kann.



**Abbildung 2:** Menüleiste von PSpice 6

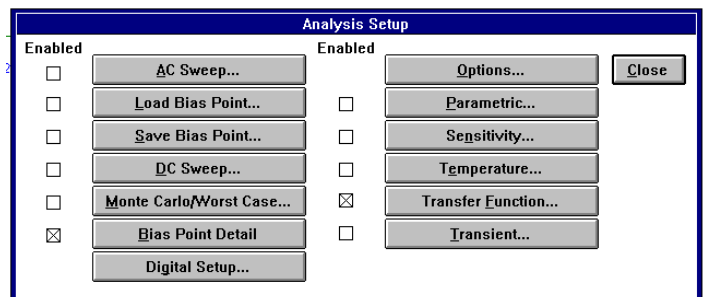
**Abbildung 2** zeigt die Hauptgruppen der Befehle. Im Rollbalken File finden wir das für Windows übliche File handling, Ausdrucken etc., sowie auch die Möglichkeiten zum Editieren von Bauteilbibliotheken. Das Edit Menü erlaubt Ausschneiden, Kopieren, Rotieren sowie auch das Editieren von Stimuli und Modellen. Im Draw Block finden sich alle Befehle zum Erstellen eines Schaltbildes (Schematic). Navigate wird von der Evaluationsversion kaum unterstützt und würde das Erstellen von Multisheet und Hierarchischen Schaltungen erlauben. Die Befehle von View enthalten alle wichtigen Zoomfunktionen. Im Balken Options kann man die Zeichenhilfen wie Gridgröße, Fangbereich, Autonumerierung der Bauteile, den Bibliothekseditor etc. einstellen bez. aktivieren. Der Rollbalken Analysis enthält die wichtigsten Konfigurationsdaten und Steuerbefehle für den Simulator und wird noch gesondert ausführlich behandelt. In der Box Tools finden sich einige Zusatzwerkzeuge wie Netzliste erstellen, Netzlistenbrowser oder Erstellen von Subcircuits.

Beim Erstellen eines Schematic setzt man zuerst alle Bauelemente. Dazu wählt man aus dem Pull Down Menü Draw den Button Get New Part. Über einen Browser (Zusatzfenster mit Suchfunktion) kann man aus den Bauteilbibliotheken das gewünschte Symbol finden und mit der Maus plazieren. Mit Hilfe der weiteren Befehle von Draw und Edit kann man verdrahten, beschriften, verändern usw. Bauteilwerte, Referenzdesignatoren oder Labels kann man durch Doppelklick der Maus in ein Editierfenster holen und dort die meist gegebenen Defaultwert ausbessern. Die meisten Befehle des Schematiceditors lassen sich auch über Hot Keys aufrufen. Die wichtigsten sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Ctrl S	File Save	Ctrl P	Place Part
Ctrl C	Kopierenanwahl	Ctrl R	Rotieren 90°
Ctrl F	Spiegeln	Ctrl S	File Save
Ctrl G	Get New Part	Ctrl T	Draw Text
Ctrl I	Zoom In	Ctrl U	Undelete
Ctrl L	Redraw	Ctrl V	Einfügen
Ctrl M	Spannungs-Level	Ctrl W	Verdrahten
Ctrl N	Fit	Ctrl X	Ausschneiden
Ctrl O	Zoom Out	Space	Wiederholfunktion

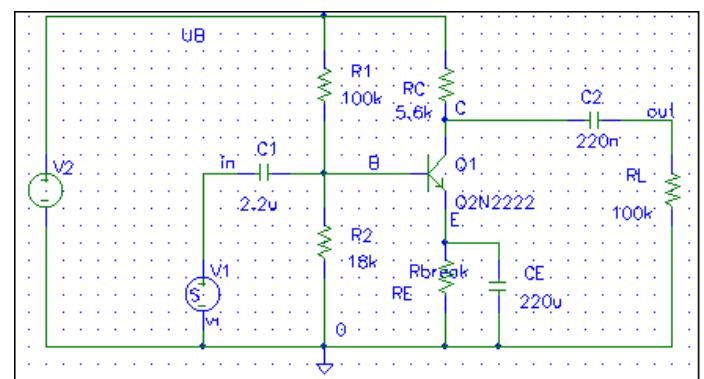
Wenn man als Eingangssignal einen Stimulus (Strom oder Spannung mit bestimmter Kurvenform) als Symbol wählt und zur Eingabe von Werten auf das Symbol den Doppelklick setzt, wird automatisch ein Stimuluseditor aufgerufen, welcher nach Eingabe der Werte das Signal auch graphisch in einem Window darstellt. Stimuli werden in separaten Files abgelegt und beim Aufruf des Simulators in das \*.CIR File automatisch inkludiert.

