

## Ergänzungen zum Buch:

### Vester, Joachim: Simulation elektronischer Schaltungen mit MICRO-CAP.

#### 1. Aufl., Wiesbaden: Verlag Vieweg+Teubner, 2010.

Die Angaben beziehen sich auf MC9 (Version 9.0.6.1), werden aller Voraussicht nach aber auch für Nachfolgeversionen gelten.

1	Abkürzungen aus dem Buch .....	2
2	Konstanten und Formelzeichen aus dem Buch .....	3
3	Formeln aus dem Buch .....	5
4	Lösungen zu Übungsaufgaben aus dem Buch .....	8
5	Funktionstasten und Tastenkombinationen ( <i>shortcuts</i> ) in MC9	
5.1	Vergleichsliste deutscher mit amerikanischen Tastenbezeichnungen .....	13
5.2	Allgemein anwendbare Tasten/Tastenkombinationen.....	14
5.3	Bei aktivem Schaltplan-Eingabefenster anwendbare Tasten/Tastenkombinationen .....	15
5.4	Bei aktivem Analyse-Ausgabefenster anwendbare Tasten/Tastenkombinationen .....	16
5.5	Bei Textseiten/Textdateien und 3-D-Ausgaben anwendbare Tasten/Tastenkombinationen .....	17
6	Zahlen, Variablen, mathematische Ausdrücke und Befehlsausdrücke in MC9	
6.1	Zahlen, Vorsätze und Einheiten in MC9 .....	18
6.2	Konstanten und Analyse-Variablen in MC9.....	19
6.3	Mathematische Operatoren in MC9.....	20
6.4	Mathematische Funktionen in MC9 .....	21
6.5	Befehlsausdrücke ( <i>Command Statements</i> ) in MC9 .....	23
7	Ausgabe von Ergebnissen in MC9	
7.1	Ausgabe-Variablen in MC9.....	25
7.2	Ausgabe-Variablen bei einer AC-/Dynamic-AC-Analyse.....	26
7.3	\$-Variablen für Schaltpläne, <i>Title Block</i> bzw. Kopf-/Fußblock in MC9 .....	27
8	Modell-Elemente und <i>Macros</i>	
8.1	Tabelle aller analogen Modell-Elemente in MC9 (Tabelle 8.1 aus dem Buch) .....	28
8.2	Modell-Elemente für Quellen in MC9.....	30
8.3	Tabelle der 55 <i>Macros</i> in MC9.....	31
9	Einstellungen im Dialogfenster <i>Preferences</i> von MC9 (Auswahl).....	32
10	GS-Parameter von MC9 (Parameter des Dialogfensters <i>Global Settings</i> ) und Konvergenz	
10.1	GS-Parameter von MC9 (Parameter des Dialogfensters <i>Global Settings</i> ) .....	34
10.2	Was ist Konvergenz? .....	36
10.3	Konvergenz-Checkliste .....	37
11	Alphabetische Liste der Dateitypen/Dateityp-Endungen von MC9 .....	42
12	Liste leicht vorkommender Fehler beim Einstieg in MC9 .....	44
13	Beschränkungen der Demoversion von MC9 .....	45
14	Was kann MC9 noch? (Übersicht über die Demos).....	46

Inhaltsverzeichnis des Buches

Sachwortverzeichnis des Buches

## 1 Abkürzungen aus dem Buch

Abk.	Bedeutung
<LM>	linke <u>M</u> austaste
<RM>	rechte <u>M</u> austaste
Abschn.	<u>A</u> bschnitt (Abschn. 1.2, Abschn. 3.4.5, usw.)
AC	<u>a</u> lternating <u>c</u> urrent, Wechselstrom
BJT	<u>B</u> ipolar <u>j</u> unction <u>t</u> ransistor
CB	<u>C</u> heck <u>b</u> ox, Kontrollkästchen
DC	<u>D</u> irect <u>c</u> urrent, Gleichstrom
Dflt.	<u>D</u> efaultwert
DGL	<u>D</u> ifferenzial- <u>G</u> leichung
E.	<u>E</u> inheit
Gl.	<u>G</u> leichung
GS-Parameter	Globaler Parameter, der im Dialogfenster <u>G</u> lobal <u>S</u> ettings eingestellt wird
IC	<u>I</u> ntegrated <u>c</u> ircuit, integrierte Schaltung
Kap.	<u>K</u> apitel (Kap. 1, Kap. 2, usw.)
MC	das Programm <u>M</u> ICRO- <u>C</u> AP ( <u>M</u> icrocomputer <u>C</u> ircuit <u>A</u> nalysis <u>P</u> rogram)
MC9	das Programm <u>M</u> ICRO- <u>C</u> AP Version 9
PCB	<u>P</u> rinted <u>c</u> ircuit <u>b</u> oard, Leiterplatte (Leiterkarte)
SCR	<u>S</u> ilicon <u>c</u> ontrolled <u>r</u> ectifier, Thyristor
SF	<u>S</u> chaltfläche, <i>button</i> , <i>icon</i>
SPICE	<u>S</u> imulation <u>P</u> rogram with <u>I</u> ntegrated <u>C</u> ircuit <u>E</u> mphasis
TR	<u>t</u> ransient, zeitabhängig

## 2 Konstanten und Formelzeichen aus dem Buch

Die Tabelle enthält die im Buch verwendeten **Konstanten**.

Konstante	Bedeutung
$j = \sqrt{-1}$ ,	imaginäre Einheit (in MC: J)
$k \approx 1,381 \cdot 10^{-23}$ VAs/K	Boltzmann-Konstante (in MC: $1,380\ 622\ 6 \cdot 10^{-23}$ VAs/K)
$q \approx 1,602 \cdot 10^{-19}$ As	Elementarladung (in MC: $1,602\ 191 \cdot 10^{-19}$ As)
$e \approx 2,718$	eulersche Zahl (in MC: E = 2,718 281 828 459 045 1)
$\pi \approx 3,142$	Kreiszahl (in MC: PI = 3,141 592 653 589 793 1)
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am	magnetische Feldkonstante (my)
$\epsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm	elektrische Feldkonstante (epsilon)

Die Tabelle enthält die meisten der im Buch verwendeten **Formelzeichen**.

Formelzeichen	Bedeutung
$\beta$ (beta)	Kleinsignal-Stromverstärkung
$\Theta$ (Theta)	Durchflutung
$\tau$ (tau)	Zeitkonstante bei exponentiellem Zeitverhalten einer Sprungantwort
$\varphi$ (phi)	Phasenverschiebungswinkel
$\varphi_X$	elektrisches Potenzial des Knotens X
$\varphi_i$	Nullphasenwinkel des Sinusstroms $i$
$\varphi_u$	Nullphasenwinkel der Sinusspannung $u$
$\Phi$ (Phi)	magnetischer Fluss
$\chi$ (chi)	magnetische Suszeptibilität
$\Psi$ (Psi)	magnetischer Verkettungsfluss
$\omega$ (omega)	Kreisfrequenz in rad/s, $\omega = 2 \cdot \pi / T$
$ k $	Betrag einer komplexen Größe $k$
$\hat{a} = \hat{a} \angle \varphi_a$	Versorschreibweise ist eine abkürzende Schreibweise für $\hat{a} = \hat{a} \cdot e^{j\varphi_a}$
$A_K$	Querschnittsfläche eines magnetischen Kreises
$a_T$	logarithmisches Maß des Betrags der komplexen Größe $T$
$B$	magnetische Flussdichte
$C$	Kapazität(-swert)
$C_{th}$	Wärmekapazität ( <i>thermal</i> )
$f$	Frequenz in Hz, $f = 1/T$
$f_{g3T}$	3-dB-Grenzfrequenz der komplexen Größe $T$
$f_T$	Transitfrequenz
$G$	Leitwert
$G_{BW}$	Verstärkungs-Bandbreite-Produkt ( <i>gain-bandwidth-product</i> )
$H$	magnetische Feldstärke
$\underline{I}$	komplexer Effektivwert eines Sinusstroms $\underline{I} = \hat{I} / \sqrt{2}$
$I$	Effektivwert eines Stroms, bei Sinusstrom: $I = \hat{I} / \sqrt{2}$
$\hat{I}$	komplexe Amplitude eines Sinusstroms
$\hat{I}$	Amplitude eines Sinusstroms mit $\hat{I} =  \hat{I} $ , Scheitelwert
$i_F, i_f$	Strom durch eine Diode mit Bezugspfeil in Durchlassrichtung ( <i>forward</i> )
$i_R, i_r$	Strom durch eine Diode mit Bezugspfeil in Sperrichtung ( <i>reverse</i> )
$I_S$	Sättigungsstrom (Parameter der Shockley-Gleichung)
$\text{Im}\{k\}$	Imaginärteil der komplexen Größe $k$
$J$	magnetische Polarisation

$k_{12}$	Kopplungsfaktor zwischen Wicklung Nr. 1 (Ursache) und Wicklung Nr. 2 (Wirkung)
$L$	Induktivität(-swert)
$l_k$	Länge des Feldabschnitts eines magnetischen Kreises
$M$	Magnetisierung
$N$	Emissionskoeffizient (Parameter der Shockley-Gleichung)
$N$	Windungszahl einer Wicklung
$p$	Leistung ( <i>power</i> )
$P_{SR}$	<i>power supply rejection</i> , logarithmisches Maß von $P_{SRR}$
$P_{SRR}$	<i>power supply rejection ratio</i> , Versorgungsspannungs-Unterdrückungsverhältnis
$R$	Widerstand(-swert)
$R_{dZ}$	differenzieller Widerstand einer Z-Diode im Durchbruchbereich
$R_{th}$	Wärmewiderstand ( <i>thermal</i> )
$\text{Re}\{ \underline{k} \}$	Realteil der komplexen Größe $\underline{k}$
$\underline{T}$	(komplexer) Frequenzgang ( <i>transfer function</i> )
$T$	Periodendauer
$t$	Zeit ( <i>time</i> )
$T_0$	Verstärkung bei $f = 0$
$T_{EMP}$	globale Temperaturvariable in MC
$T_J$	Innentemperatur eines Bauelements, bei Halbleiter-Bauelementen: Sperrschichttemperatur
$T_{JM}$	Messtemperatur; Innentemperatur eines Bauelements, bei der Kennwerte/-linien gemessen wurden ( <i>junction measured</i> )
$T_{MEASURED}$	globale Temperaturvariable in MC
$T_X$	Temperatur in K oder °C am Ort X, X = J ( <i>junction</i> ), C ( <i>case</i> ), H ( <i>heatsink</i> ), A ( <i>ambient</i> )
$\underline{U}$	komplexer Effektivwert einer Sinusspannung $\underline{U} = \hat{u} / \sqrt{2}$
$U$	Effektivwert einer Spannung, bei Sinusspannung: $U = \hat{u} / \sqrt{2}$
$\hat{u}$	komplexe Amplitude einer Sinusspannung
$\hat{u}$	Amplitude einer Sinusspannung mit $\hat{u} =  \underline{\hat{u}} $ , Scheitelwert
$\hat{u}_{12}$	Übersetzungsverhältnis
$U_{A\infty}$	Endwert, gegen den die Spannung $u_A$ für $t \rightarrow \infty$ bei einer exponentiellen Änderung strebt
$U_{A0}$	Anfangswert der Spannung $u_A$ bei $t = 0+$ bei einer exponentiellen Änderung
$u_F, u_f$	Spannung einer Diode mit Bezugspfeil in Durchlassrichtung ( <i>forward</i> )
$u_{pn}$	Spannung in der Shockley-Gleichung (pn-Übergang)
$u_{pp}$	Spitze-Spitze-Wert der Spannung $u$ ( <i>peak-to-peak value</i> )
$u_R, u_r$	Spannung einer Diode mit Bezugspfeil in Sperrichtung ( <i>reverse</i> )
$U_T, V_T$	Temperaturspannung $U_T = T_J \cdot k / q$ (z. B. in der Shockley-Gleichung)
$U_Z$	Z-Spannung einer Z-Diode
$\underline{V}$	komplexe Spannung als komplexer Effektivwert oder komplexe Amplitude ( <i>voltage</i> )
$\underline{Y}$	komplexer Leitwert
$\underline{Z}$	komplexer Widerstand

### 3 Formeln aus dem Buch

Im Folgenden sind zur besseren Übersicht unter Angabe des Abschnitts und der Gleichungsnummer die meisten der im Buch angegebenen Formeln aufgeführt.

#### aus: 2.2 Theoretische Erkenntnisse als Sinn und Zweck eines Modells

$$(2.1) \quad \underline{Z}_C = \frac{\hat{u}_C}{\hat{i}_C} = \frac{1}{j\omega C} \quad \text{komplexer Widerstand eines idealen Kondensators}$$

$$(2.2) \quad \underline{Z}_L = \frac{\hat{u}_L}{\hat{i}_L} = j\omega L \quad \text{komplexer Widerstand einer idealen Spule}$$

$$\hat{u} = \hat{u} \cdot e^{j\varphi_u} = \hat{u} \angle \varphi_u \quad \text{komplexe Spannung in Exponential- und Versorschreibweise}$$

$$e^{j\varphi_u} = \cos(\varphi_u) + j \cdot \sin(\varphi_u) \quad \text{eulersche Gleichung}$$

$$\hat{u} = \hat{u} \cdot e^{j\varphi_u} = \hat{u} \cdot \cos(\varphi_u) + j \cdot \hat{u} \cdot \sin(\varphi_u) = \operatorname{Re}\{\hat{u}\} + j \cdot \operatorname{Im}\{\hat{u}\} \quad \text{siehe auch Gl. (2.15)}$$

$$(2.6) \quad a_T = 20\text{dB} \cdot \lg(|T|) \quad \text{logarithmisches Maß des komplexen Frequenzgangs } T$$

$$(2.7) \quad i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt} \quad \text{Strom-Spannungs-DGL eines idealen Kondensators, } C\text{-}d\text{-}u\text{-Formel}$$

$$(2.8) \quad u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad \text{Strom-Spannungs-DGL einer idealen Spule, } L\text{-}d\text{-}i\text{-Formel}$$

$$(2.9) \quad u_A(t) = U_{A\infty} - (U_{A\infty} - U_{A0}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{nur gültig für } t \geq 0+$$

#### aus: 2.6 Wechselstrom-Analyse und Ausgabe als Kurve (AC-Analyse)

$$(2.10) \quad y = 20\text{dB} \cdot \lg\left(\frac{|V_{(A)}|}{1\text{V}}\right) \quad \text{ist die Formel, die MC bei der Funktion DB(V(A)) ausführt}$$

#### aus: 2.8 Wechselstrom-Analyse und Ausgabe im Schaltplan (Dynamic-AC-Analyse)

$$(2.11) \quad y = 20\text{dB} \cdot \lg(|k|) \quad \text{ist wie Gl. (2.10) die Formel, die MC bei } \textit{Magnitude in dB} \text{ ausführt}$$

$$(2.12) \quad |V_{(A)}| = 1\text{V} \cdot 10^{\frac{y \text{ in dB}}{20\text{dB}}}$$

$$(2.13) \quad |I_{(A)}| = 1\text{A} \cdot 10^{\frac{y \text{ in dB}}{20\text{dB}}}$$

$$(2.14) \quad \varphi \text{ in rad} = (\varphi \text{ in } ^\circ) \cdot \frac{\pi \text{ rad}}{180^\circ} \quad \text{Umrechnung eines Winkels von der Einheit Grad in Radiant}$$

$$(2.15) \quad |k| \cdot e^{j\varphi_k} = |k| \cdot (\cos \varphi_k + j \cdot \sin \varphi_k) = |k| \cdot \cos \varphi_k + j \cdot |k| \cdot \sin \varphi_k = a + j \cdot b$$

#### aus: 3.1 Einfache Modelle für das Verhalten einer realen Diode

$$(3.1) \quad i_F = I_S \cdot (e^{\frac{u_{pn}}{N \cdot U_T}} - 1) \quad \text{Shockley-Gleichung}$$

$$(3.2) \quad U_T = \frac{k}{q} \cdot T_J \quad \text{Temperaturspannung, } [T_J] = 1 \text{ K, } k \approx 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ VAs/K, } q \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$$

#### aus: 3.2 Parameterwert-Extraktion und -Verifikation am Beispiel der Diode 1N4001

$$(3.3) \quad i_F = I_S \cdot e^{\frac{u_{pn}}{N \cdot U_T}} \quad \text{Näherung der Shockley-Gleichung für } u_{pn} > +0,2 \text{ V}$$

**aus: 7.1 Berechnung und Simulation für den Betrieb ohne Kühlkörper**

$$(7.1) \quad R_{\text{thYX}} = \frac{T_Y - T_X}{p_{\text{thR}}(t)} = \frac{T_{\text{YX}}}{p_{\text{thR}}(t)} \quad \text{Wärmewiderstand } R_{\text{thYX}}$$

$$(7.2) \quad p_{\text{thC}}(t) = C_{\text{thK}} \cdot \frac{dT_{\text{K}}}{dt} = C_{\text{thK}} \cdot \frac{dT_{\text{K}}}{dt} \quad \text{Wärmekapazität } C_{\text{thK}}$$

$$(7.3) \quad \vartheta_X = [T_X / (1 \text{ K}) - 273] \cdot 1 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{genäherte Umrechnung zwischen absoluter und Celsius-Temperatur}$$

**aus: 9.2 Modell-Typ CORE für Spule mit ferromagnetischem Kern**

$$(9.1) \quad \Theta = N \cdot i_L = l_K \cdot H_{iL}$$

$$(9.2) \quad B_{\text{Fe}} = B_0 + J_{\text{Fe}}$$

$$(9.3) \quad J_{\text{Fe}} = \mu_0 \cdot M_{\text{Fe}}$$

$$(9.4) \quad B_{\text{Fe}} = B_0 + J_{\text{Fe}} = \mu_0 \cdot H_{iL} + \mu_0 \cdot M_{\text{Fe}}$$

$$(9.5) \quad B_{\text{Fe}} = \mu_0 \cdot (H_{iL} + M_{\text{Fe}}) = \mu_0 \cdot (1 + M_{\text{Fe}}/H_{iL}) \cdot H_{iL} = \mu_0 \cdot (1 + \chi_{\text{Fe}}) \cdot H_{iL} = \mu_0 \cdot \mu_{\text{rFe}} \cdot H_{iL}$$

$$(9.6) \quad M_{\text{FeoH}} = M_{\text{FeS}} \cdot \frac{H_{\text{Fe}}}{|H_{\text{Fe}}| + H_A}$$

$$(9.7) \quad M_{\text{FeS}} = J_{\text{FeS}} / \mu_0 \approx B_{\text{FeS}} / \mu_0$$

$$(9.8) \quad \chi_{\text{iFe}} = M_{\text{FeS}} / H_A$$

$$(9.9) \quad \Psi = N \cdot \Phi = N \cdot A_K \cdot B_{\text{Fe}}$$

$$(9.10) \quad u_L = +d\Psi/dt$$

$$(9.11) \quad L = \Psi/i_L$$

$$(9.12) \quad u_L = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{di_L} \cdot \frac{di_L}{dt} = L_d(i_L) \cdot \frac{di_L}{dt}$$

$$(9.13) \quad L_d(i_L) = d\Psi/di_L = f(i_L)$$

$$(9.14) \quad M_{\text{FeoH}} = \frac{M_{\text{FeS}}}{H_A} \cdot H_{\text{Fe}} \quad \text{für } |H_{\text{Fe}}| \ll H_A$$

$$(9.15) \quad \Psi = \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{A_K}{l_K} \cdot i_L + \mu_0 \cdot \chi_{\text{iFe}} \cdot N^2 \cdot \frac{A_K}{l_K} \cdot i_L$$

$$(9.16) \quad L = L_d = \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{A_K}{l_K} + \mu_0 \cdot \chi_{\text{iFe}} \cdot N^2 \cdot \frac{A_K}{l_K}$$

$$(9.17) \quad L = L_d = L_0 + \chi_{\text{iFe}} \cdot L_0 = (1 + \chi_{\text{iFe}}) \cdot L_0 = \mu_{\text{rFe}} \cdot L_0$$

$$(9.18) \quad L_d = L_0 + L_0 \cdot \chi_{\text{iFe}} \frac{1}{\left(1 + \frac{N \cdot |i_L|}{l_K \cdot H_A}\right)^2} \quad \text{mit } L_0 = \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{A_K}{l_K}$$

$$(9.19) \quad \Theta = N \cdot i_L = l_{\text{Fe}} \cdot H_{\text{Fe}} + l_{\text{Ls}} \cdot H_{\text{Ls}}$$

$$(9.20) \quad B_{\text{Fe}} = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot i_L}{l_{\text{Ls}}} - \mu_0 \cdot \frac{l_{\text{Fe}}}{l_{\text{Ls}}} \cdot H_{\text{Fe}} = g(H_{\text{Fe}})$$

$$(9.21) \quad B_{\text{Fe}} = f(H_{\text{Fe}}) = \mu_0 \cdot H_{\text{Fe}} + \mu_0 \cdot \chi_{\text{Fe}} \cdot H_{\text{Fe}} = \mu_0 \cdot \mu_{\text{rFeK}} \cdot H_{\text{Fe}}$$

$$(9.22) \quad B_{\text{Fe}} = f_1(i_L) = \mu_0 \cdot \frac{\mu_{\text{rFeK}}}{1 + \frac{\mu_{\text{rFeK}} \cdot l_{\text{Ls}}}{l_{\text{Fe}}}} \cdot \frac{N \cdot i_L}{l_{\text{Fe}}}$$

$$(9.23) \quad \Theta = N \cdot i_L = l_K \cdot H_{iL} \approx l_{\text{Fe}} \cdot H_{iL} \quad (l_K = l_{\text{Fe}} + l_{\text{Ls}} \approx l_{\text{Fe}}, \text{ da } l_{\text{Fe}} \gg l_{\text{Ls}} \text{ angenommen})$$

$$(9.24) \quad \mu_{\text{reff}} = \frac{\mu_{\text{rFeK}}}{1 + \mu_{\text{rFeK}} \cdot l_{\text{Ls}} / l_{\text{Fe}}}$$

$$(9.25) \quad M_{\text{FeoH}} = M_{\text{FeS}} \cdot \frac{H_{\text{Fe}}}{|H_{\text{Fe}}| + H_{\text{A}}}$$

**aus: 9.3 Modell-Elemente für induktiv gekoppelte Wicklungen**

$$(9.30) \quad k_{12} = \frac{\Phi_{12}}{\Phi_{11}} = \frac{\Phi_{12}}{\Phi_{12} + \Phi_{1S}}$$

$$(9.31) \quad k_{21} = \frac{\Phi_{21}}{\Phi_{22}} = \frac{\Phi_{21}}{\Phi_{21} + \Phi_{2S}}$$

$$(9.32) \quad u_1 = L_{11} \cdot \frac{di_1}{dt} + L_{21} \cdot \frac{di_2}{dt}$$

$$(9.33) \quad u_2 = L_{22} \cdot \frac{di_2}{dt} + L_{12} \cdot \frac{di_1}{dt}$$

$$(9.34) \quad L_{12} = L_{21}$$

$$(9.35) \quad k_{12} = \frac{L_{12}}{L_1} \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad \text{und} \quad k_{21} = \frac{L_{21}}{L_2} \cdot \frac{N_2}{N_1}$$

$$(9.36) \quad k_{12} = k_{21}$$

$$(9.37) \quad k_{12} = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$$

$$(9.38) \quad \frac{L_1}{L_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \ddot{u}_{12}^2$$

$$(9.39) \quad L_S = (1 - k_{12}^2) \cdot L_1 = \sigma \cdot L_1 \quad L_H = k_{12}^2 \cdot L_1 = (1 - \sigma) \cdot L_1 \quad \text{und} \quad \ddot{u}_{H2} = k_{12} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$$