Mit der Funktionstaste F11 oder Button Analysis/Simulate kann der Simulator gestartet werden. Dabei werden die beiden Programme Netlist (Netzliste aus dem Schematic erstellen) und Rule Check (Suche nach Verdrahtungsfehlern wie offene Knoten etc.) automatisch aufgerufen. Bevor man den Simulator aufruft, sollte man jedoch den Button Setup anwählen, um die Methoden und Parameter zu setzen. Es öffnet sich das Window von **Abbildung 3:**



**Abbildung 3:** Analysis Setup Window

Für jeden aktivierten (Enabled) Button wird in das Simulationsfile (\*.CIR) ein Statement (Anweisung) als eine neue Zeile eingefügt. Den Statements muß ein „ . “ vorgesetzt werden. So muß das \*. CIR File mit .END abgeschlossen werden (macht Spice 6 automatisch). Das Statement .OP setzt Spice 6 auch immer und weist das System an, eine Gleichstromanalyse zu erstellen. Dabei werden Kondensatoren wie Unterbrechungen und Spulen wie Kurzschlüsse behandelt. Die errechneten Potentiale stellen die Arbeitspunkte des Netzwerkes für allfällige Simulationen mit Kleinsignalparametern dar. Die errechneten Simulationsergebnisse werden im \*.OUT File ausgegeben und können mit jedem Texteditor gelesen werden. Mit Bias Point Detail Enabled werden diese Werte im \*.OUT File aufgenommen. So kann man z.B. die Arbeitspunkte von Transistoren kontrollieren. In der Folge wollen wir Simulationen mit der Schaltung von **Abbildung 4** durchführen. Die Simulationsergebnisse sind teilweise im File xxx.OUT zu finden oder können mit Hilfe des Postprozessors PROBE graphisch dargestellt werden. Auf Seite 7 ist die Ausgabe der DC Werte im \*.OUT File wiedergegeben.



**Abbildung 4:** Schematic eines einstufigen Transistorverstärkers

Einige Leitungen wurden mit Labels (anklicken der Leitung mit der Maus) versehen und neben den in Klammern gesetzten Namen stehen die Gleichspannungswerte gegen Masse gemessen.

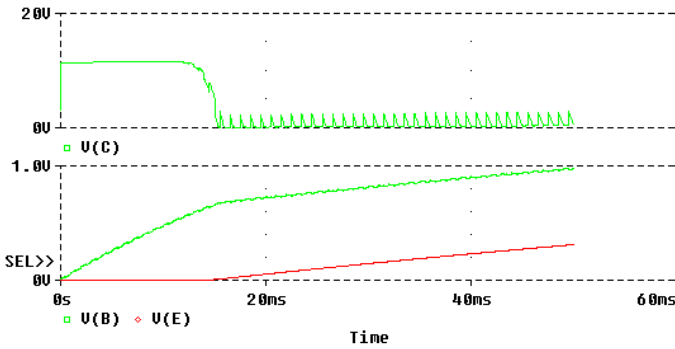


Abbildung 5: Transientenanalyse des einstufigen Transistorverstärkers mit BIAS Berechnung

Als Analyseart wurde im Setup Window der Button „Transient“ ausgewählt. In den freigegebenen Datenfenstern wurden Simulationszeit, die Simulationsschritte und Printschritte auf ca. 1/500 der Zeit gestellt. Weiters wurde die Option „Use init. Conditions“ gewählt.

Nach der Simulation wird der Postprozessor automatisch gestartet. Das leere Plotfenster kann mit Hilfe der Befehle der Rollbalken „Trace“ und „Plot“ mit Diagrammen mit linearen und logarithmischen Achsen mit einem oder mehreren Kurvenzügen gefüllt werden. Zur Vorbereitung wurde die Quelle VStim durch Doppelklick der Maus zum Leben erweckt. Automatisch wird ein Stimuleditor aufgerufen, der die Konstruktion von beliebigen Stimuli erlaubt. Eingegeben wurde eine Rechteckspannung. Das Simulationsergebnis des gut dimensionierten Verstärkers, zeigt keine vertrautes Ausgangssignal. Bei der Transientenanalyse mit Übernahme der Initialwerte sind alle Kondensatoren ungeladen und die Spulen stromlos. Spice errechnet wieder schrittweise den Arbeitspunkt und den Einschwingvorgang. Man sieht wie sich in den ersten 50 ms der Emitterkondensator langsam auflädt und der Transistor am Ausgang noch voll übersteuert ist.

```

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****
NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE
( B)  1.7259  ( C)  5.9924  ( E)  1.0796  ( in)  0.0000
( UB) 12.0000 ( out) 0.0000
    
```

Abbildung 6: Spannungen gegen O der Schaltung 4 (xx.OUT)

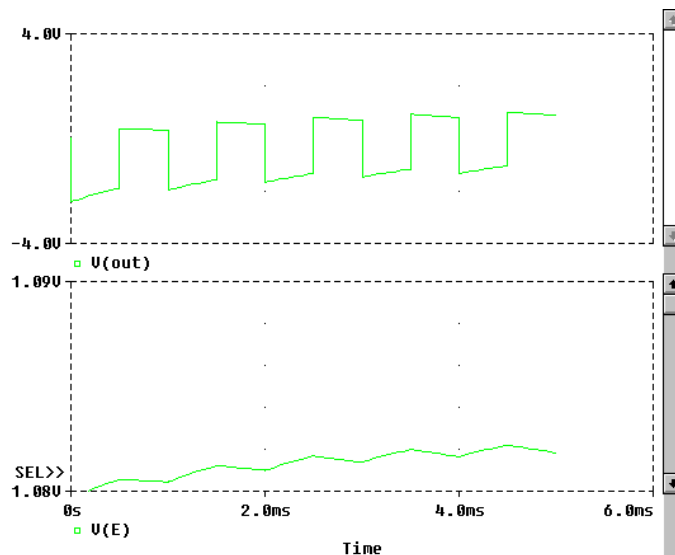


Abbildung 7: Transientenanalyse von Schaltung 4

Beim zweiten Versuch schalten wir die Initial conditions aus. Jetzt beginnt Spice von den bereits errechneten Gleichstromknotenspannungen zu simulieren an. Durch die relativ große Eingangsspannung muß, verursacht durch die nichtlineare Steuerkennlinie des Transistors, der Emitterkondensator noch geringfügig nachgeladen werden. Man sieht auch, daß die Spannung am Emitterkondensator leicht wellig bleibt (einige mV). Das Rechtecksignal am Ausgang weist wegen der, für die Meßfrequenz von 1 kHz, zu klein gewählten Kondensatoren eine Dachschräge auf.

Bei der Fourieranalyse kann man noch optional zusätzlich eine Fourieranalyse durchführen lassen. (Button Transientenanalyse). Dabei ist die

Frequenz der Grundschwingung und die Anzahl der gewünschten Oberwellen im Setup Window einzugeben. Um das Spektrum graphisch anzuzeigen, ist im Programm Probe der Rollbalken Plot anzuwählen. Der Befehl X Axis Settings erlaubt das Umschalten des Zeitverlaufes in eine Spektralabbildung. Weiters werden die Spektralanteile mit Betrag und Phasenwinkel im xx:OUT File festgehalten.

Will man den Einschwingvorgang gänzlich unterdrücken, dann wählt man den Button „Save BIAS“. Damit werden am Ende der Transientenanalyse die Knotenspannungen in ein File abgespeichert und können beim folgenden Start der Analyse durch setzen von „Load BIAS“ wieder gesetzt werden.