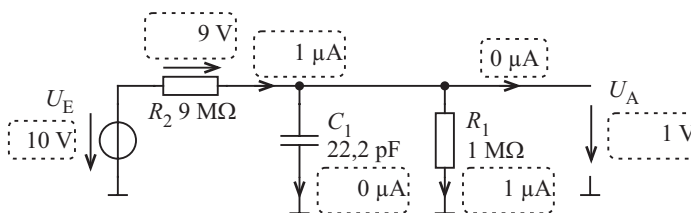
$$(9.40) \quad \Theta = N_1 \cdot i_{N1}(t) + N_2 \cdot i_{N2}(t) + N_3 \cdot i_{N3}(t) = l_K \cdot H_{\text{Fe}}$$

**aus: 10.1 Modell-Typ NPN (PNP) für das Bauelement BJT**

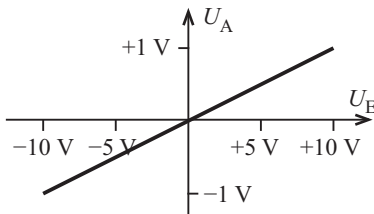
$$(10.1) \quad \underline{\beta} = \beta_0 \cdot \frac{1}{1 + j \cdot \frac{f}{f_{g3\beta}}}$$

## 4 Lösungen zu Übungsaufgaben aus dem Buch

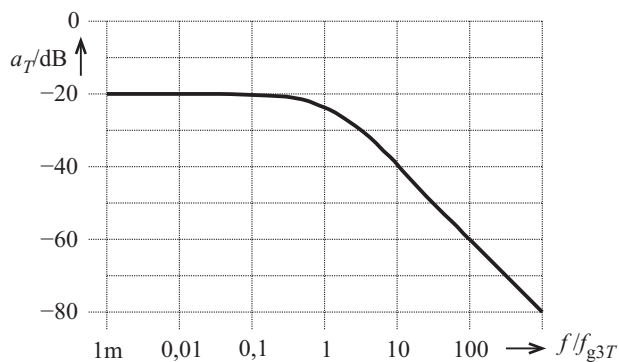
### Ü 2-1 DC-Werte



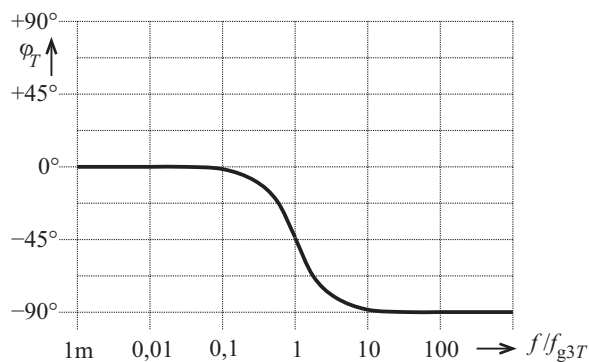
### Ü 2-2 DC-Kennlinie



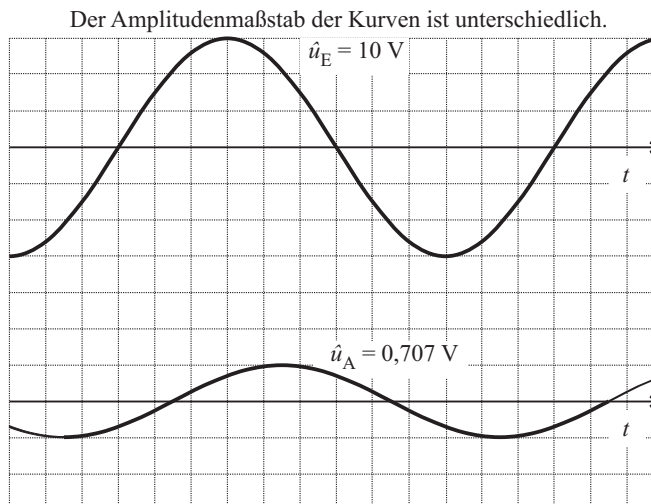
### Ü 2-3 Amplitudengang



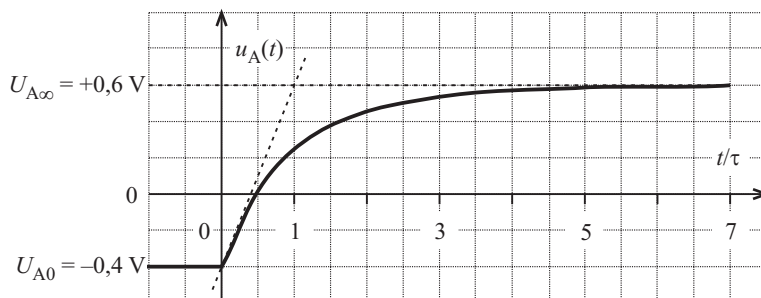
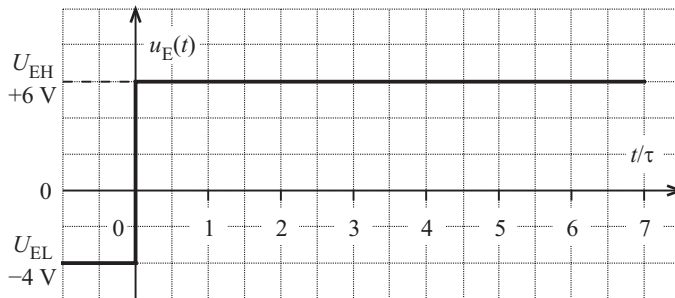
### Ü 2-4 Phasengang



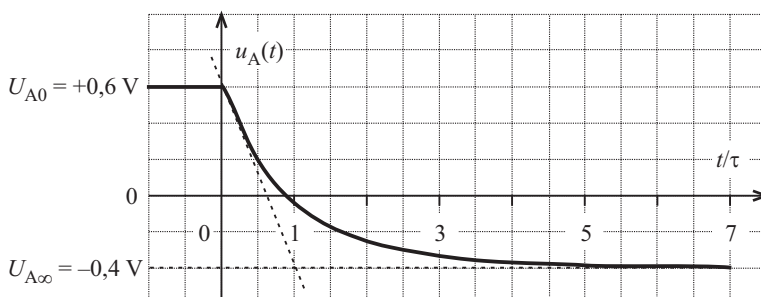
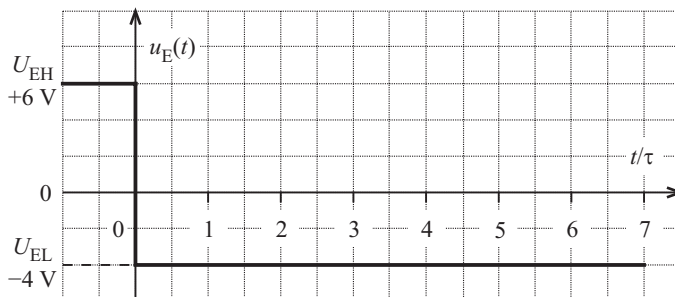
### Ü 2-5 Sinusspannung



**Ü 2-6** Sprungantwort



**Ü 2-7** Sprungantwort

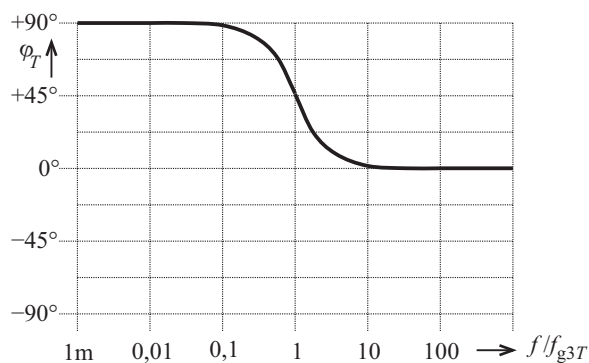
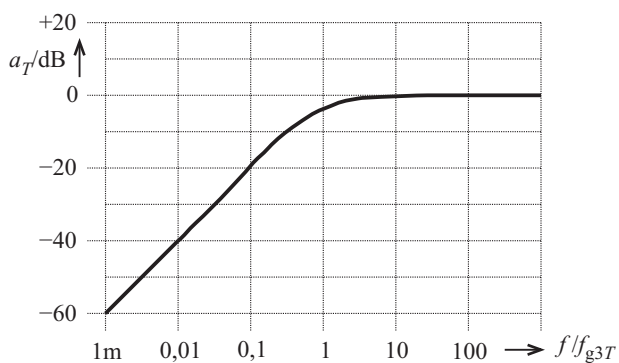


**Ü 2-8** Amplitudenberechnung  $\hat{i}_{C1} = 0,786 \mu\text{A}$ .

**Ü 2-10** Hochpass zur AC-Kopplung beim Oszilloskop.

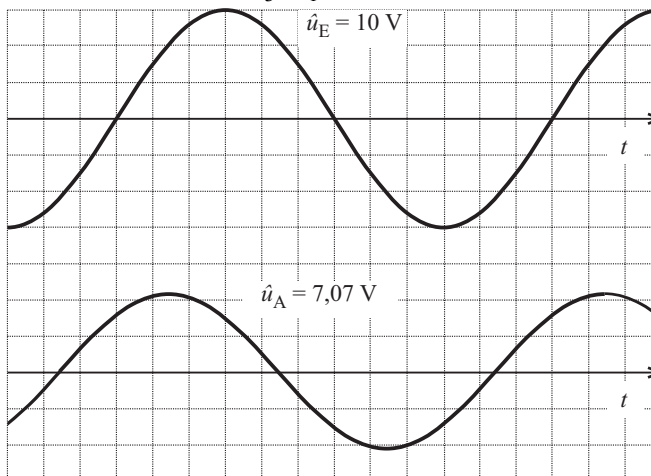
c) Lösung:  $T = \frac{\hat{u}_A}{\hat{u}_E} = \frac{j\omega \cdot C_3 \cdot R_1}{1 + j\omega \cdot C_3 \cdot R_1}$

d)  $T = |T| = \frac{\hat{u}_A}{\hat{u}_E} = \frac{\omega \cdot C_3 \cdot R_1}{\sqrt{1 + (\omega \cdot C_3 \cdot R_1)^2}} \quad a_T = 20 \text{ dB} \cdot \lg |T|$



f) Lösung:  $\varphi_T = +90^\circ - \arctan(\omega \cdot C_3 \cdot R_1)$     h)  $f_{g3T} = \frac{1}{\omega \cdot C_3 \cdot R_1}$

Ü 2-5 j)



**Ü 3-1** Kennlinienberechnung für ein Diodenmodell

$u_{pn}$	$x$	$i_F$
-10 V	0,0	-1 nA
-1 V	$5,4 \cdot 10^{-12}$	-1 nA
-0,2 V	0,0056	-0,99 nA
0 V	1,0	0,0 A
+0,2 V	179	+0,178 $\mu$ A
+0,4 V	$32 \cdot 10^{+3}$	+32 $\mu$ A
+0,6 V	$5,75 \cdot 10^{+6}$	+5,75 mA
+0,7 V	$76,9 \cdot 10^{+6}$	+76,9 mA
+1 V	$184 \cdot 10^{+9}$	+184 A

**Ü 3-2** Parameter-Extraktion von  $N$ ,  $I_S$  und  $R_S$  für die Diode 1N4001-X

- a) Lösung:  $U_T = 25,7$  mV. Achtung: in Gl. (3.2)  $T_J$  in Kelvin einsetzen!  
 b) Lösung:  $N = 1,69$  und  $I_S = 1$  nA.  
 c) Lösung:  $u_{PN} = 1,07$  V,  $R_S = 42,6$  m $\Omega$ ).

**Ü 3-3** Parameter-Verifikation

$i_F$	$u_{pn}$	$u_{RS}$	$u_F = u_{pn} + u_{RS}$
10 mA	700 mV	0,426 mV	0,700 V
1 A	900 mV	42,6 mV	0,943 V
10 A	1000 mV	426 mV	1,426 V
20 A	1030 mV	852 mV	1,882 V
30 A	1048 mV	1278 mV	2,326 V
50 A	1070 mV	2130 mV	3,200 V

**Ü 3-14** Parameterextraktion und -verifikation einer LED

- a) Lösungen:  $I_S = 0,096$  fA,  $N = 2,25$ ,  $R_S = 31,3$   $\Omega$   
 b) Lösung:  $R_L = 2$  M $\Omega$ .

**Ü 3-15** Berechnungen zur Einweg-Gleichrichtung

- a) Lösungen:  $\hat{u}_N = 17$  V,  $T = 20$  ms.  
 b) Lösung:  $u_{Cmin} = 13,6$  V.  
 c) Lösung:  $t_{SL} = 2,95$  ms.  
 d) Lösung:  $t_S = 17,95$  ms.  
 e) Lösung:  $du_C/dt = -3,4$  V / 17,95 ms = -189,4 V/s.  
 f) Hinweis: es geht mit Gl. (2.7):  $du_C = \Delta u_C = -3,4$  V,  $dt = \Delta t = t_S$ ,  $i_C = -i_L = -0,2$  A, Lösung: 1056  $\mu$ F. In der Praxis würde man einen Al-Elko mit Nennwert 1000  $\mu$ F und Nennspannung 25 V wählen.  
 g) Lösung: periodisch liegt ein Spitzenwert von 34 V an der Diode wenn  $i_L = 0$ . Die Diode müsste auf mindestens  $U_{RRM} = 50$  V ausgelegt werden. Geeignet wäre z. B. die kommerzielle Diode 1N4002 (1N4007).

**Ü 6-1** Worst-Case-Analyse mit Stepping

Lösungen (die Werte des Worst Case sind fett hervorgehoben)

$C_1$	$u_{C1max} / V$	$u_{C1min} / V$	$i_{F1max} / A$
800 $\mu F$	16,16	<b>11,83</b>	2,65
1000 $\mu F$	16,15	12,64	2,88
1500 $\mu F$	<b>16,12</b>	13,74	<b>3,22</b>

**Ü 6-4** Stepping eines „sprechenden“ Parameters

$B_V$	$U_{Aavg}$	$u_{Amax}$	$u_{Amin}$	$\Delta u_A$	$P_{SRR}$ $= \Delta u_A / \Delta u_E$	$P_{SR}$ $= 20dB \cdot \lg(P_{SRR})$
6,16 V	6,43 V	<b>6,51 V</b>	6,34 V	0,17 V	0,071	-23 dB
5,60 V	5,90 V	5,99 V	5,82 V	0,17 V	0,071	-23 dB
5,04 V	5,38 V	5,46 V	<b>5,30 V</b>	0,16 V	0,067	-23,5 dB

**Ü 6-5** Dimensionieren mit Stepping 2, Format auf 3 Digit Engineering eingestellt.

$C_1$	$u_{Amax}$	$u_{Amin}$	$\Delta u_A$	$P_{SRR}$ $= \Delta u_A / \Delta u_E$	$P_{SR}$ $= 20dB \cdot \lg(P_{SRR})$
47 $\mu F$	5,979 V	5,829 V	150 mV	0,0625	-24,1 dB
100 $\mu F$	5,964 V	5,845 V	119 mV	0,0496	-26,1 dB
220 $\mu F$	5,940 V	5,869 V	71 mV	0,0296	-30,6 dB
470 $\mu F$	5,923 V	5,887 V	36 mV	0,0150	-36,5 dB

**Ü 7-1** Thermische Berechnungen 1

- a) Lösung:  $P_{Dmax} = P_{tot} = 2,5 W$ .
- b) Lösung:  $P_{Dmax} = P_{tot} = 2,0 W$ .
- c) Lösung:  $P_{Dmax} = P_{tot} = 1,5 W$ .

**Ü 7-2** Thermische Berechnungen 2

- a) Lösung:  $C_{thJ} = 0,12 Ws/K$ .

b) Die Temperatur ändert sich zeitlich zwischen dem Anfangswert  $T_{J0} = +40^\circ C$  und dem Endwert  $T_{J\infty} = +140^\circ C$ . Die Differenz  $100^\circ C$  ist die Gesamtänderung und entspricht 100 %.

$t$	$e^{-t/\tau}$	$G_A = 1 - Z_A$	$Z_A$	$T_J(t)$
0	1	<b>0 %</b>	<b>100 %</b>	$40^\circ C = T_{J0}$
$t_{10} = 0,1 \cdot \tau_{th}$	0,905 $\approx$ 0,9	<b>10 %</b>	<b>90 %</b>	$40^\circ C + 10^\circ C = 50^\circ C$
$t_{50} = 0,7 \cdot \tau_{th}$	0,497 $\approx$ 0,5	<b>50 %</b>	<b>50 %</b>	$40^\circ C + 50^\circ C = 90^\circ C$
$t_{63} = 1,0 \cdot \tau_{th}$	0,368 $\approx$ 0,37	<b>63 %</b>	<b>37 %</b>	$40^\circ C + 63^\circ C = 103^\circ C$
$t_{90} = 2,3 \cdot \tau_{th}$	0,100 $\approx$ 0,1	<b>90 %</b>	<b>10 %</b>	$40^\circ C + 90^\circ C = 130^\circ C$
$t_{99} = 5,0 \cdot \tau_{th}$	0,007 $\approx$ 0,01	<b>99 %</b>	<b>1 %</b>	$40^\circ C + 99^\circ C = 139^\circ C$
$t_{100} > 6,9 \cdot \tau_{th}$	$< 0,001 \approx 0$	<b><math>\approx 100 %</math></b>	<b><math>\approx 0 %</math></b>	$40^\circ C + 100^\circ C = 140^\circ C = T_{J\infty}$

Als Kennwerte bei exponentiellen Änderungen einer Größe (hier  $T_J$ ) sind die mit  $Z_A$  (zu ändern) und  $G_A$  (geändert) bezeichneten Prozentzahlen und die dazugehörigen Zeitwerte hilfreich.  $Z_A$  lässt sich aus dem  $e^{-t/\tau}$ -Term ableiten. Diese Kennwerte sind wie folgt zu verstehen:

„Zum Zeitpunkt  $t$  hat sich die Größe (hier  $T_J$ ) ausgehend von ihrem Anfangswert (hier  $T_{J0}$ ) um  $G_A$  Prozent geändert und muss sich noch um  $Z_A$  Prozent ändern.“

- d)  $\Delta T_J = T_{Jmax} - T_{Jmin} = 90,35^\circ C - 89,85^\circ C = 0,5^\circ C$

**Ü 7-3** Thermische Berechnungen 3

- a) Lösung:  $P_{Dmax} = P_{tot} = 5 W$ .
- b) Lösung:  $R_{thHA} = 1,48 K/W$ ,  $T_H = +99,2^\circ C$ ,  $T_C = +109,2^\circ C$ .
- c) Lösung:  $P_{Dmax} = P_{tot} = 1,5 W$ .

**Ü 7-9** Temperatursimulation 1 einer Schaltung

- a) Lösung:  $P_{DR1} = 188 mW$ ,  $P_{DD1} = 98 mW$ ,  $P_{DR2} = 1,2 W$ ,  $P_{DQ1} = 2,2 W$ .
- b) Lösung:  $T_{JA} = 29,4 K$ .
- c) Lösungen:  $P_{DQ1} = 1,15 W$ .  $R_{thHA} = 41,3 K/W$ .  $T_{JA} = 79,2 K$ .
- d) Lösung:  $P_{tot70} = 0,607 W \approx 0,6 W$ .  $T_{Jmax} = +126^\circ C \approx +125^\circ C$ . Lösung:  $T_{JA} = 84 K$ .
- e) Lösung:  $B = i_C/i_B = 239 mA/1,98 mA = 121$ .

**Ü 9-2** Temperatur-Simulation Pt100 (UE\_9-2\_RES\_PT100.CIR)

- b) Vergleichen Sie die simulierten und durch die Koeffizienten genähert berechneten Werte mit denen in einer Norm angegebenen Werten ( $R_{Pt100}$ ).

$T_J$	$R_{Pt100}$ in $\Omega$	$R_{(R1)}$ in $\Omega$	Formel
0 °C	100,00	100,00	100,00
+100 °C	138,50	138,50	138,50
+200 °C	175,84	175,84	177,00
+400 °C	247,04	247,04	254,00

**Ü 9-8** Berechnen einer Formel für eine nichtlineare Induktivität ( $L \neq L_d \neq \text{const.}$ )

- b) Berechnen Sie für die angegebenen Werte von  $i_L$  den Wert von  $H_{iL}$  gemäß Gl. (9.1) und  $L_d$  gemäß Gl. (9.18). Der Wert, der sich aus dem Ansatz  $\Psi/i_L$  ergibt, ist nur zum Vergleich bereits eingetragen, die Einheit H wurde bewusst nicht verwendet.

$i_L / A$	$H_{iL}$ kA/m	$\Psi/i_L$ in Vs/A	$L_d$
-44	-100	$36,5 \cdot 10^{-6}$	17,9 $\mu\text{H}$
0	0	$97,1 \cdot 10^{-6}$	97,1 $\mu\text{H}$
+44	+100	$36,5 \cdot 10^{-6}$	17,9 $\mu\text{H}$
+88	+200	$25,5 \cdot 10^{-6}$	12,6 $\mu\text{H}$

**Ü 10-2** Die erste Ziffer bei den kommerziellen Bauelement-Namen „1N...“, „2N...“ gibt die Anzahl der pn-Übergänge in diesem Bauelement an.

**Ü 10-3** Lösung:  $f_{g3\beta} = 571$  kHz

**Ü 10-8c** Lösung: Das Schaltverhalten wird mit  $t_{on} = 0$  und  $t_{off} = 0$  ideal simuliert, weil die Defaultwerte so gewählt sind, dass keine Zeitabhängigkeit simuliert wird.

## 5.1 Vergleichsliste deutscher mit amerikanischen Tastenbezeichnungen

Die Tabelle enthält einen Vergleich zwischen Tastensymbolen bzw. im Buch verwendeten Bezeichnungen von Tastaturen mit deutschem Layout und den in [MC-REF] verwendeten Bezeichnungen, die sich auf Tastaturen mit amerikanischem Layout beziehen.

lfd Nr.	im Buch verwendete Darstellung	Bezeichnung	in [MC-REF]
1	<↑>	Umschalttaste, Hochstelltaste	SHIFT
2	<Enter> (Tastensymbol ↵)	Eingabetaste, Returntaste, Entertaste	ENTER
3	<Strg>	Steuerung	CTRL ( <i>Control</i> )
4	<Alt>	Alternative	ALT ( <i>Alternate</i> )
5	<Alt Gr>	Alternative Grafik	ALT GR ( <i>Alternate Graphics</i> )
6	<Leerzeichentaste>	Leerzeichentaste	SPACEBAR
7	<Entf>	Entfernen	DELETE ( <i>Del</i> )
8	<Einfg>	Einfügen	INSERT ( <i>Ins</i> )
9	<Esc>	Abbruch	ESC ( <i>Esape</i> )
10	<F1> bis <F12>	Funktionstasten	F1 bis F12 ( <i>Function</i> )
11	<Pause>	Pause	PAUSE
12	<Pos1>	Position 1, Fensteranfang	HOME
13	<Ende>	Ende, Dateiende	END
14	<Bild↑> <Bild↓>	Bildschirmanzeige nach oben/unten springen lassen	PGUP ( <i>Page Up</i> ) PGDN ( <i>Page Down</i> )
15	<←> <→> <↑> <↓>	Pfeiltasten	<CURSOR KEY>
16	<↑> <↓>	Pfeiltasten	UP ARROW DOWN ARROW
17	<←> <→>	Pfeiltasten	LEFT ARROW RIGHT ARROW
18	<Num−>	Minus-Taste im Numerik-Tastaturblock (auch Zehnertastatur genannt)	Numeric pad −
19	<Num+>	Plus-Taste im Numerik-Tastaturblock	Numeric pad +

## 5.2 Allgemein anwendbare Tasten/Tastenkombinationen

Die Tabelle enthält *alle Angaben* aus dem Anhang *Appendix D - Accelerator Keys General* aus [MC-REF]. Diese Tasten/Tastenkombinationen **sind allgemein anwendbar**. Probieren Sie die Tasten/Tastenkombinationen aus, die Ihnen interessant scheinen und markieren Sie sich diese.

lfd Nr.	Taste/n	Bedeutung
1	<↑>	Wenn Sie eine Verbindungslinie anfangen zu zeichnen, <↑> drücken und weiterzeichnen. Die Linie verläuft entweder senkrecht oder waagrecht.
2	<↑> + <F4>	<i>Tile Vertical</i> (dt. vertikal kacheln, fliesen). Teilt den Bildschirm in zwei Spalten.
3	<↑> + <F5>	<i>Cascade</i> . Ordnet Fenster als Kaskade (hintereinanderliegend) an.
4	<Alt> + <Druck>	<i>Copies front window to clipboard</i> . Kopiert das aktive Fenster in den Zwischenspeicher. Kann mit <Strg> + <V> in andere Anwendung eingefügt werden.
5	<Alt> + <F10>	<i>Default Properties</i> . Aktiviert die Defaultwerte für Dialogfenster <i>Properties</i> .
6	<Alt> + <F4>	<i>Exit</i> . Beendet MC.
7	<Alt> + <Z>	<i>Statistics</i> . Öffnet ein Fenster mit statistischen Infos, Key-ID und Versions-Nr.
8	<Entf>	<i>Clear</i> . Löscht markiertes Objekt <i>ohne</i> Kopie im Zwischenspeicher.
9	<F1>	<i>Help</i> . Öffnet das Hilfe-Fenster von MC.
10	<F10>	<i>Properties</i> . Öffnet Dialogfenster <i>Properties</i> .
11	<Strg> + <↑> + <B>	<i>Bill of Materials</i> . Öffnet Dialogfenster für Liste der Modell-Elemente.
12	<Strg> + <↑> + <F>	<i>Find Component</i> . Öffnet Dialogfenster zur Suche nach einem Modell-Element.
13	<Strg> + <↑> + <G>	<i>Global Settings</i> . Öffnet Dialogfenster <i>Global Settings</i> .
14	<Strg> + <↑> + <I>	<i>IBIS Translator</i> . Öffnet Übersetzer für IBIS-Modelle in SPICE-Modelle.
15	<Strg> + <↑> + <P>	<i>Preferences</i> . Öffnet Dialogfenster <i>Preferences</i> (bevorzugte Voreinstellungen).
16	<Strg> + <↑> + <W>	<i>Print Active Window</i> . Druckt das aktive Fenster auf Drucker aus.
17	<Strg> + <0>	<i>Main Tool Bar</i> . Blendet Hauptwerkzeugleiste ein/aus.
18	<Strg> + <1> bis <9>	<i>Component Palette 1-9</i> . Blendet Modell-Element-Paletten 1 bis 9 ein/aus.
19	<Strg> + <A>	<i>Select All</i> . Markiert alle Objekte.
20	<Strg> + <Alt> + <R>	<i>Revert File</i> . Lädt gespeicherte Datei d. aktiven Fensters erneut von Festplatte.
21	<Strg> + <C>	<i>Copy</i> . Kopiert markiertes Objekt in den Zwischenspeicher.
22	<Strg> + <Druck>	<i>Copies entire screen to clipboard</i> . Kopiert den gesamten Bildschirminhalt in den Zwischenspeicher.
23	<Strg> + <Entf>	<i>Clear Cut wire</i> . Verbindungen werden innerhalb eines Rechtecks gelöscht.
24	<Strg> + <F>	<i>Find</i> . Öffnet Dialogfenster <i>Find</i> zur Suche nach einer Zeichenkette.
25	<Strg> + <F4>	<i>Close Open Window</i> . Schließt geöffnetes Fenster.
26	<Strg> + <F6>	<i>Next Window</i> . Aktiviert nächstes Fenster.
27	<Strg> + <Num+>	<i>Zoom-In</i> . Vergrößert Fensterinhalt.
28	<Strg> + <Num->	<i>Zoom-Out</i> . Verkleinert Fensterinhalt.
29	<Strg> + <N>	<i>New File</i> . Öffnet Dialogfenster <i>New</i> für neue Schaltplaneingabe.
30	<Strg> + <O>	<i>Open File</i> . Öffnet Dialogfenster <i>Open</i> für vorhandene Schaltplandatei.
31	<Strg> + <P>	<i>Print</i> . Öffnet Dialogfenster <i>Print</i> zur Ausgabe auf einen Drucker.
32	<Strg> + <S>	<i>Save File</i> . Speichert aktive Schaltplandatei auf Festplatte.
33	<Strg> + <V>	<i>Paste</i> . Fügt Inhalt des Zwischenspeichers ein.
34	<Strg> + <X>	<i>Cut</i> . Schneidet markiertes Objekt aus mit Kopie im Zwischenspeicher.
35	<Strg> + <Y>	<i>Redo</i> . Wiederholt vorherige Aktion.
36	<Strg> + <Z>	<i>Undo</i> . Macht vorherige Aktion rückgängig.

### 5.3 Bei aktivem Schaltplan-Eingabefenster anwendbare Tasten/-kombinationen

Die Tabelle enthält *alle Angaben* aus dem Anhang *Appendix D - Accelerator Keys Schematic/Text Area* aus [MC-REF]. Diese Tasten/Tastenkombinationen sind **bei Schaltplanseiten und Textseiten anwendbar**. Probieren Sie die Tasten/Tastenkombinationen aus, die Ihnen interessant scheinen.

lfd Nr. Taste/n	Bedeutung
37 <Alt> + <1>	Startet eine TR-Analyse.
38 <Alt> + <2>	Startet eine AC-Analyse.
39 <Alt> + <3>	Startet eine DC-Analyse.
40 <Alt> + <4>	Startet eine Dynamic-DC-Analyse.
41 <Alt> + <5>	Startet eine Dynamic-AC-Analyse.
42 <Alt> + <6>	Startet eine Sensitivity-Analyse.
43 <Alt> + <7>	Startet eine Transfer-Function-Analyse.
44 <Alt> + <8>	Startet eine Distortion-Analyse (Analyse von Verzerrungen).
45 <Bild↑>, <Bild↓>	<i>Pan Up/Down One Page</i> . Verschiebt Ansicht um eine Seite.
46 <Entf>	<i>Clear</i> . Löscht markiertes Objekt <i>ohne</i> Kopie im Zwischenspeicher.
47 <F3>	<i>Repeat last Find</i> . Wiederholt Einstellung des Dialogfensters <i>Find</i> .
48 <Leerzeichentaste>	<i>Toggle between Select Mode and current mode</i> . Wechsel zwischen Select-Modus und aktuellem Modus.
49 <Strg>+<←>,<→>,<↑>,<↓>	<i>Pan Left, Right, Up, Down</i> . Verschiebt <i>Ansicht</i> in Pfeilrichtung.
50 <Strg> + <↑> + <R>	<i>Toggle Rubberbanding</i> . Aktiviert/deaktiviert Gummibandverbindungen.
51 <Strg> + <'>	<i>Match Parenthesis</i> . Hilft auf einer Textseite die zu einer öffnenden Klammer zugehörige schließende Klammer zu identifizieren. Die Taste <'> ist rechts von der Taste <? ß \>.
52 <Strg> + <Alt> + <1>	<i>Probe TR</i> . Startet eine TR-Analyse im Probe-Modus.
53 <Strg> + <Alt> + <2>	<i>Probe AC</i> . Startet eine AC-Analyse im Probe-Modus.
54 <Strg> + <Alt> + <3>	<i>Probe DC</i> . Startet eine DC-Analyse im Probe-Modus.
55 <Strg> + <B>	<i>Move text</i> . Text markieren; mit <Strg> + <B> wird Text von einer Textseite auf eine Schaltplanseite <i>verschoben</i> oder umgekehrt.
56 <Strg> + <Bild↑>	<i>Pan Left One Page</i> . Verschiebt Ansicht um eine Seite nach links.
57 <Strg> + <Bild↓>	<i>Pan Right One Page</i> . Verschiebt Ansicht um eine Seite nach rechts.
58 <Strg> + <D>	<i>Component Mode</i> . Aktiviert Modus zur Eingabe von Modell-Elementen.
59 <Strg> + <E>	<i>Select Mode</i> . Aktiviert Modus zum Auswählen von Objekten.
60 <Strg> + <Ende>	<i>Lower Right Schematic Corner</i> . Bildschirm zeigt untere rechte Ecke der Schaltplanseite.
61 <Strg> + <Pos1>	<i>Upper Left Schematic Corner</i> , Bildschirm zeigt obere linke Ecke der Schaltplanseite.
62 <Strg> + <G>	<i>Toggle Drawing/Text</i> . Wechselt zwischen Schaltplan- und Textseite.
63 <Strg> + <H>	<i>Help Mode</i> . Aktiviert den Hilfe-Modus.
64 <Strg> + <I>	<i>Info Mode</i> . Aktiviert den Info-Modus.
65 <Strg> + <M>	<i>Make Macro</i> . Speichert einen markierten Schaltplanteil als <i>Macro</i> .
66 <Strg> + <R>	<i>Rotate Box</i> . Dreht ausgewähltes Objekt.
67 <Strg> + <T>	<i>Text Mode</i> . Aktiviert den Modus zur Eingabe von Text.
68 <Strg> + <W>	<i>Wire Mode</i> . Aktiviert den Modus zum Ziehen von Verbindungslinien.

## 5.4 Bei aktivem Analyse-Ausgabefenster anwendbare Tasten/-kombinationen

Die Tabelle enthält *alle Angaben* aus dem Anhang *Appendix D - Accelerator Keys Schematic / Text Area* aus [MC-REF]. Diese Tasten/Tastenkombinationen sind **bei aktivem Analyse-Ausgabefenster anwendbar**. Probieren Sie die Tasten/Tastenkombinationen aus, die Ihnen interessant scheinen und markieren Sie sich diese.

lfd Nr. Taste/-n	Bedeutung
69 <P>	<i>P-Key</i> . Bei laufender Analyse kann die Anzeige von Zahlenwerte ein-/ausgeschaltet werden. Die Anzeige verlangsamt die Analyse, gibt aber bei langen Rechenzeiten einen Eindruck, welche Ergebnisse zu erwarten sind.
70 <←>, <→>	Im <i>Cursor Mode</i> : linker <i>C.</i> schrittweise nach links/rechts (S. 119).
71 <↑> + <←>, <→>	Im <i>Cursor Mode</i> : rechter <i>C.</i> schrittweise nach links/rechts (S. 119).
72 <↑>, <↓>	Im <i>Cursor Mode</i> : linker <i>C.</i> von Kurvenzweig zum nächsten (S. 141).
73 <↑> + <↑>, <↓>	Im <i>Cursor Mode</i> : rechter <i>C.</i> von Kurvenzweig zum nächsten (S. 141).
74 <Alt> + <Pos1>	Im <i>Cursor Mode</i> : platziert <i>C.</i> auf oberstem Kurvenzweig (S. 141).
75 <Alt> + <Ende>	Im <i>Cursor Mode</i> : platziert <i>C.</i> auf unterstem Kurvenzweig (S. 141).
76 <F2>	<i>Run</i> . Startet einen Simulationslauf.
77 <F3>	Beendet eine DC-, AC-, TR-Analyse.
78 <↑> + <F3>	Beendet eine Dynamic DC-, Dynamic-AC-Analyse.
79 <F4>	Öffnet Ausgabefenster einer Analyse.
80 <F5>	Öffnet Textdatei <i>*.*NO</i> mit Werten von <i>Numeric Output</i> (S. 127).
81 <F6>	Im <i>Scale Mode</i> : Führt ein <i>Auto Scale</i> durch (S. 117).
82 <F7>	Aktiviert den <i>Scale Mode</i> .
83 <F8>	Aktiviert den <i>Cursor Mode</i> .
84 <F9>	Öffnet das Dialogfenster <i>... Analysis Limits</i> (Kap. 2).
85 <F11>	Öffnet Dialogfenster <i>Stepping</i> .
86 <F12>	Öffnet Dialogfenster <i>State Variables Editor</i> .
87 <Strg> + <←>, <→>, <↑>, <↓>	Verschiebt Diagramm mit ausgewählter Kurve ( <u>unterstrichen</u> ).
88 <Strg> + <↑> + <C>	Blendet die <i>Tracker</i> an den <i>Cursorn</i> ein/aus.
89 <Strg> + <↑> + <H>, <V>	Wie <i>SF Horizontal Tag Mode</i> bzw. <i>Vertical Tag Mode</i> (S. 121).
90 <Strg> + <↑> + <X>, <Y>	Im <i>Cursor Mode</i> : Öffnet Dialogfenster <i>Goto X, Goto Y</i> (S. 120).
91 <Strg> + <F9>	Bei Ausgabe mit <i>Probe</i> : Delete all Plots.
92 <Strg> + <F11>	Öffnet Dialogfenster <i>Optimize</i> .
93 <Strg> + <I>	Im <i>Cursor Mode</i> : Blendet <i>Tracker</i> an Diagrammrändern ein/aus.
94 <Strg> + <L>, <R>	Im <i>Cursor Mode</i> : Platziert einen <i>Tag</i> am linken/rechten <i>Cursor</i> (S. 121).
95 <Strg> + <M>	Blendet <i>Tracker</i> am Mauszeiger ein/aus.
96 <Strg> + <N>	Im <i>Cursor Mode</i> : Normiert die Skala der ausgewählten Kurve auf den <i>y</i> -Wert, den der zuletzt bewegte <i>Cursor</i> für diese Kurve anzeigt.
97 <Strg> + <Pos1>	Stellt die ursprüngliche Skalierung wieder her.
98 <Strg> + <W>	Öffnet das Dialogfenster <i>Watch</i> .

## 5.5 Bei Textseiten/Textdateien u. 3-D-Ausgaben anwendb. Tasten/-kombinationen

Die Tabelle enthält *alle Angaben* aus dem Anhang *Appendix D - Accelerator Keys Text Area / Text File* aus [MC-REF]. Diese Tasten/Tastenkombinationen sind **bei Textseiten und Textdateien anwendbar**. Probieren Sie die Tasten/Tastenkombinationen aus, die Ihnen interessant scheinen und markieren Sie sich diese.

lfd Nr. Taste/-n	Bedeutung
101 <Alt> + <F1>	<i>Help</i> . Öffnet das Hilfe-Fenster von MC in einer SPICE-Datei/Netzliste (*.CKT).
102 <Strg> + <D>	<i>Delete line</i> . Löscht Rest der Zeile, in der die Schreibmarke ist.
103 <Strg> + <L>	Buchstaben einer markierten Zeichenkette werden kleingeschrieben.
104 <Strg> + <U>	Buchstaben e. markierten Zeichenkette w. GROSSGESCHRIBEN.

Die Tabelle enthält *alle Angaben* aus dem Anhang *Appendix D - Accelerator Keys 3D Plot* aus [MC-REF]. Diese Tasten/Tastenkombinationen sind **bei 3-D-Ansichten anwendbar**. Probieren Sie die Tasten/Tastenkombinationen aus, die Ihnen interessant scheinen und markieren Sie sich diese.

lfd Nr. Taste/-n	Bedeutung
105 <Q>, <A>	<i>Clockwise/Counterclockwise X</i> . Dreht Ansicht im/gegen Uhrzeigersinn um x-Achse.
106 <W>, <S>	<i>Clockwise/Counterclockwise Y</i> . Dreht Ansicht im/gegen Uhrzeigersinn um y-Achse.
107 <E>, <D>	<i>Clockwise/Counterclockwise Z</i> . Dreht Ansicht im/gegen Uhrzeigersinn um z-Achse.
108 <C>	<i>Toggle Contour /3D</i> . Wechselt zwischen Kontur- und 3D-Ansicht.
109 <X>	<i>Perpendicular to x = 0</i> . Erzeugt ein Schnittbild bei $x = 0$ .
110 <Y>	<i>Perpendicular to y = 0</i> . Erzeugt ein Schnittbild bei $y = 0$ .
111 <Z>	<i>Perpendicular to z = 0</i> . Erzeugt ein Schnittbild bei $z = 0$ .

## 6.1 Zahlen, Vorsätze und Einheiten in MC9

### ① In MC ist das Dezimaltrennzeichen bei Zahlen der Punkt ( . ).

Ein Komma ( , ) ist nur ein Trennzeichen zwischen mehreren Eingabegrößen.

MC kennt folgende Vorsätze:

- ① Bei der Eingabe von Buchstaben in MC ist GROSS- oder kleinschreibung egal. Der Buchstabe „m“ oder „M“ hinter einer Zahl bedeutet stets den Vorsatz Milli =  $10^{-3}$ !

**Für den Vorsatz Mega =  $10^{+6}$  Kürzel „MEG“ („meg“) verwenden!**

Für den Vorsatz Mikro =  $10^{-6}$  ist der lateinische Buchstabe „u“ zu verwenden, da MC keine griechische Buchstaben wie „μ“ oder „Ω“ kennt.

Nebenstehend alle Vorsätze, die MC kennt.

**Kein Leerzeichen zwischen Zahl und Vorsatz!**

T	(Tera...)	= $10^{+12}$
G	(Giga...)	= $10^{+9}$
<b>MEG</b>	<b>(Mega...)</b>	<b>= <math>10^{+6}</math></b>
K	(Kilo...)	= $10^{+3}$
M	(Milli...)	= $10^{-3}$
U	(Mikro...)	= $10^{-6}$
N	(Nano...)	= $10^{-9}$
P	(Pico...)	= $10^{-12}$
F	(Femto...)	= $10^{-15}$

- ① **Ausnahme:** Um in Ausgabefenstern bei den Skalen von Diagrammen Platz zu sparen, wird dort von MC zwischen „m“ = Milli und „M“ = Mega unterschieden!

Vorsätze bzw. der Ausdruck „Ex“ bzw. „ex“ (=  $10^x$ ) ist direkt hinter einer Zahl ohne Leerzeichen einzugeben.

Zahlenwerte können in verschiedenen Formaten eingegeben werden:

Art der Darstellung	Bsp. A	Bsp. B	Bsp. C	Bsp. D
als reelle Zahl:	1.23	-4567.8	1500000	-0.0009876
als Fließkommazahl:	0.123e1	-4.5678E3	1.5e+6	-987e-6
mit Vorsätzen (in [MC-REF] <i>standard engineering notation</i> genannt)	1230m 0.00123k	-4.5678K -0.0045678MEG	1500k 1.5meg	-0.9876m -987.6u
mit Vorsatz als Dezimaltrennzeichen (in [MC-REF] <i>international engineering notation</i> genannt)	1R23	-4K5678	1meg5	-0m987 -987u6

MC arbeitet ohne Einheiten! Möchten Sie die Bedeutung einer Zahl durch Angabe der Einheit für sich und/oder andere verdeutlichen, können Sie in der Elektrotechnik/Elektronik verwendete Einheiten ohne Leerzeichen hinter der Zahl/dem Vorsatz eingeben. MC ignoriert diese Eingabe, da es diese Zeichen wie V, A, W, Ohm, H, s, Hz usw. als Vorsätze nicht kennt.

- ① Sehr seltene Fehlermöglichkeiten:

Der Kondensator  $C_1$  soll den Wert  $C_1 = 5 F = 5000 \text{ mF}$  haben und Sie geben „5F“ ein. Dies interpretiert MC als  $5 \text{ fF} = 5 \cdot 10^{-15} \text{ F}$  und damit wird das Simulationsergebnis völlig unerwartet. Die Eingabe „5000mF“ ergibt dagegen den gewünschten Wert für  $C_1$  und den Hinweis auf die Einheit.

Die Spannung der Sinus-Spannungsquelle  $V_2$  soll den Nullphasenwinkel  $\varphi_{(V_2)} = +30^\circ$  haben und Sie geben „+30Grad“ ein. Dies interpretiert MC als  $30 \text{ G} = 30 \cdot 10^{+12}$ . Die Eingabe „+30Deg“ (*degree*) ergibt dagegen den gewünschten Wert und den Hinweis auf die Einheit.

## 6.2 Konstanten und Analyse-Variablen in MC9

E. = Einheit

Nr.	Benennung	E.	bedeutet
1	PI	–	$= 3,141\ 592\ 653\ 589\ 793 \approx \pi$
2	E	–	$= 2,718\ 281\ 828\ 459\ 045 \approx e$ (eulersche Zahl)
3	J	–	Imaginäre Einheit $j$ , die bei komplexen Zahlen $\underline{k}$ verwendet wird und den Imaginärteil kennzeichnet, z. B. $\underline{k} = +3 + j \cdot (-4)$ mit (+3) als Wert des Realteils und (-4) als Wert des Imaginärteils.
4	TEMP	°C	Wert der Temperatur bei einer Analyse und Defaultwert der Innentemperatur $T_J$ bei einer Analyse.
5	VT	V	Wert der Temperaturspannung in Modellen von Halbleiter-Bauelementen. $VT = (1,380\ 622\ 6) \cdot 10^{-23} \cdot (273,15 + T_J) / (1,602\ 191) \cdot 10^{-19}$
6	CASE	–	Fallnummer in der Monte-Carlo-Analyse
7	DCINPUT1		Wert von <i>Variable 1</i> bei einer DC-Analyse
8	DCMIN, DCMAX		Startwert, Endwert von <i>Variable 1</i> bei einer DC-Analyse
9	T	s	Zeit-Variable bei einer TR-Analyse
10	TMAX, TMIN	s	Endwert, Startwert des Zeitbereichs ( <i>Time Range</i> ) bei einer TR-Analyse
11	DT	s	Zeitschrittweite bei einer TR-Analyse
12	F	Hz	Frequenz-Variable bei AC-Analyse
13	FMAX, FMIN	Hz	Endwert, Startwert des Frequenzbereichs ( <i>Frequency Range</i> ) bei einer AC-Analyse
14	S	rad/s	$S = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot F$ . Damit ist die MC-Variable S nicht die aus der Laplace-Transformation bekannte komplexe Kreisfrequenz $\underline{s}$ mit $\underline{s} = \sigma + j \cdot \omega$ , sondern nur deren Imaginärteil $j \cdot \omega$ . Der Ausdruck „RE(S)/F“ ergibt den Wert 0, der Ausdruck „IM(S)/F“ ergibt den Wert $2 \cdot \pi$ . Die Unterstreichung des Buchstabens $\underline{s}$ ist in der Literatur unüblich, wird hier der Klarheit wegen aber gemacht, da es sich um eine komplexe Größe handelt.
15	ONoise	V/ $\sqrt{\text{Hz}}$	Wert der Rauschspannung am Ausgang (bei einer AC-Analyse)
16	INoise	V/ $\sqrt{\text{Hz}}$	Wert der Rauschspannung am Eingang ( $u_{\text{INoise}} = u_{\text{ONoise}} / \text{gain}$ )
alle	GS-Parameter		aus dem Dialogfenster <i>Global Settings</i>

### 6.3 Mathematische Operatoren in MC9

- $n, m$  repräsentieren eine ganze Zahl (*integer number*,  $-5, +3, \dots$ )
- $u, x, y$  repräsentieren eine reelle Zahl (*real number*,  $-1.23, +0.456, \dots$ )
- $k = a + j \cdot b$  repräsentiert eine komplexe Zahl mit  $a = \text{Real-}$  u.  $b = \text{Imaginärteil}$  ( $5 \angle 60^\circ = 2,5 + j \cdot 4,33$ )
- $de, df$  repräsentieren einen logischer Wert eines Digitalknotens (0, 1)
- $S$  repräsentiert ein Spektrum, das von einem DSP-Operator berechnet wird
- $dt$  Zeitschrittweite beim DSP (*digital signal processing*)

① Wenn ein Operator/eine Funktion auf komplexe Zahlen  $k$  anwendbar ist, ist er auch auf reelle Zahlen  $u, x, y$  anwendbar. Achtung: Die reelle Zahl wird als komplexe Zahl mit  $b = \text{Im}\{k\} = 0$  interpretiert.