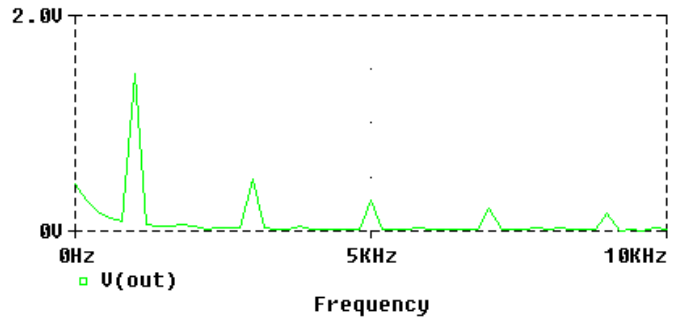


Abbildung 8: Spektrum des Ausgangssignals vom Transient Bild 7

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(out)

DC COMPONENT = -1.071329E-01

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	1.000E+03	1.355E+00	1.000E+00	-1.774E+02	0.000E+00
2	2.000E+03	2.940E-02	2.170E-02	1.392E+02	3.166E+02
3	3.000E+03	4.524E-01	3.339E-01	1.786E+02	3.560E+02
4	4.000E+03	2.248E-02	1.659E-02	1.168E+02	2.942E+02
5	5.000E+03	2.716E-01	2.004E-01	1.764E+02	3.538E+02
6	6.000E+03	2.099E-02	1.549E-02	1.056E+02	2.830E+02
7	7.000E+03	1.941E-01	1.432E-01	1.745E+02	3.519E+02
8	8.000E+03	2.050E-02	1.513E-02	9.861E+01	2.760E+02
9	9.000E+03	1.511E-01	1.115E-01	1.727E+02	3.501E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 4.310681E+01 PERCENT

Abbildung 9: Spektralanteile des Ausgangsrechtecksignals von Bild 7

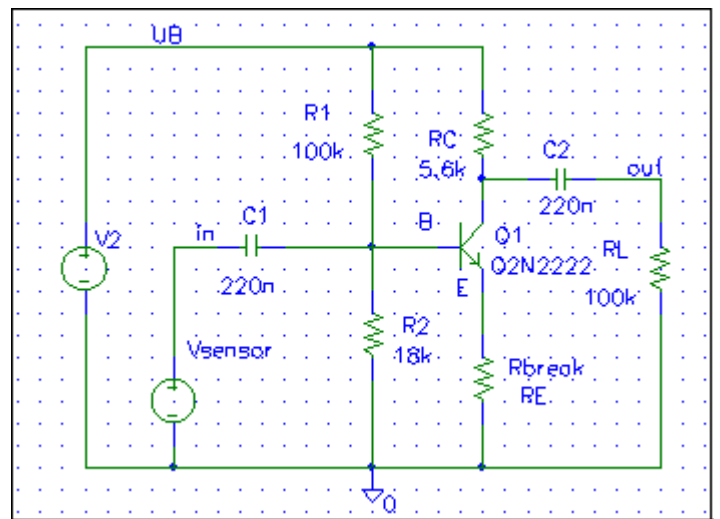


Abbildung 10: Gegengekoppelter Transistorverstärker

Nun entfernen wir den Emitterkondensator und wollen das Wechselstromverhalten des gegengekoppelten Verstärkers untersuchen. Die Quelle VStim wird durch den Typ VSRC ersetzt. Damit erhalten wir eine Sinusspannung am Eingang. Der Button „AC Analyse“ wird aktiv gesetzt und durch anklicken wird ein Fenster zur Eingabe der Simulationsparameter geöffnet. Um die Veränderung der Verstärkung bei Variation des Emitterwiderstandes RE studieren zu können, wählen wir ein Widerstandssymbol Rbreak, welches stufenweise seinen Nennwert ändern läßt. Der Button Parametric wird aktiv gesetzt und das Editierfenster durch Anklicken des Button geöffnet. In Abbildung 11 sind die

gewählten Werte zu sehen. Der Startwert 0.5 bedeutet, daß die Simulation mit einem Emitterwiderstand von 0.5\*Nennwert beginnt und der Emitterwiderstand dann stufenweise um 25 % seines Nennwertes erhöht wird. Abbildung 12 zeigt als Ergebnis die 5 errechneten Meßreihen. Das Ergebnis kann jedoch nicht der Wirklichkeit entsprechen, weil wir bei einer Batteriespannungen von 12 V ein Ausgangssignal von 10 V erreichen. Spice rechnet bei der AC Analyse mit einem linearen Transistormodell, welches seine Kleinsignalparameter sehr wohl vom DC Arbeitspunkt abhängig macht, aber dieses lineare Modell gilt eben nur für kleine Signale und berücksichtigt keine Übersteuerungen.