Die Tabelle enthält alle **mathematischen Operatoren** in MC9.

lfd Nr.	Operator	Bedeutung, Beispiel
1	$+, -, *, /$	Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division (auch für $k$ )
2	$k^*x, k^x$	$k^x$ , identisch zur Funktion POW( $k, x$ ), $-5^2 = -25, 4^{*0.5} = 2$
3	$y \text{ DIV } x$	Ganzzahl-Division, d. h. das Ergebnis wird auf eine ganze Zahl <i>abgerundet</i> (z. B. $17 \text{ DIV } 5 = 3$ , auch für $k$ )
4	$y \text{ MOD } x$	Modulo-Operator, Rest nach ein Ganzzahl-Division (z. B. $17 \text{ MOD } 5 = 2$ )
5	$x < y$	Ein Beispiel ist Ü 3-22 (Schalter mit logisch gesteuertem Widerstand)
6	$x > y$	ergibt TRUE bzw. 1, wenn $x$ <i>größer</i> als $y$ ist, ansonsten FALSE bzw. 0.
7	$x \leq y$	dito mit <i>kleiner oder gleich</i>
8	$x \geq y$	dito mit <i>größer oder gleich</i>
9	$x \neq y$ $x <> y$	dito mit <i>ungleich</i> , Antivalenz
10	$x = y$	dito mit <i>gleich</i> , Äquivalenz
11	$\&$	analoges AND (aus SPICE3)
12	$ $	analoges OR (aus SPICE3)
13	$\sim$	analoges NOT (aus SPICE3)
14	$( ) \text{AND}( )$	Und-Verknüpfung
15	$( ) \text{NAND}( )$	Nicht-Und-Verknüpfung
16	$( ) \text{OR}( )$	Oder-Verknüpfung
17	$( ) \text{NOR}( )$	Nicht-Oder-Verknüpfung
18	$( ) \text{XOR}( )$	Antivalenz, Exklusiv-Oder-Verknüpfung
19	$( ) \text{NOT}( )$ !	Negierung

## 6.4 Mathematische Funktionen in MC9

Die Tabelle enthält eine Auswahl der **mathematischen Funktionen** in MC9. Für die restlichen Funktionen siehe [MC-REF]. Im Buch verwendete/erklärte Funktionen finden Sie im Sachwortregister unter dem Stichwort „Funktionen in MC“.

- ☞  $n, m$  repräsentieren eine ganze Zahl (*integer number*,  $-5, +3, \dots$ )
- $u, x, y$  repräsentieren eine reelle Zahl (*real number*,  $-1.23, +0.456, \dots$ )
- $\underline{k} = a + j \cdot b$  repräsentiert eine komplexe Zahl mit  $a = \text{Real-}$  u.  $b = \text{Imaginärteil}$  ( $5\angle 60^\circ = 2,5 + j \cdot 4,33$ )
- [ ] optionale Eingabe
- MB1 Modell-Bezeichner eines Modell-Elements wie z. B. R3, C5, usw.

lfd Nr. Funktion	ergibt bzw. Bedeutung bzw. Beispiel									
ABS( $\underline{k}$ )	$ \underline{k}  = +(a^2 + b^2)^{1/2}$ ( <i>absolute</i> ), ergibt den Betrag, ABS( $\underline{k}$ ) ist identisch zu MAG( $\underline{k}$ )									
SQRT( $\underline{k}$ )	$+\underline{k}^{1/2}$ ( <i>square root</i> )									
POW( $\underline{k}, x$ )	$\underline{k}^x = e^{x \cdot \ln(\underline{k})}$ ( <i>k to the power of x</i> ), ist identisch zu $\underline{k}^x$ oder $\underline{k}^{**x}$									
PWR( $y, x$ )	$+ y ^x$ ( <i>power real</i> ), PWR( $\underline{k}, x$ ) = $a^x$ bei $\underline{k} = a + j \cdot b$									
PWRS( $y, x$ )	ergibt bei $y > 0$ : $+ y ^x$ , bei $y < 0$ : $- y ^x$ , ( <i>power real signed</i> )									
INT( $x$ )	rundet auf Ganzzahl ( <i>integer</i> ) ab									
NINT( $x$ )	rundet auf <i>nächstliegende</i> Ganzzahl ( <i>nearest integer</i> ) auf oder ab									
MAG( $\underline{k}$ )	$ \underline{k}  = +(a^2 + b^2)^{1/2}$ ( <i>magnitude</i> ), MAG( $\underline{k}$ ) ist identisch zu ABS( $\underline{k}$ )									
DB( $\underline{k}$ )	$20 \cdot \lg( \underline{k} )$ ( <i>decibel</i> ), <b>20*LOG(<math>\underline{k}</math>) ergibt was anders als DB(<math>\underline{k}</math>) !</b>									
PH( $\underline{k}$ )	$\varphi_{\underline{k}} = \arctan(b/a)$ in <b>Grad</b> ( <i>phase</i> ), nur in Ausgabefenstern anwendbar									
GD( $\underline{k}$ )	$-d\varphi(\omega)/d\omega$ , $-d[\pi \cdot P_H(\underline{k})/180] / d[2 \cdot \pi \cdot F]$ ( <i>group delay</i> ), Gruppenlaufzeit									
RE( $\underline{k}$ )	$a$ , Realteil von $\underline{k}$									
IM( $\underline{k}$ )	$b$ , Imaginärteil von $\underline{k}$									
SIN( $\underline{k}$ )	SIN( $\pi/2$ ) = 1, SIN( $\pi/4$ ) = 0.70711 $\approx 1/\sqrt{2}$									
COS( $\underline{k}$ )	COS( $\pi/2$ ) = 0, COS( $\pi/4$ ) = 0.70711									
TAN( $\underline{k}$ )	TAN( $\pi/4$ ) = 1, TAN( $\pi/2$ ) = $16331 \cdot 10^{+12} \approx \infty$									
ASIN( $\underline{k}$ )	ASIN(1) = 1.57 $\approx \pi/2$ , ASIN(0.70711) = 785.4m $\approx \pi/4$									
ACOS( $\underline{k}$ )	ACOS(1) = 0, COS(0.70711) = 785.4m $\approx \pi/4$									
ATAN( $\underline{k}$ )	ATAN(1) = 785.4m $\approx \pi/4$ , ATAN(1e99) = 1.57 $\approx \pi/2$ , ATAN(-2+j*2)=1.31+j*0.239									
ATAN2( $b, a$ )	= $\arctan(b/a)$ wenn $a = \text{Re}\{\underline{k}\} > 0$ = $+\pi + \arctan(b/a)$ wenn $a = \text{Re}\{\underline{k}\} < 0$ und $b = \text{Im}\{\underline{k}\} \geq 0$ = $-\pi + \arctan(b/a)$ wenn $a = \text{Re}\{\underline{k}\} < 0$ und $b = \text{Im}\{\underline{k}\} < 0$									
	<table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">ATAN2 (+1, -1) = +2.36 = +3<math>\pi/4</math></td> <td style="padding: 0 10px;"> </td> <td style="padding: 0 10px;">ATAN2 (+1, +1) = +785.4m <math>\approx +\pi/4</math></td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">-----</td> <td style="padding: 0 10px;">+</td> <td style="padding: 0 10px;">-----&gt;</td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">ATAN2 (-1, -1) = -2.36 = -3<math>\pi/4</math></td> <td style="padding: 0 10px;"> </td> <td style="padding: 0 10px;">ATAN2 (-1, +1) = -785.4m <math>\approx -\pi/4</math></td> </tr> </table>	ATAN2 (+1, -1) = +2.36 = +3 $\pi/4$		ATAN2 (+1, +1) = +785.4m $\approx +\pi/4$	-----	+	----->	ATAN2 (-1, -1) = -2.36 = -3 $\pi/4$		ATAN2 (-1, +1) = -785.4m $\approx -\pi/4$
ATAN2 (+1, -1) = +2.36 = +3 $\pi/4$		ATAN2 (+1, +1) = +785.4m $\approx +\pi/4$								
-----	+	----->								
ATAN2 (-1, -1) = -2.36 = -3 $\pi/4$		ATAN2 (-1, +1) = -785.4m $\approx -\pi/4$								
EXP( $\underline{k}$ )	$e^a \cdot [\cos(b) + j \cdot \sin(b)]$ . Speziell für $\underline{k} = 0 + j \cdot b$ : EXP( $j \cdot b$ ) = $\cos(b) + j \cdot \sin(b)$									
LN( $\underline{k}$ )	= $\log_e(\underline{k}) = \ln(\underline{k}) = \ln( \underline{k} ) + j \cdot \arctan(b/a)$ LN(+10) = 2.3026, LN(-10) = 2.3026 + $j \cdot \pi$									
LOG( $\underline{k}$ )	= $\log_{10}(\underline{k}) = \lg(\underline{k}) = \ln(\underline{k}) / \ln(10) = [\ln( \underline{k} ) + j \cdot \arctan(b/a)] / \ln(10)$ LOG(+10) = 1, LOG(-10) = 1 + $j \cdot 1.3643$ (bisher falsch mit LOG(-10) = 1) 20*LOG( $\underline{k}$ ) ergibt ein anderes Ergebnis als DB( $\underline{k}$ ) !									

DER( $y, x$ )	bildet <b>analytische Ableitung</b> $dy/dx$ mit beliebiger Variablen $x$ . Daher muss $y = f(x)$ als Gleichung vorliegen und deshalb funktioniert DER( ) nicht in der DC-Analyse.
SUM( $y, x [, x_0]$ )	$\int y dx$ mit beliebiger Variablen für $x$ , Integrierung beginnt bei $x = x_0$
DD( $y$ )	$dy/dx$ mit $x = T$ (TR-Ana.), $F$ (AC-Ana.), $D_{CINPUT1}$ (DC-Ana.).
SD( $y[,x_0]$ )	$\int y dx$ , mit $x = T$ (TR-Ana.), $F$ (AC-Ana.), $D_{CINPUT1}$ (DC-Ana.), Integration beginnt bei $x = x_0$ oder $T_{MIN}$ , $F_{MIN}$ bzw. $D_{CMIN}$ .
AVG( $y[,x_0]$ )	lfd. arithm. Mittelwert ( <i>average</i> ) $1/x \cdot \int y dx$ mit $x = T$ (TR-Ana.), $F$ (AC-Ana.), $D_{CINPUT1}$ (DC-Ana.), Integration beginnt bei $x = x_0$ oder $T_{MIN}$ , $F_{MIN}$ bzw. $D_{CMIN}$ .
RMS( $y[,x_0]$ )	lfd. Effektivwert ( <i>root mean square</i> ) $[1/x \cdot \int y^2 dx]^{1/2}$ mit $x = T$ (TR-Ana.), $F$ (AC-Ana.), $D_{CINPUT1}$ (DC-Ana.), Integration beginnt bei $x = x_0$ oder $T_{MIN}$ , $F_{MIN}$ bzw. $D_{CMIN}$ .
DDT( $y$ )	$dy/dt$ in TR-Analyse, beginnt bei $t = T_{MIN}$
SDT( $y[,x_0]$ )	$\int y dt$ in TR-Analyse, beginnt bei $x = x_0$ oder $T_{MIN}$
DEL( $y$ )	$\Delta y = y_n - y_{n-1}$ , Differenz zwischen aktuellem Wert ( $y_n$ ) und vorigem Wert ( $y_{n-1}$ ) in TR-Analyse. DEL( $y$ )/DEL( $x$ ) berechnet eine <b>numerische Ableitung</b> .
G(MB1) Z(MB1)	ergibt komplexen Leitwert $\underline{Y}$ / komplexen Widerstand $\underline{Z}$ des Modell-Elements MB1. MB1 muss Widerstand, Kondensator, Spule oder Diode sein.
$y = \text{TABLE}(X, x_1,$ $y_1, x_2, y_2, \dots, x_N,$ $y_N)$	ergibt lineare Interpolationen zwischen eingegebenen Wertepaaren. $X$ ist eine Variable, z. B. $T$ , $T_{EMP}$ oder $V_{(A)}$ . Die Wertepaare sind nachfolgend durch Kommas ( , ) getrennt eingegeben. $X < x_1$ ergibt $y = y_1$ . $X > x_n$ ergibt $y = y_n$ . Ein Beispiel finden Sie in der Lösungsdatei zu Ü 9-2.
$y = \text{IF}(\text{Bedingung},$ $Y_{\text{true}}, Y_{\text{false}})$	Bedingung erfüllt (wahr, <i>true</i> , 1) ergibt $y = Y_{\text{true}}$ Bedingung nicht erfüllt (falsch, <i>false</i> , 0) ergibt $y = Y_{\text{false}}$ Ein Beispiel ist in Ü 3-22 (Schalter mit logisch gesteuertem Widerstand).

## 6.5 Befehlsausdrücke (*Command Statements*) in MC9

Als *Variablenamen*, die lokal mit .DEFINE oder global mit .PARAM definiert werden und einen Wert zugewiesen bekommen, sind einzelne Zeichen oder Zeichenketten aus Buchstaben, Ziffern und dem Unterstrichsymbol ( \_ ) erlaubt, keine Leerzeichen! Wenn in der Zeichenkette eines der bei Knotennamen erlaubten Symbole + - \* / \$ % erscheint, wird der Rest ignoriert. Die Statements .DEFINE M-A 1.5 und .DEFINE M-B 3.0 führen daher zur Fehlermeldung „Duplicate statement ‚M‘“, da MC die Zeichenkettenteile „-A“ bzw. „-B“ ignoriert.

Die Tabellen enthalten alle *Command Statements* aus *Chapter 26* von [MC-REF]. Fehlende oder weitere Erklärungen siehe [MC-REF].

**M:** dieser Befehlsausdruck kann in einer MC-Schaltplanseite (Textfeld) verwendet werden

**MT:** dieser Befehlsausdruck kann in einer MC-Textseite verwendet werden

**S:** dieser Befehlsausdruck kann in einer SPICE-Textdatei verwendet werden

...-Statement	M	S	ergibt bzw. Bedeutung bzw. Beispiel
.ARRAY	M		deklariert ein Feld oder eine Matrix
.DEFINE	M	S	Variablenamen, denen mit dem .DEFINE-Statement ein Wert/ein Ausdruck zugewiesen wird, dürfen nur aus Buchstaben, Ziffern und Unterstrich ( _ ) bestehen, kein Bindestrich ( - )!
.ELIF	MT	S	Verzweigung in einer IF-Bedingung, bedeutet <i>else if</i> ...
.ELSE	MT	S	Verzweigung in einer IF-Bedingung
.ENDIF	MT	S	Ende einer IF-Bedingung
.ENDS	MT	S	Ende einer <i>Subcircuit</i> -Netzliste, <i>end of subcircuit</i> , (siehe auch .SUBCKT)
.ENDSPICE	MT		beendet eine SPICE-Netzliste (siehe auch .SPICE)
.FUNC	M	S	wie .DEFINE, wird gelegentlich in Hersteller-Modellbeschreibungen verwendet
.HELP	M		beinhaltet einen Hilfe-Text innerhalb eines <i>Macros</i> . Dieser wird in der Statusleiste angezeigt.
.IC	M	S	<i>initial condition</i> , weist Anfangswert zu, der <b>bei Arbeitspunktberechnung</b> vor einer TR-/AC-Analyse <b>verwendet wird</b> : .IC V(C1)=24V, .IC I(L3)=2A, .IC D(A)=1
.IF	MT	S	Beginn einer IF-Bedingung
.INCLUDE	M	S	bindet Text aus externen Textdateien ein.
.LIB	M	S	ermöglicht den Zugriff auf Modell-Beschreibungen einer Bibliotheksdatei vom Typ *.LBR (MC-Binärdatei) oder vom Typ *.MAC, *.LIB. Das .LIB-Statement .LIB NOM.LIB wird automatisch in jeder Schaltplandatei angewendet und ist mittels der Master-Bibliothekdatei NOM.LIB die wichtigste Verbindung zu Bibliotheksdateien.
.MACRO	M		Wirkt wie ein .DEFINE-Statement und weist einem <i>Macro</i> -Namen die Liste der Parameter mit Ihren Werten eines <i>Macros</i> zu
.MODEL	M	S	Weist einem Modell-Namen Modell-Typ und Parameterwertesatz zu.
.NODESET	M	S	weist ähnlich wie .IC Anfangswert zu, der <b>bei Arbeitspunktberechnung</b> vor einer TR-/AC-Analyse <b>nicht verwendet wird</b> : .NODESET V(C1)=24V, .NODESET I(L3)=2A, .NODESET D(A)=1
.OPTIONS	M	S	weist einer der Variablen der <i>Global Settings</i> für diese Schaltplandatei einen anderen Wert zu
.PARAM	M	S	wie .DEFINE, wird gelegentlich in Hersteller-Modellbeschreibungen verwendet. .PARAM BF1={250+TEMP/20} oder .DEFINE BF1=250+TEMP/20
.PARAMETERS	M		in einem <i>Macro</i> werden hiermit die Parameter des <i>Macros</i> und deren Defaultwerte definiert.
.PATH x	M	S	wird als Pfad in dieser Schaltplandatei genommen, x = DATA, LIBRARY, PICTURE, DOCUMENT
.SPICE	MT		Beginn einer SPICE-Netzliste, (siehe auch .ENDSPICE)
.SUBCKT	MT	S	Beginn einer <i>Subcircuit</i> -Netzliste, (siehe auch .ENDS)

---

.TIE	M	verbindet genannte Knoten (auch als Modell-Element <i>Tie</i> )
.TR	M	weist verschiedenen Zeitabschnitten in einer TR-Analyse unterschiedliche Werte für die maximale Schrittweite zu. Vorteilhaft bei konvergenzkritischen Schaltungen.
.WARNING	M	definiert Bedingungen, bei denen eine Warnung ausgegeben werden soll

---

---

**...-Statements, die nur in SPICE-Netzlisten verwendet werden können:**

---

.AC	S	Werte werden in das Dialogfenster <i>AC Analysis Limits</i> kopiert
.DC	S	Werte werden in das Dialogfenster <i>DC Analysis Limits</i> kopiert
.END	S	Ende einer SPICE-Netzliste
.NOISE	S	Werte werden in das Dialogfenster <i>AC Analysis Limits</i> kopiert
.OP	S	Ergebnis der Arbeitspunktberechnung wird in eine Datei ausgegeben
.PLOT	S	Anweisung für eine grafische Ausgabe
.PRINT	S	Anweisung für eine numerische Ausgabe
.SENS	S	Empfindlichkeitsberechnung
.STEP	S	<i>Stepping</i> -Anweisung
.TF	S	berechnet Kleinsignal-Frequenzgang ( <i>transfer function</i> )
.TRAN	S	Werte werden in das Dialogfenster <i>Transient Analysis Limits</i> kopiert
.TEMP	S	weist der Variablen TEMP einen oder mehrere Werte zu
.WATCH	S	überwacht Werte während einer Analyse

---

## 7.1 Ausgabe-Variablen in MC9

Als **Knotenname**n sind einzelne Zeichen oder Zeichenketten aus Buchstaben, Ziffern und den Symbolen + - \* / \$ % \_ erlaubt, aber keine Leerzeichen! Auch die in früheren Versionen von MC nicht zulässigen reservierten Buchstaben/Zeichenketten E, F, GMIN, J, PI, S, T, TEMP und VT sind in MC9 zulässig.

Soll ein Knotenname als **globaler Knotenname** in allen Schaltplanhierarchien, *Macros* und *Subcircuits* verfügbar sein, so müssen die ersten drei Zeichen \$G\_ sein. Ist z. B. in einem *Subcircuit* ein Knoten mit dem Knotenname \$G\_CC, so kann mit dem Ausdruck V(\$G\_CC) die Spannung dieses Knotens ausgegeben werden.

V1, I1, R2, C3, L4, D5, Q6, X7, J8, M9, K7, ... sind hier Beispiele für Modell-Bezeichner

V = Spannungswert in V C = Kapazitätswert in F Q = Ladungswert in As HSI = magn. Feldstärke in A/m

I = Stromwert in A L = Induktivitätswert in H X = Verkettungsfluss in Vs BSI = magn. Flussdichte in Vs/m<sup>2</sup>

PD<sup>1)</sup> = Wert der elektrisch aufgenommenen und in eine andere Form umgewandelten Leistung (*power dissipated*)

PG<sup>1)</sup> = Wert der abgegebenen Leistung, da das Erzeuger-Bezugspfeilsystem zugrundegelegt ist (*power generated*)

PS<sup>1)</sup> = Wert der in den Energiespeichern der Ersatzschaltung des Modells gespeicherten Leistung (*power stored*)

Nr.	Modell-Element (Anschlüsse)	Spg.	Ströme	Kap.-Wert, Ind.-Wert		siehe <sup>1)</sup>	siehe <sup>1)</sup>	siehe <sup>1)</sup>
1	Spannungsquelle, Stromquelle	V(V1) V(I1)	I(V1) I(I1)	-	-	PG(V1) PG(I1)	-	-
2	Widerstand, RES	V(R2)	I(R2)	-	-	-	PD(R2)	
3	Kondensator, CAP	V(C3)	I(C3)	C(C3)	Q(C3)	-	-	PS(C3)
4	Spule, IND	V(L4)	I(L4)	L(L4)	X(L4)	-	-	PS(L4)
5	Diode, D	V(D5)	I(D5)	C(D5)	Q(D5)	-	PD(D5)	PS(D5)
6	Bipolar-Tr., NPN (B, E, C)	VB(Q6) <sup>2)</sup> VBE(Q6) <sup>2)</sup>	IE(Q6) <sup>2)</sup>	CBE(Q6) CBC(Q6)	QBE(Q6) QBC(Q6)	-	PD(Q6)	PS(Q6)
7	Operations-V., OPA (P, M, CC, EE, OUT)	VP(X7) <sup>2)</sup> VPM(X7)	-	-	-	-	-	-
8	JFET, JFT (G, S, D)	VG(J8) <sup>2)</sup> VDS(J8) <sup>2)</sup>	ID(J8) <sup>2)</sup>	CGS(J8) CGD(J8)	QGS(J8) QGD(J8)	-	PD(J8)	PS(J8)
9	MOSFET, NMOS1 (G, S, D, B)	VG(M9) <sup>2)</sup> VDS(M9) <sup>2)</sup>	ID(M9) <sup>2)</sup>	-	-	-	PD(M9)	PS(J9)
10	Leitung, TRN (AP, AM, BP, BM)	VAP( ) <sup>2)</sup>	IAP( ) <sup>2)</sup>	-	-	-	-	-
11	CORE	-	-	-	BSI(K7) HSI(K7)	-	-	-

<sup>1)</sup> Diese Variablen führen in MC 9.0.6.1 bei der AC- bzw. Dynamic-AC-Analyse zu unbrauchbaren Ergebnissen. Siehe folgenden Abschn. 7.2.

<sup>2)</sup> Die Variablen bzgl. der anderen Anschlüsse werden analog gebildet.

Beispiele:

Nr.	Benennung	E. zeigt
1	V(3)	V Potenzial (Knotenspannung gegenüber <i>Ground</i> ) von Knoten Nr. 3
2	V(A)	- logischer Wert des Digitalknotens A (0 oder 1)
3	D(3)	V Potenzial (Knotenspannung gegenüber <i>Ground</i> ) von Knoten Nr. 3
4	D(A)	- logischer Wert des Digitalknotens A (0 oder 1)
5	V(Y,X)	V Potentialdifferenz zwischen Knoten Y und X ( $u_{YX} = \varphi_Y - \varphi_X$ )
6	VBE(Q6)	V Basis-Emitter-Spannung von BJT-Modell-Element Q <sub>6</sub>
7	I(R1)	A Strom durch Modell-Element mit dem Modell-Bezeichner R <sub>1</sub>
8	I(Y,X)	A Strom d. Modell-Element (R, C, L, Quelle), das zwischen Knoten Y u. X liegt
9	IE(Q6)	A Emitterstrom von Q <sub>1</sub> (Bezugspfeil zeigt in das Modell-Element!)
10	V(X1.OP-GND)	V Potenzial des Knotens OP-GND von <i>Subcircuit</i> X <sub>1</sub>
11	IB(X3.Q1)	A Basisstrom von BJT-Modell-Element Q <sub>1</sub> im <i>Macro</i> X <sub>3</sub>
12	Q3.BF	- Wert des Parameters B <sub>F</sub> beim BJT-Modell-Element Q <sub>3</sub>

## 7.2 Ausgabe-Variablen bei einer AC-/Dynamic-AC-Analyse

Die simulierten Ergebnisse einer AC-Analyse sind *komplexwertige Zahlen*. Daher kann es bei der Ausgabe z. B. des Knotenpotenzials  $\underline{V}_{(A)} = |\underline{V}_{(A)}| \angle \varphi_{VA} = |\underline{V}_{(A)}| \cdot e^{j \cdot \varphi_{VA}} = \text{Re}\{\underline{V}_{(A)}\} + j \cdot \text{Im}\{\underline{V}_{(A)}\}$  (in MC „V(A)“) zur Überraschung kommen, wenn Sie folgende Dinge nicht wissen:

vorliegender Fall	Beispiel	als „V(A)“ wird ausgegeben	Beispiel
$\text{Im}\{\underline{V}_{(A)}\} = 0, \varphi_{VA} = 0^\circ$	+4 V + j·0 V	$\text{Re}\{\underline{V}_{(A)}\}$	+4 V
$\text{Im}\{\underline{V}_{(A)}\} = 0, \varphi_{VA} = 180^\circ$	-4 V + j·0 V		-4 V (< 0 !)
$\text{Im}\{\underline{V}_{(A)}\} \neq 0$	+4 V + j·3 V	$ \underline{V}_{(A)} $	5 V
	-4 V + j·3 V		5 V

- ① Die Ausgabe-Variablen PD( ), PS( ) und PG( ) sollten bei der AC-/Dynamic-AC-Analyse nicht verwendet werden!

Als Grundlage für die Ausgabevariablen PD(MB1), PG(MB1) und PS(MB1) wird in MC 9.0.6.1 das Produkt aus komplexer Spannung mal komplexen Strom des Modell-Elements mit dem Modell-Bezeichner MB1 genommen in der Form  $\underline{V}_{(MB1)} \cdot \underline{I}_{(MB1)}$ . Die damit berechneten Zahlenwerte sind ohne Aussage, da sich damit z. B. an einem ohmschen Widerstand eine Blindleistung ergeben würde!

Die **komplexe Leistung**  $\underline{S}$  wäre zu berechnen aus:

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = |\underline{S}| \angle \varphi_S = |\underline{S}| \cdot e^{j \cdot \varphi_S} = \text{Re}\{\underline{S}\} + j \cdot \text{Im}\{\underline{S}\} = P + j \cdot Q$$

mit  $\underline{I}^*$  als konjugiert komplexem Wert von  $\underline{I}$ !

Hierbei ist

$\underline{S}$  die **komplexe Leistung** (*complex power*), deren Wert mit der Einheit **VA** (Voltampere) angegeben wird,  $P = \text{Re}\{\underline{S}\}$  die **Wirkleistung** (*real power*), deren Wert mit der Einheit **W** (Watt) angegeben wird und  $Q = \text{Im}\{\underline{S}\}$  die **Blindleistung** (*reactive power*), deren Wert mit der Einheit **var (Var)** (*volt-ampere-reactive*) angegeben wird. Die unterschiedlich benannten „Einheiten“ sollen verdeutlichen, welche physikalische Bedeutung der damit jeweils verbundene Zahlenwert hat und sollten daher unbedingt und konsequent angewendet werden.

Der Betrag der komplexen Leistung  $|\underline{S}| = S = |\underline{U}| \cdot |\underline{I}^*|$  heißt **Scheinleistung** (*apparent power*) und wird mit der Einheit VA angegeben.

Der Winkel der komplexen Leistung  $\varphi_S$  ergibt sich zu  $\varphi_S = \varphi_u - \varphi_i$  und ist damit der Phasenverschiebungswinkel zwischen Spannung und Strom. Er ist damit identisch zum Winkel des komplexen Widerstandes  $\underline{Z}$  ( $\varphi_Z \equiv \varphi_S$ ), an dem  $\underline{U}$  abfällt und durch den  $\underline{I}$  fließt.

Der Quotient  $\lambda = P/|\underline{S}| = \cos(\varphi_S)$  heißt **Leistungsfaktor** (*power factor*).

### 7.3 \$-Variablen für Schaltpläne, *Title Block* bzw. Kopf-/Fußblock in MC9

Diese 7 \$-Variablen können in einem **Textfeld auf Schaltplanseiten** verwendet werden. Dazu muss die **CB  Formula** aktiviert sein und die Variable in die im Feld *Delimiter* eingetragenen Trennzeichen (Defaulteinstellung [ ]) eingeklammert sein.

Nr.	\$-Variable	ergibt
1	\$NAME	Name der Schaltplandatei ohne Dateityp ( <i>cir-name</i> )
2	\$NAMEEXT	Name der Schaltplandatei mit Dateityp ( <i>cir-name.CIR</i> )
3	\$MC	verwendete Version von MC
4	\$USER	Bei der Installation eingegebener Benutzername
5	\$COMPANY	Bei der Installation eingegebener Firmenname
6	\$DATE	aktuelles Datum im Format tt.mm.yyyy
7	\$TIME	aktuelle Uhrzeit im Format hh:mm:ss

Diese \$-Variablen können im einheitlichen Gestaltungselement ***Title Block*** bei Schaltplanseiten verwendet werden.

Nr.	\$-Variable	ergibt
1	\$NAME	Name der Schaltplandatei ohne Dateityp ( <i>cir-name</i> )
2	\$NAMEEXT	Name der Schaltplandatei mit Dateityp ( <i>cir-name.CIR</i> )
3	\$MC	verwendete Version von MC
4	\$USER	Bei der Installation eingegebener Benutzername
5	\$COMPANY	Bei der Installation eingegebene Firma
6	\$DATE	aktuelles Datum im Format tt.mm.yyyy
7	\$TIME	aktuelle Uhrzeit im Format hh:mm:ss
	\$PAGE	Nr. der Seite
	\$MAXPAGE	Anzahl aller Seiten
	\$PAGENAME	Name der Seite
	\$SECTION	
	\$MAXSECTION	
	\$SECTIONNAME	
	\$SHEET	Nr. dieses Blattes innerhalb einer Schaltplanseite
	\$MAXSHEET	Anzahl der Blätter der Schaltplanseite

Diese \$-Variablen können in den einheitlichen Gestaltungselementen **Kopf-/Fußblock (*Header/Footer*)** bei Textseiten verwendet werden.

Nr.	\$-Variable	ergibt
1	\$NAME	Name der Schaltplandatei ohne Dateityp ( <i>cir-name</i> )
2	\$NAMEEXT	Name der Schaltplandatei mit Dateityp ( <i>cir-name.CIR</i> )
3	\$MC	verwendete Version von MC
4	\$USER	Bei der Installation eingegebener Benutzername
5	\$COMPANY	Bei der Installation eingegebene Firma
6	\$DATE	aktuelles Datum im Format tt.mm.yyyy
7	\$TIME	aktuelle Uhrzeit im Format hh:mm:ss
	\$PAGE	Nr. des Blattes dieser Textseite
	\$MAXPAGE	Anzahl aller Blätter dieser Textseite
	\$<XXX	XXX steht linksbündig im Kopf-/Fußblock
	\$ XXX	XXX steht zentriert im Kopf-/Fußblock
	\$>XXX	XXX steht rechtsbündig im Kopf-/Fußblock

## 8.1 Tabelle aller analogen Modell-Elemente in MC9 (Tabelle 8.1 aus dem Buch)

Vollständige und kommentierte Übersicht aller analogen Modell-Elemente in MC9. Die im Buch behandelten/erwähnten Modell-Elemente sind **fett mit Kapitel-/Abschnittangaben** hervorgehoben.

Bezeichnung in [MC-REF]	Modell-Typ	siehe Abschn.	Kommentar
<b>Animated</b> <i>analog bar</i> <b>analog LED</b> <i>DC motor</i> <b>switches</b> <b>meter</b> <i>relay, traffic light</i> <i>digital switch</i> <i>digital LED</i> <i>seven segment display</i>	– <sup>1)</sup> – <sup>1)</sup> – <sup>1)</sup> – <sup>1)</sup> – <sup>1)</sup> – <sup>1)</sup> – <sup>1)</sup> – <sup>1)</sup>	<b>3.7.2</b>  <b>3.7.3</b> <b>7.5</b>	Die Modell-Symbole sind animiert, z. B. dreht sich das DC-Motor-Symbol mit einer spannungsabhängigen Drehzahl, die LEDs „leuchten“, die Schalter können mit <LM> umgeschaltet werden. Somit können Wirkungen der abstrakten Elektrotechnik sichtbar gemacht werden.
<b>Battery</b>	– <sup>1)</sup>	<b>2.3, 9.2.1</b>	<b>ideale Gleichspannungsquelle</b>
<b>Bipolar Transistor</b> <b>SPICE Gummel Poon</b> <b>NXP (Philips) Mextram</b> <b>NXP (Philips) Modella</b>	<b>NPN, PNP, LPNP</b> <b>(Level=1)</b> <b>(Level=2 oder 21)</b> <b>(Level=500 o.501)</b>	<b>6.3, 7.5, 11.1</b> <b>7.4.1</b>	<b>Bipolar-Transistor (npn-BJT und pnp-BJT)</b>
<b>Capacitor</b>	– <sup>1)</sup> <b>CAP</b>	<b>2.3, 10.1.3</b> <b>3.3, 10.1.4</b>	<b>Kapazität</b> <b>Kondensator</b>
<i>Dependent sources (linear)</i> <b>iofl</b> <b>iofV</b> <b>Vofl</b> <b>VofV</b>	– <sup>1)</sup>	<b>10.3.2, 11.1.3</b>  <b>10.3.2</b>	gesteuerte Quellen mit konst. Steuerungsfaktor $i_a = F \cdot i_e$ <b>F = const.</b> $i_a = G \cdot u_e$ <b>G = const.</b> $u_a = H \cdot i_e$ <b>H = const.</b> $u_a = E \cdot u_e$ <b>E = const.</b>
<i>Dependent sources</i> <i>(SPICE E, F, G, H devices)</i>	– <sup>1)</sup>		gesteuerte SPICE-Quellen
<b>Diode</b> <b>SPICE / PSPICE</b> <i>Philips JUNCAP</i> <i>Philips JUNCAP2</i>	<b>D</b> <b>(Level=1 oder 2)</b> <b>(Level=4)</b> <b>(Level=200)</b>	<b>3.4 ff, 10.4</b>	<b>Diode (4 Modell-Typ-Level)</b>
<i>Function sources</i> <b>NFI, NFV</b> <b>NTXofY</b>	– <sup>1)</sup> – <sup>1)</sup>	<b>7.3</b>	<b>Quellen:</b> <b>funktionsgesteuert</b> <b>tabellengesteuert</b>
<b>GaAsFET</b>	GASFET		Gallium-Arsenid-FET (3 Modell-Typ-Level)
<b>IBIS</b>	siehe <sup>2)</sup>		Platzhalter, der eine IBIS-Modellbeschreibung in eine <i>Subcircuit</i> -Netzliste übersetzt
<b>IGBT</b>	NIGBT		IGBT (Hefner-Modell)
<i>Independent sources</i> <b>Voltage Source V</b> <b>Current Source I</b>	– <sup>1)</sup> – <sup>1)</sup>	<b>9.2.4, 11.3</b> <b>7.1, 9.2.4</b>	<b>ideale Universalquellen</b> <b>(u bzw. i) für verschiedene Zeitfunktionen</b>
<b>Inductor</b>	– <sup>1)</sup> <b>IND</b>	<b>10.1.3</b> <b>10.1.5</b>	<b>Induktivität / Windungszahl</b> <b>Spule</b>
<b>ISource</b>	– <sup>1)</sup>	<b>3.6.3, 9.2.1</b>	<b>ideale Gleichstromquelle</b>
<b>JFET</b>	NJF, PJF		Sperrschicht-FET
<i>K device</i> <i>als Mutual inductance</i> <i>als Nonlinear magnetics</i>	– <sup>1)</sup> <b>CORE</b>	<b>10.3.3</b> <b>10.2</b>	<b>a) gekoppelte Wicklungen</b> <b>b) nichtlin. B = f(H)-Kennlinie m. Hysterese</b>
<i>Laplace sources</i> <b>LFXofY</b> <b>LTXofY</b>	– <sup>1)</sup> – <sup>1)</sup>		gesteuerte Quellen mit Laplace-Transformierter als Übertragungsfaktor, funktions- oder tabellengesteuert
<b>Macro</b>			mit MC erzeugte Ersatzschaltung, die als Modell-Element verwendet werden kann
<b>MOSFET</b> <i>Shichman-Hodges</i> <i>Grove-Frohman (MOS2)</i> <i>Empirical model(MOS3)</i> <i>BSIM1 (original)</i> <i>BSIM2</i> <i>BSIM3 (v3.3)</i> <i>BSIM4 (v4.5.0)</i> <i>EKV2.6</i> <i>Philips Model 11, 20, 31, 40, 102</i>	<b>NMOS, PMOS</b> <b>(Level=1)</b> <b>(Level=2)</b> <b>(Level=3)</b> <b>(Level=4)</b> <b>(Level=5)</b> <b>(Level=8 oder 49)</b> <b>(Level=14)</b> <b>(Level=44)</b> <b>(Level=11, 20, 31, 40, 102)</b>		<b>MOSFET (25 Modell-Typ-Level)</b>

<i>N_Port</i>	- <sup>1)</sup>		<i>n</i> -Tor, tabellengesteuert
<b>OPAMP</b>	<b>OPA</b>	<b>11.2</b>	<b>Operationsverstärker (3 Modell-Typ-Level)</b>
<b>Pulse source</b>	<b>PUL</b>	<b>2.7, 9.2.3</b>	<b>ideale Puls-Spannungsquelle</b>
<b>Resistor</b>	- <sup>1)</sup>	<b>2.3 u. 10.1.1</b> <b>7.5 u. 10.1.2</b>	<b>ohmscher Widerstand</b> <b>Widerstand</b>
<b>S</b>	<b>VSWITCH</b>		Schalter, <i>u</i> -gesteuert
<i>Sample and hold circuit</i>	- <sup>1)</sup>		ideales Abtast- und Halteglied
<b>Sine source</b>	<b>SIN</b>	<b>2.6, 3.3, 9.2.2</b>	<b>Sinus-Spannungsquelle m. Serienwiderstand</b>
<b>Subcircuit</b>			<b>Ersatzschaltung als SPICE-Netzliste, die als Modell-Element verwendet werden kann</b>
<b>Switch</b>	- <sup>1)</sup>	<b>3.6.4</b>	<b>Schalter, <i>t</i>-, <i>u</i>-, <i>i</i>-gesteuert</b>
<i>Timer</i>	- <sup>1)</sup>		wandelt Zeiten / Zählergebnisse in analoge Spannungen um
<b>Transformer</b>	- <sup>1)</sup>	<b>10.3.1</b>	<b>Modell für zwei linear gekoppelte Wicklungen</b>
<i>Transmission line</i>	TRN		Modell einer Leitung (verlustfrei / verlustbehaftet)
<b>User file source</b>	- <sup>1)</sup>	<b>5.1.3</b>	<b>dateigesteuerte Spannungsquelle</b>
<b>W</b>	<b>ISWITCH</b>		Schalter, <i>i</i> -gesteuert
<b>Z transform sources</b>	- <sup>1)</sup>		gesteuerte Quellen mit z-Übertragungsfunktion

<sup>1)</sup> ein Kürzel für den Modell-Typ gibt es nicht, da die Parameterwerte nicht über ein .MODEL-Statement, sondern direkt als Attribut VALUE beim Modell-Element eingegeben werden.

## 8.2 Modell-Elemente für Quellen in MC9

Bei den verschiedenen Modell-Elementen für Quellen in MC9 sollen die folgenden Tabellen Klarheit darüber bringen, welche Werte in welcher Analyseart eingepägt werden.

In dieser Tabelle werden abkürzende Begriffe beschrieben:

abk. Begriff	bei Analyseart ...	Bemerkung
DYDC-Analyse	Dynamic-DC-Analyse	
DC-Analyse	DC-Analyse	
AC-AP-Wert	AC-Analyse, Dynamic-AC-Analyse	Wert bei der <i>Arbeitspunktberechnung</i> , die im Rahmen einer AC-Analyse <i>immer</i> durchgeführt wird und zur linearen Ersatzschaltung für die komplexe Wechselstromrechnung führt.
AC-Komplex	AC-Analyse, Dynamic-AC-Analyse	Wert bei der komplexen Wechselstromrechnung.
TR-AP-Wert	TR-Analyse	Wert bei der Arbeitspunktberechnung, wenn die <i>CB</i> <input checked="" type="checkbox"/> <i>Operating Point</i> aktiv ist.
TR-Analyse	TR-Analyse	Wert bei der TR-Analyse ohne bzw. nach erfolgter Arbeitspunktberechnung.

Die Tabelle gibt den Wert der jeweiligen Quelle an, den sie bei den angegebenen Analysearten einpägt<sup>1)</sup>:

Modell-Element / -Typ	DYDC-Analyse	DC-Analyse	AC-AP-Wert	AC-Komplex	TR-AP-Wert	TR-An.
<i>Battery</i>	$U_Q$	$U_Q$	$U_Q$	0 V (KS)	$U_Q$	$U_Q$
<i>ISource</i>	$I_Q$	$I_Q$	$I_Q$	0 A (LL)	$I_Q$	$I_Q$
<i>Sine Source</i> / SIN ( $R_S !$ <sup>1)</sup> )	$D_C + A \cdot \sin(P_H)$	$D_C + A \cdot \sin(P_H)$	$D_C + A \cdot \sin(P_H)$	1 V $\angle 0^\circ$	$D_C + A \cdot \sin(P_H)$	$u_Q(t)$
<i>Pulse Source</i> / PUL	$V_{ZERO}$	$V_{ZERO}$	$V_{ZERO}$	1 V $\angle 0^\circ$	$V_{ZERO}$	$u_Q(t)$
<i>Voltage Source V (Pulse)</i>	$V_1$	$D_C$	$D_C$	siehe <sup>2)</sup>	$V_1$	$u_Q(t)$
<i>Voltage Source V (Sin)</i>	$V_O$	$D_C$	$D_C$	siehe <sup>2)</sup>	$V_O$	$u_Q(t)$
<i>Voltage Source V (PWL)</i>	$U_1$ (erster Wert)	$D_C$ <sup>3)!!!</sup>	$U_1$	siehe <sup>2)</sup>	$U_1$	$u_Q(t)$
<i>Voltage Source V (None)</i>	$D_C$	$D_C$	$D_C$	siehe <sup>2)</sup>	$D_C$	$D_C$

<sup>1)</sup> Die Sinus-Spannungsquelle *Sine Source* hat als einzige Quelle einen Serienwiderstand  $R_S$ . Die angegebenen Spannungswerte sind die Leerlaufspannung.

<sup>2)</sup> Gemäß den Eingaben für die Eingabefelder *AC magnitude* und *AC Phase*

<sup>3)!!!</sup> In der MC-Version 9.0.6.1 wird bei der DC-Analyse noch fehlerhafterweise 0 V und nicht den Eingabewert von  $D_C$  eingepägt.

### 8.3 Tabelle der 55 Macros in MC9

Ein *Macro* ist eine Simulationsschaltung, die mit MC erzeugt wurde und als *Macro* (Dateityp \*.MAC) abgespeichert ist. Diese Schaltung kann als *black box* in einer Simulation verwendet werden. Über Parameter werden Eigenschaften des *Macros* eingestellt. Ein *Macro* ist daher ein Modell-Element, nur dass Ersatzschaltung bzw. Modellgleichungen zugänglich sind. Die Tabelle enthält mehr als die in *Chapter 21* von [MC-REF] beschriebenen *Macros*, da die Auswahl laufend ergänzt wird.

Name.MAC	Beschreibung, Modell/Ersatzschaltung für	
555	Timer-IC NE 555	
ABS	Ausgangsspannung ist Betrag ( <i>absolute value</i> ) der Eingangsspannung	$u_a(t) =  u_e(t) $
AM	Amplitudenmodulator	
AMP	einfacher Spannungsverstärker ( <i>amplifier mit VofV</i> )	$u_a(t) = K \cdot u_e(t)$
CAND2	CMOS-AND-Gatter mit 2 Eingängen	
CENTAP	Trafo mit Mittelpunktanzapfung ( <i>center tapped transformer</i> , mit <i>K device</i> )	
CINV	CMOS-Inverter	
CJK	CMOS-J-K-Flipflop	
CLIP	Verstärker mit Ausgangsspannungsbegrenzung ( <i>clipping</i> )	
CNAND3	CMOS-NAND-Gatter mit 3 Eingängen	
COMPARATOR	Komparator mit Schmitt-Trigger-Verhalten (Hysterese), wie das <i>Macro</i> SCHMITT	
DCLOCK	<i>digital clock generator</i>	
DELAY	zeitl. Verzögerung ( <i>delay</i> ), realisiert mit Modell-Typ TRN	$u_a(t + t_{delay}) = u_e(t)$
DIAC	DIAC, basiert auf dem <i>Macro</i> TRIAC	
DIF	Differenzierer ( <i>differentiator</i> )	$u_a(t) = T \cdot du_e/dt$
DIGPOT	digital einstellbares Potenziometer (ähnlich MAX 5450 - 5455)	
DIV	Dividierer ( <i>divider</i> )	$u_y(t) = U_{Scale} \cdot u_b/u_a$
F	komplexe Frequenzgang	$U_a(s=j\omega) = F(j\omega) \cdot U_e(j\omega)$
FSK	FSK-Modulator	
GYRATOR	Gyrator mit zwei gekreuzt gesteuerten Quellen <i>VofI</i>	
IDEAL_TRANS2	idealer Übertrager mit zwei Toren	
IDEAL_TRANS3	idealer Übertrager mit drei Toren	
INT	Integrierer ( <i>integrator</i> )	$u_a(t) = 1/T \cdot \int u_e dt + u_a(0)$
INT_RESET	Integrierer ( <i>Macro</i> INT) ergänzt um einen Reset-Eingang	
LM117	einstellbarer Festspannungsregler LM117 (bzw. LM 317)	
MONOSTABLE	monostabile Kippstufe, erzeugt Einzelspannungspuls mit definierter Dauer	
MUL	Multiplizierer ( <i>multiplier</i> )	$u_y(t) = 1/U_{Scale} \cdot u_a \cdot u_b$
NOISE	Rausch-Spannungsquelle im Zeitbereich mit Zufallsgenerator	$u_{Noise}(t) = \{0 \text{ V bis } V_S\}$
PHOTODIODE	Fotodiode mit Beleuchtungs-Strom-Wandlungsfaktor u. $I_{dark}$	
PHOTODIODE_R	Fotodiode mit Beleuchtungs-Strom-Wandlungsfaktor u. $R_{shunt}$	
POT	Potenziometer, mit zwei Widerständen realisiert	
PSK	PSK-Modulator	
PUT	PUT (UJT), <i>Programmable Unijunction Transistor</i>	
PWM_T	Pulsweitenmodulator-IC UC 1845 mit integriertem T-Flipflop	
PWM_NT	PWM-IC UC 1845 ohne integriertes T-Flipflop	
RELAY1	Relais (elektrisches Modell mit R-L-Reihenschaltung und Schalthysterese)	
RELAY2	Relais (mathematisches Modell der elektrischen und mechanischen Effekte)	
RESONANT	Schwingkreis (R-L-Reihenschaltung parallel zu C)	
SCHMITT	Schmitt-Trigger-Übertragungscharakteristik	
SCR	Thyristor ( <i>silicon controlled rectifier</i> ), Ersatzschaltung besteht aus 2 BJTs und Z-Diode	
SLIP	Übertragungsverhalten mit Hysterese, Begrenzung und Totbereich	
SNUBBER	typ. <i>snubber</i> -Schaltung (dt. Stoßdämpfer) (R-C-Reihenschaltung parallel zu Diode)	
SPARKGAP	Gasableiter (ÜsAg, SVP)	
STAIRCASE	Treppenstufen-Spannungsquelle	
SUB	Subtrahierer	$u_y(t) = K_a \cdot u_a - K_b \cdot u_b$
SUM	Summierer mit 2 Spannungseingängen	$u_y(t) = K_a \cdot u_a + K_b \cdot u_b$
SUM3	Summierer mit 3 Spannungseingängen	$u_y(t) = K_a \cdot u_a + K_b \cdot u_b + K_c \cdot u_c$
TRIAC	TRIAC (zwei antiparallele Thyristoren)	
TRIGGER6	Zündimpulsgenerator für 6 Thyristoren in Drehstromschaltungen	
TRIODE	Triode mit Gitter, Anode und Kathode ( <i>Grid, Plate, Cathode</i> )	
UA723	Spannungsregler-IC $\mu A723$	
VCO	<i>Voltage Controlled oscillator</i>	$u_a(t) = \hat{u}_a \cdot \cos[2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + 2 \cdot \pi \cdot k_F \cdot f_S \cdot \int u_e dt]$
WIDEBAND	Breitband-Übertrager (mit <i>K device</i> )	
XTAL	Quarz ( <i>crystal = xtal</i> ) (R-L-C Reihenschaltung mit C parallel)	
Z	Zeitverzögerung für zeitdiskrete Systeme	

## 9 Einstellungen im Dialogfenster *Preferences* von MC9 (Auswahl)

In der Spalte D wird die Defaulteinstellung angezeigt. Es wird vorgeschlagen, die **fett** hervorgehobenen Optionen gegenüber der in Spalte D gezeigten Defaulteinstellung zu ändern.