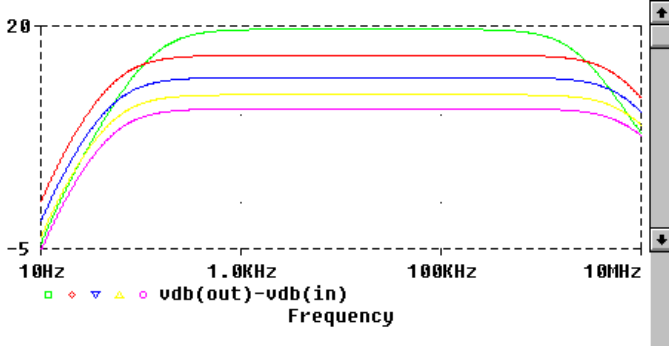


Abbildung 11: Amplitudengang des gegengekoppelten Verstärkers

Die Y Achse kann im Rollbalkenmenü „Plot“ auch mit dem Befehl Y Axis auf logarithmisch gestellt werden. Günstiger ist es jedoch wenn man einen dB-Maßstab wählt. Das Programm Probe bietet auch eine Reihe von Rechenfunktionen wie VdB(xx) für die Spannung des Knotens xx, oder VP (xx) für das Phasenmaß oder VG(xx) für die Gruppenlaufzeit. Weiters beherrscht das Programm auch alle Grundrechenarten.