### Rubrik *Options* → *General*

D	Benennung	bedeutet bei Aktivierung
<input type="checkbox"/>	Time Stamp	Ausgabe der Uhrzeit in der Datei einer numerischen Ausgabe.
<input checked="" type="checkbox"/>	Sound	Akustischer Hinweis bei Warnungen und Ende eines Simulationslaufs.
<input checked="" type="checkbox"/>	Add Parentheses to Define	Bsp.: „DEFINE A 2+3“ wird von MC interpretiert als $A = (2+3)$ . Der Ausdruck $1/A$ ergibt 0,2. Ist diese Option deaktiviert ergibt $1/A$ den Wert $1/2 + 3 = 3,5$ .
<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Show Full Paths</b>	<b>Zeigt in Titelleiste und im Menü <i>File</i> Dateinamen und den gesamten Pfad. Zur besseren Übersicht bei langen Pfadausdrücken: deaktivieren.</b>
<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Sort Model Parameters</b>	<b>Sortiert und zeigt in Attributfenern und numerischen Ausgaben die Parameter der Modell-Typen in alphabetischer Reihenfolge: deaktivieren.</b>
<input type="checkbox"/>	Date Stamp	Ausgabe des Datums in der Datei einer numerischen Ausgabe.
<input type="checkbox"/>	Print Background	Bei Ausdrucken wird der Hintergrund mit einer gewählten Farbe ausgedruckt.
<input checked="" type="checkbox"/>	Comp. Menu Shape Display	Zeigt die Modell-Symbole beim Durchsuchen.
<input type="checkbox"/>	<b>Use Bitmaps in Menus</b>	<b>Zeigt in den Menüs auch die grafischen Schaltflächen (SF) an: aktivieren.</b>
<input type="checkbox"/>	Help File on Top	Hilfefenster werden stets oben platziert.
10	File List Size	Anzahl der zuvor geöffneten Dateien, die im Menü <i>File</i> angezeigt werden.
3	Warning Time	Zeitdauer in s, mit der Warnmeldungen angezeigt werden.
10	Component List Size	Anzahl d. zuvor verwendeten Modell-Elem., d. im Menü <i>Component</i> gezeigt werden.

### Rubrik *Options* → *Analysis*

<input type="checkbox"/>	Floating Node Check	Ergibt eine Warnung, wenn ein Anschlusspin nicht angeschlossen ist.
<input checked="" type="checkbox"/>	DC Path to Ground Check	Ergibt eine Warnung, wenn ein Knoten keinen Gleichstrompfad nach <i>Ground</i> hat.
<input checked="" type="checkbox"/>	Convergence Assist	Aktiviert einen Konvergenzassistenten, der einige Parameterwerte der <i>Global Settings</i> verändert, um Konvergenz zu erreichen. War das erfolgreich, werden die Werte als .OPTIONS-Statement in dem Schaltplan angezeigt.
<input type="checkbox"/>	Add DC Path to Ground	Fügt von jedem Knoten nach <i>Ground</i> einen nicht sichtbaren Widerstand mit dem Wert R_NODE_GND hinzu.
<input checked="" type="checkbox"/>	Plot On Top	Falls sich Ausgabefenster und Schaltplan-Eingabefenster überlappen, wird das Ausgabefenster oberhalb platziert.
<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Dynamic Auto Run</b>	<b>Wird bei einer aktiven Analyse der Schaltplan geändert, wird automatisch ein weiterer Simulationslauf gestartet. Ist die Rechenzeit Ihrer Simulation relativ lang, sollten Sie diesen Automatismus deaktivieren: deaktivieren.</b>
<input checked="" type="checkbox"/>	Intertial Cancellation	Bei Digitalsimulationen werden Pulse, die kürzer als die Gatterlaufzeit sind, unterdrückt.
<input type="checkbox"/>	Analysis Progress Bar	Zeigt einen Laufzeitbalken, der den Analysefortschritt wiedergibt.
<input type="checkbox"/>	Select Mode	Im Analysemodus wird automatisch in den <i>Select Mode</i> gewechselt, wenn ein anderer Modus beendet wurde.
<input checked="" type="checkbox"/>	Select Curve Color	Zeigt bei Kennlinienfeldern einen ausgewählten Kurvenzweig farbig an.
<input checked="" type="checkbox"/>	Macro Drill Down	Die Auswertung einer Simulation mit <i>Probe</i> kann auch in <i>Macros</i> erfolgen.
<input checked="" type="checkbox"/>	Smart Entry	Bei <i>Stepping</i> werden Zahlenwerte vorgeschlagen.
	Derivative Threshold	Maximale Zeichenkettenlänge von partiellen Ableitungen bei <i>Function Sources</i> .

Rubrik **Options** → **Circuit**

<input checked="" type="checkbox"/> <b>Text Increment</b>	<b>Beim Kopieren von Textfeldern (z. B. Knotenname A) wird der Inhalt „erhöht“, indem eine laufende Zahl angehängt wird (A1): deaktivieren.</b>
<input type="checkbox"/> Node Snap	Knoten schnappen an andere Knoten/Verbindungen ein, wenn dicht beieinander.
<input type="checkbox"/> Auto Show Model	Zeigt die Textseite, wenn ein neues .MODEL-Statement aufgenommen wurde.
<input checked="" type="checkbox"/> Node Highlight	Hebt eine Verbindung farblich hervor, wenn der Mauszeiger in der Nähe ist.
<input checked="" type="checkbox"/> Component Cursor	Bei der Modell-Element-Eingabe wird das Modell-Symbol der Mauszeiger.
<input type="checkbox"/> Rubberbanding	Wird ein Modell-Symbol verschoben, wirken die Verbindungen wie Gummibänder.
<input checked="" type="checkbox"/> Element Info	Informationen des Modell-Elementes werden am Mauszeiger angezeigt.
<input checked="" type="checkbox"/> Component Import	Kopiert Modell-Informationen aus einer Schaltplandatei in eine Bibliotheksdatei.
<input type="checkbox"/> <b>Copy / Paste Model Information</b>	<b>.MODEL- und .DEFINE-Statements werden zusammen mit dem Modell-Symbol kopiert oder gelöscht. Dies ist hilfreich, wenn lokale Modell-Elemente von einer Schaltplandatei in eine andere kopiert werden: aktivieren.</b>
<input checked="" type="checkbox"/> Block Select Display Mode	Hebt ein ausgewähltes Objekt farblich als Block hervor.
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Automatically Add Opamp Power Supplies</b>	<b>Fügt beim OP-Modell-Typ OPA (LEVEL=3) automatisch Versorgungsspannungsquellen hinzu. Funktioniert nicht bei <i>Subcircuits</i>! Spannungsversorgung von OPs ist in der Praxis und in der Simulation nach Meinung des Autors ein zu wichtiger Bereich, als dass Sie dieses einem Automatismus überlassen sollten: deaktivieren.</b>
<input type="checkbox"/> Select Mode	Im Schaltplan-Eingabemodus wird automatisch in den <i>Select Mode</i> gewechselt wenn ein anderer Modus beendet wurde.
Nodes Recalculation Threshold	Überschreitet die Zahl der Knoten diese Schwelle, werden die Knotennummern erst mit dem Start einer Analyse neu berechnet und aktualisiert.
File Link Default	Default-Internetadresse, mit der nach weiteren Informationen für ein Bauelement (z. B. einem Datenblatt) aus MC heraus gesucht werden kann.

**10.1 GS-Parameter von MC9 (Parameter des Dialogfensters *Global Settings*)**

Benennung	Default	bedeutet
ABSTOL	1 pA	Maximal zulässiger Wert des <i>absoluten Fehlers von Stromwerten</i> . Sollte 6 bis 8 Zehnerpotenzen (Dekaden) kleiner sein als der größte simulierte Stromwert.
CHGTOL	10 fAs	Maximal zulässiger Wert des <i>absoluten Fehlers von Ladungswerten</i> .
CSHUNT	0 F	Wenn > 0, ergänzt MC den Schaltplan um unsichtbare Kondensatoren mit dem Wert $C_{SHUNT}$ , die von jedem Knoten nach <i>Ground</i> gehen. 0 F deaktiviert dies.
DEFAD	0 m <sup>2</sup>	Defaultwert für MOSFET-Modelle, Fläche des Drain-Diffusionsbereichs
DEFAS	0 m <sup>2</sup>	Defaultwert für MOSFET-Modelle, Fläche des Source-Diffusionsbereichs
DEFL	100 µm	Defaultwert für MOSFET-Modelle
DEFNRD	0 m	Defaultwert für MOSFET-Modelle
DEFNRS	0 Ω	Defaultwert für MOSFET-Modelle
DEFPD	0 m	Defaultwert für MOSFET-Modelle
DEFPS	0 m	Defaultwert für MOSFET-Modelle
DEFW	100 µm	Defaultwert für MOSFET-Modelle
DIGDRVF	2 Ω	Defaultwert für Digital-Simulationen
DIGDRVZ	20 kΩ	Defaultwert für Digital-Simulationen
DIGERRDEFAULT	20	Defaultwert für Digital-Simulationen
DIGERRLIMIT	0	Defaultwert für Digital-Simulationen
DIGFREQ	10 GHz	Der kleinste digitale Zeitschritt ist $1/D_{IGFREQ}$
DIGINITSTATE	0	Defaultwert für Digital-Simulationen
DIGIOLVL	2	Defaultwert für Digital-Simulationen
DIGMNTYMX	2	Defaultwert für Digital-Simulationen
DIGMNTYSSCALE	0,4	Defaultwert für Digital-Simulationen
DIGOVRDRV	3	Defaultwert für Digital-Simulationen
DIGTYMXSCALE	1,6	Defaultwert für Digital-Simulationen
GMIN	1 pS	$1/G_{MIN} = R_{pn-max}$ ist der maximale Widerstandswert eines p-n-Übergangs
ITL1	100	Max. Anzahl von Iterationen ( <i>iteration limit 1</i> ) bei Arbeitspunktberechnung
ITL2	50	Max. Anzahl von Iterationen ( <i>iteration limit 2</i> ) bei der DC-Analyse für einen DC-Wert
ITL4	10	Max. Anzahl von numerischen Iterationen ( <i>iteration limit 4</i> ) bei der TR-Analyse für einen Zeitpunkt
LONE	3,5 V	Wenn ein logischer Ausdruck den Wert TRUE hat, bekommt er diesen Spannungswert
LTHRESH	1,5 V	Schwellwert für logische Ausdrücke wie „A = V(1)&V(2)“. A bekommt nur dann den Wert TRUE, wenn $V_{(1)} \geq L_{THRESH}$ und $V_{(2)} \geq L_{THRESH}$ .
LZERO	0,3 V	Wenn ein logischer Ausdruck d. Wert FALSE hat, bekommt er diesen Spannungswert
PERFORM_M	2	Anzahl der Datenpunkte auf jeder Seite eines Datenpunkts, die die Suche nach einer <i>Performance Function</i> erfüllen müssen
PIVREL	1 m	Minimaler relativer Wert eines Pivotelementes der Matrix
PIVTOL	0,1 p	Minimaler absoluter Wert eines Pivotelementes der Matrix
RELTOL	1 m	Max. zulässiger Wert des <i>relativen Fehlers</i> von <i>Strom- und Spannungswerten</i> ein. Dieser Wert steuert die numerische Genauigkeit und Konvergenz und damit auch die Rechenzeit. Typ. Wertebereich ist 1 µ bis 10 m.
RMIN	1 µΩ	Minimaler Widerstandswert eines Modells für einen ohmschen Widerstand.
RP_FOR_ISOURCE	0 Ω	Wenn > 0, wird Widerstand mit diesem Wert parallel an jede Stromquelle angefügt

RSHUNT	0 $\Omega$	Wenn > 0, ergänzt MC den Schaltplan um unsichtbare Widerstände mit dem Wert $R_{SHUNT}$ , die von jedem Knoten nach <i>Ground</i> gehen. 0 $\Omega$ deaktiviert dieses.
R_NODE_GND	1 T $\Omega$	Wenn die <i>CB</i> <input type="checkbox"/> <i>Add DC Path to Ground</i> aktiviert ist oder <i>immer während einer Dynamic-DC/AC-Analyse</i> wird von jedem Knoten nach <i>Ground</i> ein unsichtbarer Widerstand mit diesem Wert platziert.
SD	2,58	„Anzahl“ der Standardabweichungen ( <i>standard deviation</i> ) $\sigma$ im Toleranzband (2,58 $\cdot\sigma$ bedeutet, dass 99,0 % der Werte innerhalb des Toleranzbandes liegen).
SEED	0	Wenn Zufallszahlen reproduzierbar sein sollen, muss SEED > 0 (dt. Same)
TNOM	27 °C	Defaultwert für den Parameter $T_{MEASURED}$
TRTOL	7	Toleranzparameter für einen Algorithmus
VNTOL	1 $\mu$ V	Maximal zulässigen Wert des <i>absoluten Fehlers von Spannungswerten</i> . Sollte ca. 6 bis 8 Zehnerpotenzen (Dekaden) kleiner sein als der größte simulierte Spannungswert.
WIDTH	80	Anzahl der Zeichen (Spaltenbreite) bei numerischer Ein- und Ausgabe (80 od. 132)

## 10.2 Was ist Konvergenz?

Bei den Berechnungen muss MC ein nichtlineares Differential-Gleichungssystem lösen. Da dieses *analytisch* nicht mehr geht, muss es *numerisch* gelöst werden. Es gibt viele Ansätze zur numerischen Lösung von Gleichungen, aber alle beinhalten ein Abbruchkriterium, das einem Algorithmus mitteilt, dass eine „Lösung“ z. B. für das Knotenpotenzial  $V_{(A)}$  gefunden ist. Dies kann z. B. in Form der folgenden *while*-Schleife programmiert sein:

```
...  
while (error > RELTOL*V(A)+VNTOL and n_iteration < MAXITERATIONS)  
{  
    error = Solve( );  
    n_iteration=n_ieration + 1;  
}  
...
```

Für  $R_{\text{ELTOL}}$  und  $V_{\text{NTOL}}$  siehe Abschn. 9.1 „GS-Parameter von MC9 (Parameter des Dialogfensters *Global Settings*)“ in [MC-ERG]. Diese Schleife besagt, dass mit der Suche nach einer „Lösung“ solange weitergemacht wird, wie eine vom Algorithmus *Solve* berechnete Abweichungsgröße *error* noch größer ist als ein Toleranzwert ist – und – eine festgelegte maximale Anzahl von Iterationen noch nicht erreicht wurde. Die Abweichungsgröße *error* selbst ist definiert als Abweichung zwischen dem aktuellen Wert und fortlaufend aktualisierten Schätzungen über die „richtige“ Lösung.

Wird daher bei aufeinanderfolgenden Iterationen im Rahmen der Zahlenauflösung des Rechners „derselbe“ Zahlenwert berechnet oder ist der Unterschied kleiner als eine akzeptable Toleranz, wird dies mit der Aussage „die Lösung konvergiert“ beschrieben und der gefundene Zahlenwert als „richtig“ erachtet.

Dieses wird auf jede nichtlineare Größe angewendet. Wenn nur bei einer Größe die Abweichungsgröße *error* nicht kleiner als der Toleranzwert und damit die maximale Anzahl von Iterationen erreicht wird, wird dies beschrieben mit der Aussage „die Lösung konvergiert nicht“ und die unerfreuliche Fehlermeldung „*Internal time step too small*“ oder eine andere in dieser Art wird ausgegeben.

MC prüft bei jeder nichtlinearen Analyse auf Konvergenz:

Dyn.-DC-Analyse: bei aktuellem und angezeigtem Datenpunkt

DC-Analyse: bei jedem Datenpunkt

TR-Analyse: bei der Arbeitspunktberechnung vor einer TR-Analyse

TR-Analyse: bei jedem Datenpunkt

AC-Analyse: bei der Arbeitspunktberechnung vor der komplexen Wechselstromrechnung

Dyn.-AC-Analyse: bei der Arbeitspunktberechnung vor der komplexen Wechselstromrechnung

Nur bei der komplexen Wechselstromrechnung im Rahmen der AC-Analyse wird die Konvergenz nicht geprüft, da diese Berechnung auf die lineare Ersatzschaltung angewendet wird.

### Was verursacht allgemein Konvergenz-Probleme?

**Diskontinuität in einer Modellbeschreibung:** Mit Diskontinuität ist beispielsweise eine abschnittsweise mathematische Beschreibung gemeint wie die auf Geraden basierenden Idealisierungen einer Diodenkennlinie (im Buch Bild 3-1). Wenn die numerische Lösung über den „Knickpunkt“ geht, kann es zu einem numerischen Effekt kommen, der sich darin äußert, dass die Lösung um diesen Knickpunkt herum solange gesucht wird, bis die maximale Anzahl der Iterationen erreicht ist.

*Lösungen:* Hier können Sie wenig machen außer solche Modellbeschreibungen nicht einzusetzen oder dafür zu sorgen, dass der Knickpunkt außerhalb des Bereichs liegt, in dem der Algorithmus nach eine Lösung sucht. Und damit wäre die Simulation einer Schaltung mit so einem Modell einer Diode ziemlich sinnlos.

**Simulation bistabiler oder instabiler Schaltungen:** So wie die zu simulierende reale Schaltung kann auch die Simulation bistabil oder instabil sein. Es kann sein, dass der Algorithmus zwischen einem und einem anderen stabilen Zustand wechselt und die Konvergenzbedingung nicht erfüllt wird. Dies kommt typischerweise bei der Arbeitspunktberechnung vor.

*Lösungen:* siehe 4 und 5 in der Konvergenz-Checkliste.

**Schaltplan-Topologie und extreme Parameterwerte:** beinhalten die häufigste Ursache für Konvergenz-Probleme. Dies sind u. a. unrealistische Werte für Widerstände und Quellen, Kapazitätswerte = 0, leerlaufende Knoten und nicht beabsichtigte Kurzschlüsse.

*Lösungen:* siehe Konvergenz-Checkliste.

## 10.3 Konvergenz-Checkliste

In dieser Konvergenz-Checkliste finden Sie Lösungsvorschläge aus [MC-REF], die Sie probieren können, wenn Konvergenz-Probleme bei Ihrer Simulation auftreten.

Häufig wird das Dialogfenster *Preferences* genannt. Sie erreichen es über die **SF Preferences** (<Strg> + <↑> + <P>) oder die **Menüfolge Options → Preferences...**

Häufig wird das Dialogfenster *Global Settings* genannt. Sie erreichen es über die **SF Global Settings** (<Strg> + <↑> + <G>) oder die **Menüfolge Options → Global Settings...**

### 1. Prüfen Sie die Topologie, also den Schaltplan der simulierten Schaltung:

#### 1.1 Gleichstrompfad nach *Ground* ?

Jeder Knoten muss einen Gleichstrompfad zum Knoten *Ground* haben. Zwei Kondensatoren in Reihe sind eine typische Anordnung, die bei der Arbeitspunktberechnung eine Fehlermeldung bewirken, da der Algorithmus das Potenzial des Verbindungsknotens zwischen den Kondensatoren nicht berechnen kann.

Lösungsalternativen:

a) Ersetzen Sie die Reihenschaltung durch einen einzelnen Kondensator.

b) Im Dialogfenster *Preferences* ist in der Rubrik **Options → Analysis** die **CB  DC Path to Ground Check** defaultmäßig aktiviert und MC weist auf gefährdete Knoten hin, falls Sie diese nicht selbst erkennen. Verbinden Sie den/die Knoten und *Ground* mit einem für die Schaltung hochohmigen Widerstand (1 MΩ bis 1 TΩ).

c) Wenn Sie im Dialogfenster *Preferences* in der Rubrik **Options → Analysis** die **CB  Add DC Path to Ground** aktivieren, fügt MC automatisch *an Knoten, die keinen Gleichstrompfad nach Ground haben* einen Widerstand nach *Ground* mit den Wert  $R_{\text{NODE\_GND}}$  ein. Den Wert des GS-Parameters  $R_{\text{NODE\_GND}}$  (Defaultwert 1 TΩ) können Sie im Dialogfenster *Global Settings* einstellen.

d) Wenn Sie im Dialogfenster *Global Settings* dem GS-Parameter  $R_{\text{SHUNT}}$  (Defaultwert 0) einen Wert  $> 0$  geben (z. B. 1 MΩ bis 1 TΩ), fügt MC automatisch *an jeden Knoten* einen Widerstand nach *Ground* mit den Wert  $R_{\text{SHUNT}}$  ein (siehe 3.3 und ergänzend 3.4 für den GS-Parameter  $C_{\text{SHUNT}}$ ).

Eine weitere Anordnung für dieses Konvergenzproblem sind kaskadierte Modell-Elemente für Leitungen (Modell-Typ TRN). Die Knoten, die Ausgang des einen Modell-Elements mit Eingang des anderen Modell-Elements verbinden, haben keinen Gleichstrompfad nach *Ground*.

Lösungsvorschläge: b), c) oder d).

#### 1.2 Reihenschaltung von Stromquellen?

Eine Reihenschaltung von Stromquellen mit unterschiedlichen Werten ist nicht zulässig und verursacht Konvergenzprobleme, da Stromquellen den Strom einprägen. Zudem ist damit die **Knotenregel** ( $\sum i = 0$  A, 1. kirchhoffsches Gesetz) verletzt.