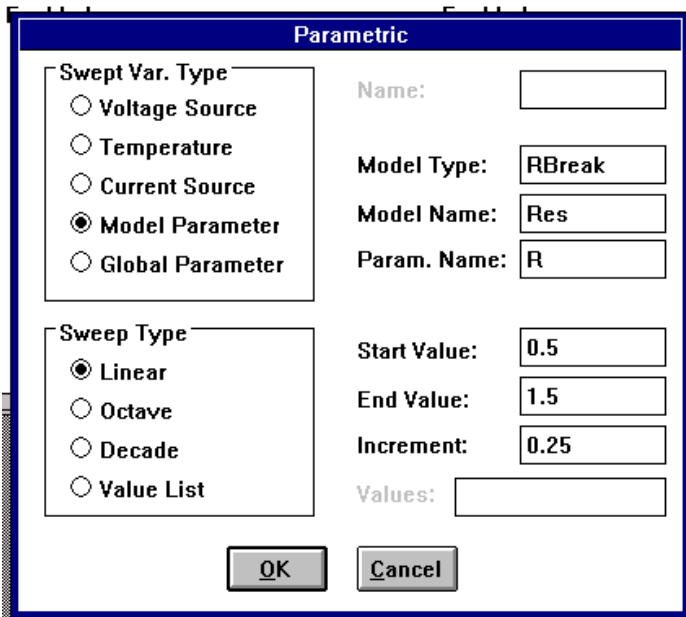


Abbildung 12: Eingabefenster des Button Parametric

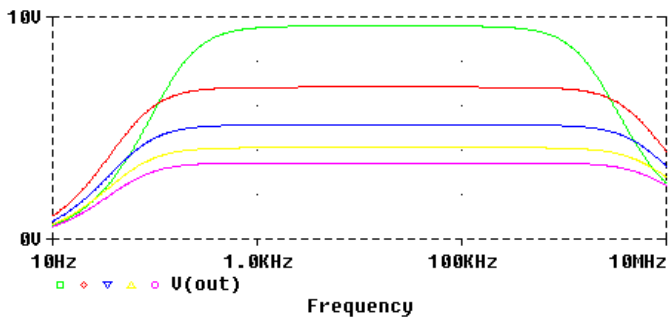


Abbildung 13: AC Analyse des Verstärkers von Bild 10 mit linearer Y Achse

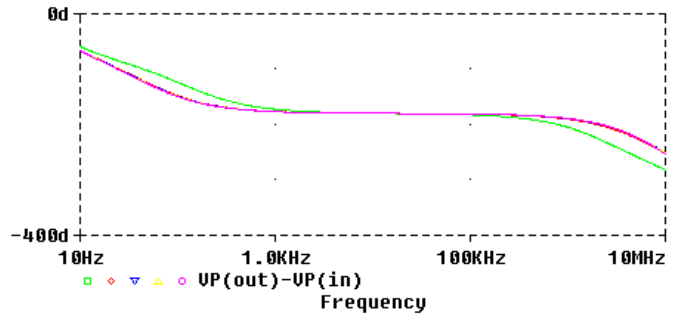


Abbildung 14: Phasengang des gegengekoppelten Verstärkers

Auf Seite 10 sind zwei von den drei genannten Diagrammen zu sehen. Gleichzeitig mit der AC Analyse kann auch eine Rauschanalyse durchgeführt werden. Zu diesem Zweck haben wir unsere VSRC Quelle mit dem Referenzdesignator VSensor versehen. Die Einstellungen im mit Button „AC Analyse“ aktivierten Einstellfenster zeigt Abbildung 16. Je nachdem welche X - Achse man im Diagramm plant, wird man eine lineare oder dekadische (logarithmische) Analyse mit gegebener Anzahl von Rechenpunkten wählen.

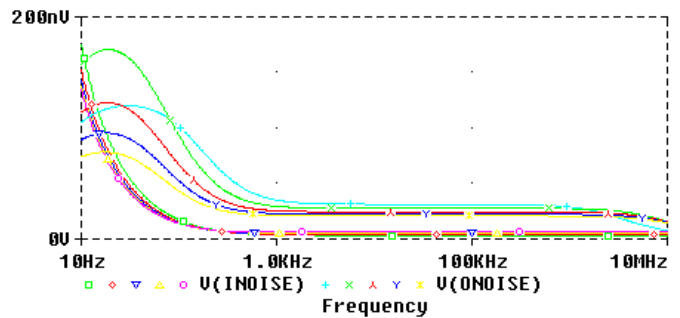


Abbildung 15: Rauschanalyse des gegengekoppelten Verstärkers

Die Rauschanalyse ermittelt den Effektivwert der äquivalenten Rauschspannung am Ort des Sensors und auch an einem beliebigen Knotenpunkt. In Abbildung 15 ist das Ergebnis zu sehen. Die an den Eingang versetzte äquivalente Rauschspannung zeigt das typische 1/f Rauschen des Transistors und ein sehr geringes Weißes Rauschen des Widerstände. Am Ausgang nach den Koppelkondensatoren hat das Rauschen entsprechend der Filterung bei etwa 100 Hz ein Maximum.

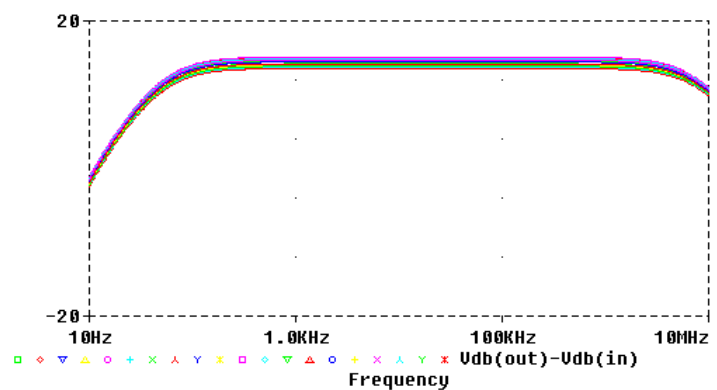


Abbildung 16: Monte Carlo Analyse (RE) des einstufigen Verstärkers

Mit der Option Parametric lassen sich eine Vielzahl von Werten, wie etwa die Temperatur oder die Stromverstärkung eines Transistors, stufenweise ändern. Eine weitere Möglichkeiten Schaltungen auf Bauteiltoleranzen zu untersuchen ist die Worst-Case und Monte-Carlo-Analyse. Beide setzen voraus, daß das Modell Bauteiltoleranzen enthält. In Spice für Windows läßt es z.B. das Modell Rbreak zu, Toleranzgrenzen einzugeben. Mit dem Rollbalkenbefehl Edit/Modell wird der Modelleditor aufgerufen. Durch einfügen der Zeile:

R=1 DEV=10%

wird mitgeteilt, daß der Nennwert um bis zu 10 % sich verändern kann. Mit der Worst-Case-Analyse kann man nun feststellen, um wieviel sich maximal die Eigenschaften der Schaltung bei Variation aller toleranzbehafteten Modellen ändert. Bei der Monte Carlo Analyse muß man eine Anzahl von Durchläufen wählen. Für jede Berechnung wählt das Programm eine Zufallszahl