Lösungsalternativen:

a) Ersetzen Sie die Reihenschaltung durch eine einzelne Stromquelle und denken Sie darüber nach, was Sie mit dieser Reihenschaltung eigentlich bezwecken wollten.

b) Falls es tatsächlich nötig erscheint, müssen Sie jedes Stromquellen-Modell-Element mit einem mehr oder weniger hochohmigen parallelgeschalteten Widerstand ergänzen.

c) Wenn Sie im Dialogfenster *Global Settings* dem GS-Parameter  $R_{\text{P\_FOR\_ISOURCE}}$  einen Wert  $\neq 0$  wie z. B. 1 MΩ bis 1 TΩ geben, fügt MC automatisch einen Widerstand mit diesem Wert parallel zu jedem Stromquellen-Modell-Element. Der Defaultwert 0 deaktiviert dies.

#### 1.3 Maschen aus Spannungsquellen und/oder ideale Spulen?

Eine Masche, deren Zweige nur aus Spannungsquellen und/oder ideale Spulen besteht, verursacht Konvergenzprobleme, da Spannungsquellen und ideale Spulen „spannungsdefinierte“ Zweige bilden. Eine Masche mit spannungsdefinierten Zweigen ist häufig Ursache von Konvergenzproblemen, da als Ergebnis der **Maschenregel** ( $\sum u = 0$  V, 2. kirchhoffsches Gesetz) ein Wert  $\neq 0$  V möglich ist. MC prüft den Schaltplan.

Lösung:

Schalten Sie in Reihe einen für die Schaltung kleinen Widerstand ( $1 \mu\Omega$  bis  $1 \Omega$ ). Machen Sie den Wert nicht zu klein, oder es ergibt sich weiterhin aufgrund einer ungünstig besetzten Matrix ein Konvergenzproblem.

**1.4 Kurzschlüsse und Leerläufe (hat MC alle Verbindungen erkannt)?**

Wenn der eingegebene Schaltplan am Bildschirm so aussieht, wie Sie es erwarten, kann es aber sein, dass zwei Modell-Elemente nur optisch und scheinbar durch eine Verbindungslinie verbunden sind, MC diese Verbindung aber nicht erkannt hat.

Lösung:

Lassen Sie sich mit der **SF Node Numbers** die Knotennummern anzeigen. Wird pro Verbindung nur eine Nummer angezeigt, ist dieses ein Knoten. Werden zwei oder mehr Knotennummern an einer optischen Verbindung angezeigt, so hat MC die gewünschte Verbindung nicht erkannt.

**1.5 Floating Nodes (leerlaufende Knoten, offene Anschlüsse) vorhanden?**

*Floating Nodes* sind leerlaufende Knoten bzw. offene Anschlüsse von Modell-Elementen (in gut gezeichneten Verdrahtungsplänen oft mit  $nc = \underline{n}ot \underline{c}onnect\acute{e}d$  gekennzeichnet). Solche Knoten können Konvergenzprobleme verursachen.

Lösungsalternativen:

a) Vermeiden Sie von vornherein *Floating Nodes*.

b) Aktivieren Sie im Dialogfenster *Preferences* in der Rubrik **Options** → **Analysis** die **CB**  **Floating Nodes Check**. MC prüft dann, ob an jedem Knoten mindestens zwei Modell-Elemente angeschlossen sind. Abhilfen siehe 1.1.

**2. Prüfen Sie Modell-Beschreibungen und Parameterwerte:**

**2.1 Modell-Typ D (Diode): Parameter  $R_S = 0$  ?**

Wenn der Parameter  $R_S$  (*Parasitic series resistance*, Bahnwiderstand) des Modell-Typs D den Parameterwert 0 hat, wird für  $R_S$  der Wert  $R_{MIN}$  genommen (zu  $R_{MIN}$  siehe 3.1). Aufgrund der starken Nichtlinearität der Shockley-Gleichung bei Spannungseinprägung kann ein zu geringer Wert zu numerisch gigantisch großen Stromwerten führen, die ein Konvergenzproblem verursachen können.

Eine mit  $R_S = 0$  modellierte Diode in Reihe zu einer Induktivität ist häufig die Ursache für eine Fehlermeldung in der Art „*time step too small*“ (Zeitschrittweite zu klein), wenn ein Mindestzeitschrittwert unterschritten wird. Außerdem verlängert sich die Rechenzeit wegen benötigter sehr kleiner Zeitschrittweiten mehr oder weniger deutlich.

Lösung:

Geben Sie dem Parameter  $R_S$  einen Wert, der  $> 0$  und  $> R_{MIN}$  ist, z. B.  $1 \text{ m}\Omega$ . Es werden numerisch unkritische Stromwerte berechnet.

**2.2 Modell-Typ D (Diode): Parameter  $R_L = 0$  ?**

Der Parameter  $R_L$  (*Leakage resistance*) ist der Wert eines Widerstandes parallel zur Diode. Damit wird im sperrenden Zustand anstelle des theoretischen Sperrstroms, der sich zu  $I_S$  ergibt, ein realistischerer Wert simuliert. Der Defaultwert 0 wird von MC als  $\infty \Omega$  interpretiert!

Lösung:

Geben Sie dem Parameter  $R_L$  mit  $R_L > 0$  einen realitätsnäheren Wert wie z. B.  $1 \text{ M}\Omega$  bis  $1 \text{ G}\Omega$ .

**2.3 Modell-Typ NPN, NJT, NMOS usw.: Parameter der Bahnwiderstände = 0 ?**

siehe 2.1. Geben Sie den Parametern für die Bahnwiderstände (z. B.  $R_B$ ,  $R_C$ ,  $R_E$ , usw.) Werte, die  $> 0$  und  $> R_{MIN}$  sind.

**2.4 Kapazitätswert/e bzw. Kapazitäts-Parameterwert/e = 0 ?**

Haben alle kapazitiven Modell-Elemente / Kapazitäts-Parameter Kapazitätswerte  $> 0$  ?

Lösung:

Geben Sie den Kapazitäten einen Wert  $> 0$ , der im Vergleich zu anderen Kapazitätswerten der simulierten Schaltung hinreichend klein ist (z. B.  $1 \text{ fF} = 0,001 \text{ pF}$ ).

Ändern Sie auch in den *.MODEL*-Statements für Kapazitäts-Parameter den oftmals verwendeten Defaultwert 0 in einen „kleinen“ Wert, der aber  $> 0$  ist.

**2.5 Reihenschaltung aus Induktivitäten und Modell-Elementen, die als Schalter wirken?**

Kommen diese Reihenschaltungen vor und verursachen Konvergenzprobleme?

Lösung:

Fügen Sie parallel zum schaltendem Modell-Element einen Widerstand wie z. B. 10 k $\Omega$  bis 1 M $\Omega$ . **Als schaltendes Modell-Element gelten neben den Modellen für Schalter auch Modelle für Dioden, alle Transistoren und andere.**

Auch wenn Ihre Simulation kein Konvergenzproblem hat, kann diese Maßnahme deutlich die Rechenzeit verkürzen.

**2.6 MOSFET-Modelle: Parameter  $L_{AMBDA} = 0$  ?**

Verursacht ein MOSFET-Modell mit dem Parameterwert  $L_{AMBDA} = 0$  Konvergenzprobleme?

Lösungsalternativen:

a) Geben Sie dem Parameter  $L_{AMBDA}$  einen kleinen Wert (z. B. 0,01 bis 0,001). Dies ergibt einen endlichen Wert für den differentiellen Ausgangsleitwert, der ansonsten 0 A/V wäre.

b) Fügen Sie parallel zur D-S-Strecke einen Widerstand hinzu mit einem Wert zwischen 1 k $\Omega$  bis 10 k $\Omega$ . Dies hat einen vergleichbaren Effekt. Allerdings wirkt dieser Widerstand auch bei sperrendem MOSFET, sodass sich die am Anschluss Drain angeschlossene Schaltung „auf- bzw. entladen“ kann.

**3. Als vorletzte Maßnahmen: GS-Parameter des Dialogfensters *Global Settings* optimieren:**

**3.1  $R_{MIN}$  vergrößern**

$R_{MIN}$  (Defaultwert 1  $\mu\Omega$ ) ist der minimale Widerstandswert eines Modells für einen ohmschen Widerstand. Dies betrifft das Modell-Element *Resistor* und die Bahnwiderstände in Modellen von Halbleiterbauelementen.

**3.2  $R_{P\_FOR\_ISOURCE}$  aktivieren**

siehe 1.2c.

**3.3  $R_{SHUNT}$  aktivieren**

$R_{SHUNT}$  (Defaultwert 0) ist der Wert der Widerstände, die MC von jedem Knoten nach *Ground* zusätzlich platziert, wenn  $R_{SHUNT} \neq 0$  (siehe 1.1d).

**3.4  $C_{SHUNT}$  aktivieren**

$C_{SHUNT}$  (Defaultwert 0) ist der Wert der Kapazitäten, die MC von jedem Knoten nach *Ground* zusätzlich platziert, wenn  $C_{SHUNT} \neq 0$  (siehe 1.1d). Damit kann pauschal die Wirkung von Leitungskapazitäten nachgebildet werden, die auch in realen Schaltungen stabilisierend wirken können, wenn sie zusammen mit anderen Bauelementen ein Tiefpassverhalten bewirken.

**3.5  $R_{NODE\_GND}$  aktivieren**

siehe 1.1c.

**3.6  $G_{MIN}$  vergrößern**

$1/G_{MIN}$  (Defaultwert  $(1 \text{ pS})^{-1} = 1 \text{ T}\Omega$ ) ist der maximale Widerstandswert eines p-n-Übergangs bei Modellen von Halbleiterbauelementen. Ein größerer Wert für  $G_{MIN}$  verkleinert diesen Widerstandswert, was ggf. die Berechnung eines Arbeitspunktes konvergieren lässt.

**3.7  $R_{ELTOL}$  vergrößern**

$R_{ELTOL}$  (Defaultwert  $10^{-3}$ ) stellt den maximal zulässigen Wert des *relativen Fehlers* von *Strom- und Spannungswerten* ein. Dieser Wert hat nichts mit der Genauigkeit oder Realitätsnähe des Simulationsergebnisses zu tun! Ein größerer Wert für  $R_{ELTOL}$  (z. B.  $10^{-2}$ ) kann zur Konvergenz von schwierigen Simulationen führen.

**3.8  $A_{BSTOL}$  oder  $V_{NTOL}$  vergrößern**

$A_{BSTOL}$  (Defaultwert  $10^{-12} \text{ A} = 1 \text{ pA}$ ) stellt den maximal zulässigen Wert des *absoluten Fehlers* von *Stromwerten* ein und wird um  $R_{ELTOL}$  ergänzt. Der Defaultwert ist ein brauchbarer Wert für Simulationen, in denen die Ströme typischerweise im 10-mA-Bereich oder kleiner sind.

$V_{NTOL}$  (Defaultwert  $10^{-6} \text{ V} = 1 \mu\text{V}$ ) stellt den maximal zulässigen Wert des *absoluten Fehlers von Spannungswerten* ein und wird um  $R_{ELTOL}$  ergänzt. Der Defaultwert ist ein brauchbarer Wert für Simulationen, in denen die Spannungen typischerweise im 10-V-Bereich oder kleiner sind.

Falls in Ihrer Simulation extrem größere Werte für Ströme und/oder Spannungen vorkommen, können Sie die Werte für  $A_{BSTOL}$  bzw.  $V_{NTOL}$  proportional vergrößern.

Beispiel: Sie erwarten als Maximalwerte der Simulationsergebnisse  $I_{max}$  ca. 100 A und  $U_{max}$  ca. 500 V. Vergrößern Sie  $A_{BSTOL}$  auf den Wert  $1 \text{ pA} \cdot 100 \text{ A} / 10 \text{ mA} = 10 \text{ nA}$ . Vergrößern Sie  $V_{NTOL}$  auf den Wert  $1 \mu\text{V} \cdot 500 \text{ V} / 10 \text{ V} = 50 \mu\text{V}$ .


### 3.9 $I_{TL1}$ vergrößern, wenn Konvergenzproblem bei der Arbeitspunktberechnung

$I_{TL1}$  (Defaultwert 100) stellt die maximale Anzahl von numerischen Iterationen (*iteration limit 1*) bei der Arbeitspunktberechnung ein. Ein Vergrößern dieses Wertes hilft manchmal. Es gibt Simulationen, die konvergieren erst mit  $I_{TL1} = 150$  bis 300 (siehe auch 5.6 *Convergence Assist*).

### 3.10 $I_{TL4}$ vergrößern, wenn Konvergenzproblem bei TR-Analyse

$I_{TL4}$  (Defaultwert 10) stellt die maximale Anzahl von numerischen Iterationen (*iteration limit 4*) bei der TR-Analyse für einen Zeitpunkt ein. Wird die Anzahl erreicht, bricht der Algorithmus die Berechnung für diesen Zeitpunkt ab, reduziert die Schrittweite und versucht für den sich aus dieser kleineren Schrittweite ergebenden neuen Zeitpunkt eine konvergierende Lösung zu finden (siehe auch 5.6 *Convergence Assist*).

### 3.11 Integrationsmethode ändern

Im Dialogfenster *Global Settings* wird in der Rubrik *Method* die Integrationsmethode ausgewählt. Defaultmäßig ausgewählt ist die **CB**  **Trapezoidal**. Diese Integrationsmethode ist für die meisten Simulationen die am besten konvergierende.

Werden leistungselektronische Schaltungen simuliert, kann es vorteilhaft sein, auf die Integrationsmethode **Gear** zu wechseln. Diese ist ein BDF-Algorithmus basiert auf Arbeiten von C. W. Gear.

## 4 Arbeitspunktberechnung bei TR-Analyse deaktivieren (Startwerte vorgeben)

- Falls das Konvergenzproblem bei der Arbeitspunktberechnung auftritt, deaktivieren Sie diese (geht nur bei der TR-Analyse) und lassen Sie die Simulation so „einschwingen“ wie es in einer realen Schaltung geschieht, wenn alle Energiespeicher (alle  $L$ s und  $C$ s) „leer“, d. h. energielos, sind und Sie die Spannungsversorgung einschalten.

Falls Sie mit dem so gefundenen Arbeitspunkt weitere Simulationen vorhaben, können Sie die berechneten Arbeitspunktwerte mit dem *State Variables Editor* in einer Datei abspeichern. Zukünftige Simulationen können dann bei diesem Arbeitspunkt starten, indem die Werte aus der Datei eingelesen werden. Dazu müssen Sie im Dialogfenster *...Analysis Limits* im Listenfeld *State Variables* die Option *Read* auswählen.

In den folgenden Simulationen werden Sie den simulierten Schaltplan ggf. verändern, sodass Sie die Arbeitspunktberechnung wieder aktivieren wollen. Die gespeicherten Werte können trotzdem als Startwerte für diese erneute Arbeitspunktberechnung helfen, dass diese nun konvergiert, während die Arbeitspunktberechnung mit den Startwert 0 für alle Zustandsvariablen ggf. nicht konvergiert.

## 5 Letzte Maßnahmen (in [MC-REF] mit *Try something drastic* übertitelt):

### 5.1 Alle DC-Quellen „langsam hochfahren“:

Ersetzen Sie alle Gleichspannungs- und Gleichstromquellen durch Quellen, die einen linearen zeitlichen Anstieg (Rampe) ermöglichen. Parametrieren Sie die Quellen so, dass sie vom Startwert 0 V, 0 A auf den gewünschten „DC-Endwert“ ansteigen. Starten Sie eine TR-Analyse. Deaktivieren Sie die Arbeitspunktberechnung und bestimmen Sie den Arbeitspunkt mittels der TR-Analyse.

### 5.2 .NODESET-Statement verwenden

Das *.NODESET*-Statement ermöglicht, für Knoten und Zweigströme von Ihnen geschätzte oder aus anderen Simulationen zuvor ermittelte Werte als Startwerte für die Arbeitspunktberechnung einzugeben. Falls die geschätzten Werte in der Nähe des Arbeitspunktes liegen, kann dies dazu führen, dass mit diesen Startwerten die Arbeitspunktberechnung konvergiert.

### □ 5.3 OFF-Keyword eines Modell-Elements verwenden

Mit dem OFF-Keyword können Sie ein Modell-Element deaktivieren. Das bedeutet, dass zwischen allen Anschlüssen Leerläufe angenommen werden. Wenn die restliche Schaltung kein Konvergenzproblem mehr verursacht, haben Sie damit ggf. ein einzelnes Modell-Element als Ursache identifiziert. Dies ist eine sehr hilfreiche Methode. Prüfen Sie die Modell-Beschreibung und Parameterwerte (siehe 2). Falls das keine Lösung ergibt, geht es mit Punkt 5.4 weiter.

### □ 5.4 IC-Option eines Modell-Elements verwenden

Mit der IC-Option (*initial condition*) können Sie je nach Modell-Element für eine Spannung/einen Strom (ggf. auch mehrere) einen Schätzwert als Anfangsbedingung eingeben.

### □ 5.5 Numeric Output File prüfen

Wenn ein Konvergenzproblem auftritt, schauen Sie in die Datei *Numeric Output* der jeweiligen Analyseart (Dateityp \*.NO). Hier finden Sie ggf. Hinweise zu dem Modell-Element, das das Konvergenzproblem verursacht und ggf. eine Hinweis auf die Ursache.

### □ 5.6 Aktivieren bzw. nutzen Sie den *Convergence Assist*

Als Defaulteinstellung ist im Dialogfenster *Preferences* in der Rubrik **Options** → **Analysis** die **CB**  **Convergence Assist** aktiviert. Dieser Assistent probiert verschiedene Kombinationen von Parametern der *Global Settings* (siehe 3) aus, um ein Konvergenzproblem zu lösen. Falls er Erfolg hat, platziert er im Schaltplan mit .OPTIONS-Statements die Parameterwerte, mit denen Konvergenz erzielt wurde. Bei weiteren Simulationen werden anstelle der jeweiligen Werte der *Global Settings* in dieser Schaltplandatei lokal diese Werte verwendet.

### □ 5.7 Wechsel der Arbeitspunkt-Berechnungsmethode

Wenn das Konvergenzproblem während einer Arbeitspunktberechnung auftritt, probieren Sie eine andere Arbeitspunkt-Berechnungsmethode aus. Sie finden Hinweise in [MC-REF] am Ende von *Chapter 6 Transient Analysis*. Folgende fünf Methoden sind in MC9 implementiert:

**Standard Newton-Raphson:** Dies ist die einfachste und die am häufigsten erfolgreiche Methode.

**Source Stepping:** siehe [MC-REF].

**Diagonal  $G_{\text{MIN}}$ -Stepping:** siehe [MC-REF].

**Junction  $G_{\text{MIN}}$ -Stepping:** siehe [MC-REF].

**Pseudo Transient:** siehe [MC-REF].

## 11 Alphabetische Liste der Dateitypen/Dateityp-Endungen in MC9

Die Tabelle enthält *alle Angaben* aus dem Anhang *Appendix A - File types* aus [MC-REF].

Zur schnelleren Orientierung sind die 60 aufgeführten Dateitypen folgenden Gruppen zugeordnet:

- Aus = Ausgabedatei mit Simulationsergebnissen
- Bib = Bibliotheksdatei und Datei mit Inhalten, auf die MC zugreift
- Ein = Datei mit Inhalten, die MC einliest, z. B. die Schaltplandatei \*.CIR
- Grafik = Datei mit Bildinhalten
- MDL = Datei, die bei Verwendung des MC-Programms MODEL entsteht
- PCB = von MC erzeugte Datei zum Export in PCB-Programme
- Progr. = Programmdatei
- Sonst. = sonstige Dateien
- TD = Textdatei, d. h. die Datei ist mit einem normalem Editor lesbar

**Fett** hervorgehoben sind wichtige Dateitypen, damit MC richtig arbeitet. Sie sollten nicht gelöscht werden!

Dateityp- Endung	Gruppe	Bedeutung
*.1, ...*.n	Aus	<i>Wort-Case</i> -Schaltplandateien bei einer Monte-Carlo-Analyse
*.AMC	Aus	<u>AC-analysis Monte-Carlo</u> , beinhaltet Statistik-Daten einer Monte-Carlo-Analyse
*.ANO	Aus	<u>AC-analysis numeric output</u> , numerische Daten einer AC-Analyse
*.ASA	Aus	<u>AC-analysis save analysis/probe simulation</u> , Analysedaten einer AC-Analyse
*.BAK_*	Sonst.	<u>backup</u> , Sicherungskopie einer Schaltplandatei, z. B. UE_2-10_HOCHPASS.BAK_CIR
*.BIN	<b>Bib</b>	<u>binary</u> , enthält Schaltungsvorlagen für den <i>Filter Designer</i>
*.BMP	Grafik	<u>bit map</u> , Grafikdatei im BMP-Format
*.BOM	PCB	<u>bill of materials</u> , enthält die „Stückliste“ einer simulierten Schaltung
*.CAP	<b>Bib</b>	<u>capacitor</u> , Liste mit Standard-Kapazitätswerten (z. B. nach E-Reihe)
*.CIR	Ein	<u>circuit</u> , MC-Schaltplandatei
*.CKT	Ein	<u>circuit</u> , TD mit einer SPICE-Netzliste, die eine Schaltung beschreibt
*.CMP	<b>Bib</b>	<u>component</u> , beinhaltet Daten der <i>Component Library</i>
*.CNT	<b>Progr.</b>	<u>content</u> , beinhaltet Daten für die MC-Hilfe ( <i>Help</i> )
*.CSV	Aus	<u>comma separated value file</u> , beinhaltet num. Ausgabedaten im CSV-Excel-Format
*.DANO	Aus	<u>Dynamic-AC-analysis numeric output</u> , numerische Daten einer Dynamic-AC-Analyse
*.DAT	Ein	<u>data</u> , beinhaltet benutzerspezifische Daten aus <i>Preferences</i>
*.DDNO	Aus	<u>Dynamic-DC-analysis numeric output</u> , numerische Daten einer Dynamic-DC-Analyse
*.DMC	Aus	<u>DC-analysis Monte-Carlo</u> , beinhaltet Statistik-Daten einer Monte-Carlo-Analyse
*.DNO	Aus	<u>DC-analysis numeric output</u> , numerische Daten einer DC-Analyse
*.DOC	Aus	<u>documentation</u> , Ergebnisdatei, wenn Simulationslauf im Batch-Modus gestartet wurde
*.DSA	Aus	<u>DC-analysis save analysis/probe simulation</u> , Analysedaten einer DC-Analyse
*.EMF	Grafik	<u>extended metafile</u> , Grafikdatei im WINDOWS-EMF-Format
*.ERR	PCB	<u>error</u> , enthält Fehlermeldungen bei der Generierung von PCB-Daten
*.EXE	<b>Progr.</b>	<u>execution</u> , ausführbare Programmdateien von MC
*.FLT	Ein	<u>filter</u> , beinhaltet benutzerspezifische Daten des <i>Filter Designers</i>
*.GIF	Grafik	<u>graphics interchange format</u> , Grafikdatei im GIF-Format
*.HLP	<b>Progr.</b>	<u>help</u> , MC-Hilfe-Dateien
*.INC	Ein	<u>include</u> , beinhaltet benutzerspezifische Daten der Datei MCAP.INC

*.IND	Bib	<u>inductor</u> , Liste mit Standard-Induktivitätswerten (z. B. nach E-Reihe)
*.INX	Bib	<u>index</u> , beinhaltet Indexdaten zum schnellen Auffinden einer Modellbeschreibung
*.JED	Ein	<u>jedec</u> , beinhaltet JEDEC-Daten, um damit ein PLA in MC zu modellieren
*.JPG	Grafik	<u>joint photographic expert group</u> , Grafikdatei im JPG-Format
*.LBR	Bib	<u>library binary</u> , BD mit Modellbeschreibungen, die nur mit dem <i>Model Editor</i> von MC gelesen und bearbeitet werden können
*.LIB	Bib	<u>library</u> , TD mit SPICE-Modellbeschreibungen
*.MAC	Bib	<u>macro</u> , MC-Schaltplandatei, die als <i>Macro</i> definiert wurde
*.MC9	Progr.	<u>MICRO-CAP9</u> , enthält Skript der Demos und Texte der Fehlermeldungen
*.MDL	MDL	<u>model</u> , enthält Daten des MC-Programms MODEL
*.NET	PCB	<u>netlist</u> , enthält generierte Netzlistendaten für ORCAD, Protel, PADS oder Accel
*.OPT	MDL	<u>optimization</u> , Ergebnisdatei, wenn MODEL im Batch-Modus gestartet wurde
*.PDF	Sonst.	<u>portable document format</u> , enthält Dokumente wie [MC-REF], [MC-USE] usw.
*.PKG	Bib	<u>package library</u> , Bibliothek mit Gehäusedaten
*.PNG	Grafik	<u>portable network graphics</u> , Grafikdatei im PNG-Format
*.RES	Bib	<u>resistor</u> , TD mit Standard-Widerstandswerten (z. B. nach E-Reihe)
*.SAN	Bib	<u>sanity</u> , TD, enthält Min-, Max- und Defaultwerte für Plausibilität von Parameterwerten
*.SEN	Aus	<u>sensitivity</u> , beinhaltet Ergebnisse einer Sensivity-Analyse
*.SHP	Bib	<u>shape</u> , Bibliothek mit Daten der Modell-Symbole
*.STM	Ein	<u>stimulus</u> , enthält Daten für eine Quelle zur Stimulierung einer Digital-Schaltung
*.SVV	Aus	<u>state variables</u> , Textdatei mit Ergebnissen des <i>State-Variable-Editors</i>
*.TIF	Grafik	<u>tagged image file format</u> , Grafikdatei im TIF-(TIFF-)Format
*.TMC	Aus	<u>TR-analysis Monte-Carlo</u> , beinhaltet Statistik-Daten einer Monte-Carlo-Analyse
*.TNO	Aus	<u>TR-analysis numeric output</u> , numerische Daten einer TR-Analyse
*.TOP	Ein	<u>TR-analysis state variable output</u> , BD mit den Werten der Zustandsvariablen ( <i>Read</i> )
*.TSA	Aus	<u>TR-analysis save analysis/probe simulation</u> , Analysedaten einer TR-Analyse
*.TXT	Sonst.	<u>text</u> , Textdatei
*.USR	Ein	<u>user</u> , benutzerspez. Datei zur Ausgabe von Kurven oder für die Quelle <i>User Source</i>
*.WMF	Grafik	<u>WINDOWS metafile</u> , Grafikdatei im WMF-Format
*.WNO	Aus	<u>W numeric output</u> , numerische Daten einer W-Analyse (Verzerrungsanalyse)
*.WSA	Aus	<u>W-analysis save analysis/probe simulation</u> , Analysedaten einer W-Analyse
WFB.BIN	Aus	<u>waveform buffer file binary</u> , Binär-Ausgabedatei des <i>Waveform Buffers</i>

## 12 Liste leicht vorkommender Fehler beim Einstieg in MC9

In dieser Liste sind die richtigen Varianten leicht vorkommender Fehler beim Einstieg in MC aufgeführt. Diese stammen aus den Erfahrungen des Autors, der Rubrik FAQ der Homepage der Firma Spectrum Software und aus [MC-REF] und sollen ähnlich wie die Konvergenz-Checkliste helfen, schnell aus diesen Fehlern zu lernen und sie nicht mehr zu wiederholen. Die Darstellung wurde positiv formuliert, sodass Sie richtige Darstellung sehen. Was falsch gemacht wurde, sollte erkennbar sein.