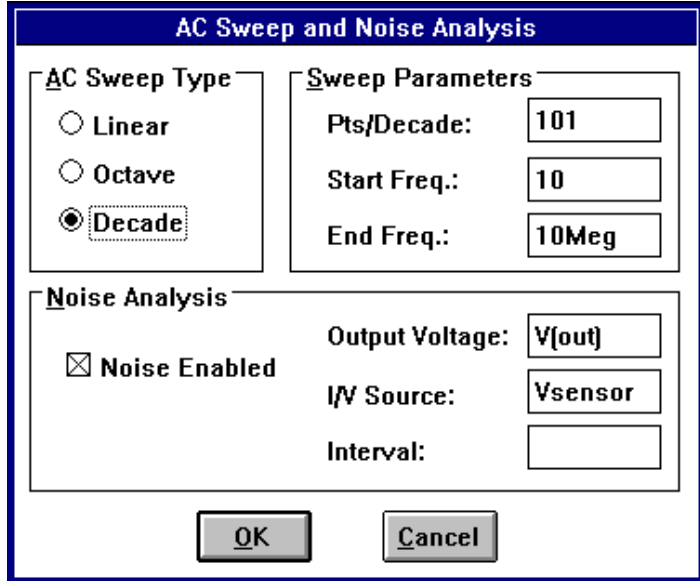


Abbildung 16: Konfigurationsfenster der AC-Analyse

und multipliziert im Rahmen der Toleranzen alle Modelle mit Variationsmöglichkeit. Das Ergebnis einer solchen Analyse für einen toleranzbehafteten Emittorwiderstand zeigt die **Abbildung 17**.

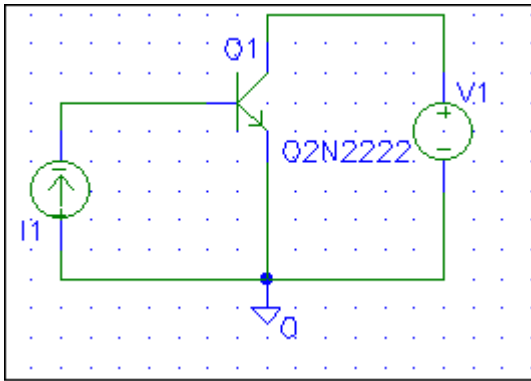


Abbildung 17: Schaltung zur Aufnahme der Transistorkennlinie

Zur Demonstration der DC Analyse wollen wir das Ausgangskennlinienfeld eines Transistors aufnehmen. Die Meßschaltung ist in **Abbildung 17** zu sehen. Die DC Analyse erlaubt das verschachtelte Ändern von Bauteilwerten, besonders jedoch das stufenweise variieren von Strom- und Spannungsquellen. Als Main Sweep wurde die Stromquellen in 10  $\mu$ A Stufen beginnend von 10  $\mu$ A bis 100  $\mu$ A geändert und verschachtelt dazu die Spannungsquelle von

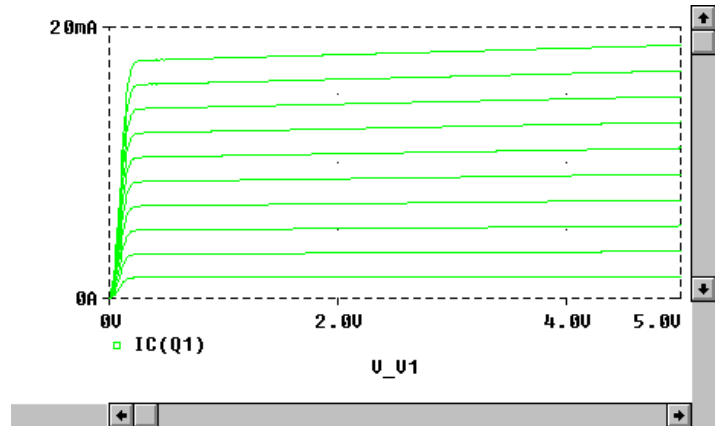


Abbildung 18: Transistorausgangskennlinienfeld

0 - 10 V in Schritten von 0.01 V. Das Ergebnis sieht man in **Abbildung 18**.

```

** Analysis setup **
.ac DEC 101 10 10Meg
.noise V([out]) V_Vsensor
.STEP LIN Res Rbreak (R) 0.5 1.5 0.25
.OP
.STMLIB TRTRAN.stl
    
```

□