- 1 Eingabefehler
- 2 Schaltplanfehler
- 3 Analysefehler
- 4 AP-Berechnungsfehler
- 5 Modellfehler

---

1 „MEG“ statt „M“ für  $10^{+6}$  ( $R_1 = 1,5 \text{ M}\Omega$ : „1.5MEG“ eingeben, ~~„1.5M“~~).

---

1 Modell-Namen exakt eingeben, keine Tippfehler machen.

---

1 ( . ) statt ( , ) als Dezimaltrennzeichen („15.3k“ eingeben, ~~„15,3k“~~).

---

1 Vorsatz direkt hinter Zahl schreiben, kein Leerzeichen („15.3k“ eingeben, ~~„15.3 k“~~).

---

1 Wenn Sie die Einheit Farad angeben: immer Vorsatz verwenden ( $C_1 = 5 \text{ F}$ : „5000mF“ eingeben, ~~„5F“~~).

---

1 ( , ) anstelle eines Leerzeichens, wenn Eingabewerte zu trennen sind (z. B. „max,min,step“: „2.5,-5,0.5“)

---

1 Parameterwerte richtig eintippen.

---

2 Jeder Knoten muss DC-Pfad nach *Ground* haben.

---

2 In Schaltplan muss ein Knoten *Ground* sein.

---

2 In jeder Masche einen Widerstand oder Modell-Element mit Widerstandswirkung.

---

2 Mit **SF Show Node Numbers** prüfen, dass MC auch die gewünschten Verbindungen erkannt hat.

---

3 Schrittweiten klein genug wählen (Anhaltswert: *Range/1000*).

---

3 bei AC-Analyse: logarithmisches Maß mit Funktion  $\text{DB}(V(1))$  berechnen und anzeigen lassen oder  $20 \cdot \text{LOG}(\text{MAG}(V(1)))$  verwenden, da die meisten mathematischen Funktionen die komplexwertigen Ergebnisse verarbeiten können.

---

3 bei AC-Analyse: Denken Sie daran, dass die Variablen für Strom und Spannung komplexwertige Zahlen sind und dass die meisten mathematischen Funktionen in MC komplexwertige Zahlen verarbeiten.

---

3 MC greift auf Parameterwerte einer Bibliothek zu, die anders sind als die zuvor verwendeten, weil Sie

- a) die Schaltplandatei auf einer anderen MC-Installation simulieren,
- b) Sie oder jemand anderes zwischenzeitlich die Parameterwerte in der Bibliothek geändert hat,
- c) aufgrund eines Programm-Updates eventuell auch Bibliothekswerte verändert wurden.

---

4 *Operating-Point*-Berechnung in TR-Analyse bewusst aktivieren oder deaktivieren

---

4 Falls der Schaltplan nichtlineare Modell-Elemente (Dioden-Modell usw.) enthält: Bei einer AC-Analyse wird vor der eigentlichen komplexen Wechselstromrechnung der Arbeitspunkt berechnet. Aus den Ergebnissen werden Kleinsignal-Kennwerte berechnet, mit denen eine Ersatzschaltung gebildet wird. Die komplexe Wechselstromrechnung wird für diese Ersatzschaltung durchgeführt.

---

4 Parameter der Quellen auf richtigen Wert für AP-Berechnung bei AC-/TR-Analyse einstellen.

---

5 Modellbeschreibungen (.MODEL-Statements, *Macros* oder *Subcircuits*), **egal ob aus der Programm-bibliothek, von der Homepage eines Herstellers oder aus sonstiger Quelle**, vor der ernsthaften Verwendung durch einfache Simulationen prüfen (Konzept MUT, *Model Under Test*).

---

### 13 Beschränkungen der Demoversion von MC9

Folgende Beschränkungen hat die Demoversion von MC9:

---

Schaltplanumfang	Max. 50 Modell-Elemente (R, C, L, D, BJT, OP, <i>Subcircuits</i> , usw.) oder ggf. max. 100 Matrix-Gleichungen. Damit sind nicht Modell-Gleichungen gemeint. Ein Modell-Element <i>Transformer</i> z. B. bewirkt aufgrund der Verkopplung zwei Matrix-Gleichungen. Bei „normalen“ Simulationen wird die 50-Modell-Elemente-Grenze die sein, die ggf. erreicht wird.
spezielle Modelle	Von den folgenden Modell-Typen können max. 5 gleichzeitig simuliert werden: BJT:       NXP (Philips) Mextram NXP (Philips) Modella MOSFET:   BSIM3 BSIM4 EKV Philips Models IGBT:       IGBT
Rechenzeit	Je mehr Modell-Elemente der zu simulierende Schaltplan enthält, um so mehr ist die Rechenzeit relativ zur Vollversion verlängert: bei wenigen Modell-Elementen gar nicht, bei 50 Modell-Elementen ca. 3 mal länger.
Features	Eingeschränkt sind <i>Stepping</i> (es kann nur eine Größe verändert werden) <i>Optimization</i> <i>Filter Design</i> <i>3D plots</i> <i>PCB functions (printed circuit boards)</i> <i>Performance plots</i> <i>Multiple parameter stepping</i> . Das Programm MODEL zur Parameterwert-Extraktion aus Datenblattangaben ist nicht freigeschaltet.
Bibliotheken	Es wird eine kleine Bibliotheksdatei (SMALL.LIB) und einige weitere mit ausgesuchten Parameterwertesätzen mitgeliefert. <i>Component Editor</i> , <i>Shape Editor</i> und <i>Package Editor</i> sind bzgl. einiger Befehle eingeschränkt.

---

## 14 Was kann MC9 noch? (Übersicht über die Demos)

Zu den aufgeführten Themen (siehe auch Abschn. 1.4 Bild 1-4 im Buch) können Sie sich eine Demo anschauen. Die im Buch erwähnten/empfohlenen sind gekennzeichnet. Die Demos greifen auf MC-Musterschaltungen zu. Diese sind als Kopie im Ordner C:\...\EIGENE MC-DATEIEN\MC-CIRS enthalten, sodass MC auch bei der eingestellten Pfadsammlung „Meine Pfade“ darauf zugreifen kann.

Die Demos laufen selbständig ab. Es werden ab und zu Textfenster eingeblendet. Falls Sie mehr Zeit haben möchten, um ein Textfenster zu lesen: *Sofort nach Erscheinen* des Textfensters auf dem Bildschirm **<Pause>** drücken. Damit hält die Demo an. Erneutes Drücken von **<Pause>** setzt die Demo fort. Drücken der **<Leerzeilentaste>** überspringt die Verzögerungsschleife für ein Textfenster. **<Esc>** bricht die Demo ab.

Name der Demo	ca.	benötigte MC-Musterschaltung	zeigt
General Demo...	83 min	alle aufgeführten	alle Demos nacheinander!
3D Plots Demo...	4 min	DIFFAMP.CIR	Differenzverstärker mit 4 BJTs
Adding New Parts Demo... (S. 305)	8 min	OP27.LIB	SPICE-Netzliste einer Ersatzschaltung für den kommerziellen OPs OP27
Analog and Digital Demo...	2 min	AD16.CIR	16-bit-A/D-D/A-Wandlung
Analysis Demo... (S. 61)	8 min	GILBERT.CIR	DC-, AC-, TR-Analyse, Gilbert-Multiplizierer
Animation Demo...	5 min	ANIM.CIR ANIM3.CIR ANIM5.CIR	7-Segment-Anzeige Drei 7-Segment-Anzeigen Viele animierte Modell-Elemente
Dynamic AC Demo... (S. 61)	5 min	UA741.CIR	OP $\mu$ A 741 auf Transistorebene
Dynamic DC Demo... (S. 36)	4 min	MIXED4.CIR	gemischte analog-digitale Schaltung
Filter Demo...	5 min	keine	–
Fourier Demo...	5 min	FFT1.CIR	Beispiel für DSP-Funktionen
IBIS Demo...	4 min	keine	–
Monte Carlo Analysis Demo...	2 min	RISE.CIR	L-C-R-Tiefpass 2. Ordnung
Optimizer Demo...	5 min	OPT1.CIR	Spannungsteiler
Performance Plots Demo...	5 min	PERF1.CIR	L-C-R-Tiefpass 2. Ordnung
Probe Demo...	2 min	O7.CIR	gemischte analog-digitale Schaltung
RF Demo...	3 min	SPAR1.CIR	2-Tore zur Demo der S-Parameter
Schematic Demo... (S. 30)	9 min	keine	–
Sensitivity Demo...	3 min	DIFFAMP.CIR	s. o.
Stepping Demo... (S. 139)	2 min	DIFFAMP.CIR	s. o.
Transfer Function Demo...	2 min	DIFFAMP.CIR	s. o.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	V
<b>1 Lesetipps und wichtige Hinweise zu diesem Buch</b> .....	1
1.1 Schreibweisen, Typografie und Symbole.....	1
1.2 Downloads, Ordner, Pfade, Voreinstellungen, Überblick.....	3
1.2.1 Installation des Programms .....	4
1.2.2 Einrichten einer Ordnerstruktur für eigene MC-Dateien .....	4
1.2.3 Einrichten einer Voreinstellung von Pfaden und Aufräumen .....	5
1.2.4 Prüfen und Ändern weiterer Voreinstellungen ( <i>Preferences</i> ).....	6
1.2.5 Überblick über wichtige Dateitypen .....	8
1.3 WINDOWS-Bedienungselemente für MICRO-CAP.....	9
1.3.1 Die Maus und ihre Bedienung .....	9
1.3.2 Die Tastatur und ihre Bedienung .....	10
1.3.3 Die Fenster und ihre Bedienung.....	10
1.3.4 Die Menüs und ihre Bedienung .....	12
1.4 Musterschaltungen, Demos, Übungen und weitere Hilfen.....	13
1.5 Simulation elektronischer Schaltungen – Worum geht es?.....	15
1.6 Ein Blick in die Geschichte.....	18
<b>2 Berechnung und Simulation einer passiven Schaltung: Beispiel 10:1-Teilertastkopf</b> .....	20
2.1 Realität und Modellbildung durch eine Ersatzschaltung.....	20
2.2 Theoretische Erkenntnisse als Sinn und Zweck eines Modells .....	22
2.2.1 Übertragungseigenschaften bei Sinusspannungen und Gleichspannungen .....	23
2.2.2 Übertragungseigenschaften bei Rechteckspannungen .....	25
2.2.3 Ergebnisse, Sinn der Berechnungen und Übungen.....	26
2.3 Eingabe eines Schaltplans .....	30
2.4 Gleichstrom-Analyse und Ausgabe im Schaltplan (Dynamic-DC-Analyse) .....	36
2.5 Gleichstrom-Analyse und Ausgabe als Kurve (DC-Analyse).....	38
2.6 Wechselstrom-Analyse und Ausgabe als Kurve (AC-Analyse).....	44
2.7 Transienten-Analyse und Ausgabe als Kurve (TR-Analyse) .....	55
2.8 Wechselstrom-Analyse und Ausgabe im Schaltplan (Dynamic-AC-Analyse) .....	61
2.9 Weitere Übungen zu Kapitel 2 .....	64
<b>3 Modelle als zentrale Elemente einer Simulation: Beispiel Diode 1N4001</b> .....	68
3.1 Einfache Modelle für das Verhalten einer realen Diode .....	68
3.2 Parameterwert-Extraktion und -Verifikation am Beispiel der Diode 1N4001 .....	71
3.3 Definition und Erklärung wichtiger Begriffe .....	74
3.4 Dioden-Modelle in MC9: Keine Angst vor Parametern.....	77
3.5 Kleiner Rundgang durch Bibliotheken.....	81
3.6 Verifikation von Modelle und Parameterwertesätzen .....	84
3.6.1 Diodenverhalten im Durchlassbereich .....	86
3.6.2 Diodenverhalten im Sperrbereich .....	92
3.6.3 Diodenverhalten im Durchbruchbereich.....	93
3.6.4 Schaltverhalten von Dioden .....	96

3.7	Weitere Übungen zu Kapitel 3 .....	100
3.7.1	Parametrieren einer Z-Diode in MC.....	100
3.7.2	Parametrieren einer LED in MC .....	102
3.7.3	Gleichrichter-Schaltungen.....	103
3.7.4	Diodenverhalten bei einer AC-Analyse .....	111
<b>4</b>	<b>Werkzeuge zur Auswertung eines Simulationsergebnisses (<i>Scope</i>) .....</b>	<b>114</b>
4.1	Übersicht und bekannte Werkzeuge vorhergehender Kapitel .....	114
4.2	Auswählen, Skalieren, Messen und Beschriften .....	116
4.2.1	Objekt auswählen und löschen.....	116
4.2.2	Kurve auswählen und skalieren .....	116
4.2.3	Mehrere y-Skalen darstellen.....	118
4.2.4	Messen mit <i>Cursor</i> .....	118
4.2.5	Messen und Beschriften mit <i>Tags</i> .....	121
4.3	Übungen zum Auswählen, Skalieren, Messen und Beschriften.....	122
4.4	Weitere Funktionen im Menü <i>Scope</i> .....	124
<b>5</b>	<b>Ausgeben, Speichern und Drucken von Ergebnissen und Schaltplänen .....</b>	<b>127</b>
5.1	Numerische Ausgaben.....	127
5.1.1	Numerische Ausgabe als Tabelle ( <i>Numeric Output</i> ).....	127
5.1.2	Numerische Ausgabe als *.CSV-Datei zum Import in EXCEL.....	129
5.1.3	Numerische Ausgabe für die dateigesteuerte Quelle <i>User Source</i> .....	130
5.2	Kurven speichern im <i>Waveform Buffer</i> .....	131
5.3	Kurven speichern mit <i>Run Options: Save</i> .....	131
5.4	Drucken von Schaltplanseiten und Textseiten .....	132
5.5	Drucken und Exportieren von grafischen Ergebnissen .....	135
<b>6</b>	<b>Parameterwert-Variation durch <i>Stepping</i> .....</b>	<b>137</b>
6.1	<i>Stepping</i> eines einfachen Modell-Parameterwertes .....	139
6.2	<i>Stepping</i> eines .MODEL-Statement-Parameterwertes.....	144
6.3	Bauelemente-Auswahl durch <i>Stepping</i> von Modell-Namen .....	150
<b>7</b>	<b>Temperatur-Analysen mit MC .....</b>	<b>154</b>
7.1	Berechnung und Simulation für den Betrieb ohne Kühlkörper .....	155
7.2	Berechnung und Simulation für den Betrieb mit Kühlkörper .....	160
7.3	Simulation der mittleren Verlustleistung und der Sperrschichttemperatur.....	162
7.4	Temperaturverhalten von Modellen .....	165
7.4.1	Beispiel für ein thermisch rückgekoppeltes Modell (BJT).....	165
7.4.2	Beispiel für ein thermisch nicht rückgekoppeltes Modell (Diode) .....	167
7.5	Simulation des Temperaturverhaltens einer Schaltung .....	172
<b>8</b>	<b>Modell-Übersicht und Modelle für Quellen.....</b>	<b>180</b>
8.1	Übersichtstabelle über <i>alle</i> analogen Modell-Elemente in MC9.....	180
8.2	Modelle für Quellen .....	182
8.2.1	Modell-Elemente <i>Battery</i> und <i>ISource</i> als DC-Quellen.....	183
8.2.2	Modell-Typ SIN ( <i>Sine Source</i> ) als Sinus-Spannungsquelle.....	184
8.2.3	Modell-Typ PUL ( <i>Pulse Source</i> ) als Puls-Spannungsquelle.....	186
8.2.4	Modell-Elemente <i>Voltage Source</i> / <i>Current Source I</i> als Universalquellen.....	188

---

<b>9 Modelle für passive Bauelemente</b> .....	195
9.1 Modelle für die Bauelemente Widerstand, Kondensator, Spule .....	195
9.1.1 Einfaches Modell für das Bauelement Widerstand .....	196
9.1.2 Modell-Typ RES ( <i>Resistor</i> ) für das Bauelement Widerstand .....	198
9.1.3 Einfache Modelle für die Bauelemente Kondensator und Spule .....	205
9.1.4 Modell-Typ CAP ( <i>Capacitor</i> ) für das Bauelement Kondensator .....	206
9.1.5 Modell-Typ IND ( <i>Inductor</i> ) für das Bauelement Spule .....	210
9.2 Modell-Typ CORE für Spule mit ferromagnetischem Kern .....	211
9.2.1 Einführung, Berechnungen und erste Simulationen .....	212
9.2.2 Beschreibung und Anwendung des Modell-Typs CORE ( <i>K device</i> ) .....	224
9.3 Modell-Elemente für induktiv gekoppelte Wicklungen .....	231
9.3.1 Einfaches Modell <i>Transformer</i> .....	236
9.3.2 Simulation eines idealen Übertragers .....	238
9.3.3 Modell-Element <i>K device</i> für gekoppelte Wicklungen .....	243
9.4 Modell-Typ D für das Bauelement Diode .....	248
<b>10 Modelle für aktive analoge Bauelemente</b> .....	250
10.1 Modell-Typ NPN (PNP) für das Bauelement BJT .....	250
10.1.1 Simulationen zu Eingangs-, Übertragungs- und Ausgangskennlinien .....	253
10.1.2 Simulationen zu Stromverstärkung und Transitfrequenz .....	257
10.1.3 Simulationen zu Sättigungskennlinien .....	261
10.1.4 Simulationen zum Schaltverhalten .....	263
10.1.5 Simulationen für pnp-BJT .....	267
10.2 Modell-Typ OPA für das Bauelement Operationsverstärker .....	269
10.2.1 Simulation eines einfachen Operationsverstärkers mit BJTs .....	270
10.2.2 Modell-Typ OPA (LEVEL=1) .....	277
10.2.3 Modell-Typ OPA (LEVEL=2) .....	278
10.2.4 Modell-Typ OPA (LEVEL=3) .....	281
<b>11 Hersteller-Modelle in MC einbinden und verwenden</b> .....	292
11.1 Hersteller-Modell suchen und finden .....	294
11.2 Hersteller-Modell ist ein .MODEL-Statement .....	297
11.3 Hersteller-Modell ist der Modell-Typ .SUBCKT ( <i>Subcircuit</i> ) .....	299
11.4 Eine eigene Modell-Bibliothek einrichten .....	305
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	309
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	310

## Sachwortverzeichnis

### A

- AC-Analyse 44
  - Arbeitspunktberechnung bei einer 45
  - Diodenverhalten bei einer 111
  - Kleinsignal-Bedingung 45
- Amplitude 23, 61
  - , komplexe 23, 44
- Amplitudengang 24, 27, 51
  - 3-dB-Grenzfrequenz 24
  - Steigung in dB/Dekade, dB/Oktave 124
- analoge Modell-Elemente in MC9 180
- Analyse
  - AC- (komplexe Wechselstrom-) 44
  - DC- (Gleichstrom-) 38
  - Dynamic-AC- 61
  - Dynamic-DC- 36
  - Monte-Carlo- (Toleranz-) 137
  - Spektral-~ mit FFT 47, 126
  - Temperatur-~ einer Schaltung 174
  - TR- (Transienten-) 55
  - Verzerrungs- (*Distortion*) 47
- Anfangsbedingung (*initial condition*) 57, 196, 206, 264
- Anschlüsse 33
- Arbeitspunkt 37, 45, 57, 257, 274
- Attribut 74
  - -Auswahlliste 86
  - FLUX 217
  - FREQ 198
  - MODEL 49, 74, 86
  - PACKAGE 86, 293
  - PART 74, 86
  - RESISTANCE 197
- Attributfenster 74
  - Diode 86
  - Resistor 196
  - Sine Source 48
  - Voltage Source V 188
- Ausgabefenster 41
  - Menü *Scope* 114
- Auswahl-Modus 32

### B

- Bahnwiderstand 71, 251
- Bauelement 15, 31
  - -Bezeichner 15
  - -Gehäuse 160

- -Name, kommerzieller 15, 151
- -Symbol 15
- -Wert 15, 74
- Baugruppe 132, 147
- Bedienoberfläche 30
- Befehlsausdruck 75
  - .DEFINE 151, 217
  - .HELP (*Macro*) 83
  - .LIB (Bibliotheksdatei) 304
  - .MODEL ( ) 76, 297
  - .OPTIONS (GS-Parameter) 95, 248
  - .PARAMETERS ( ) (*Macro*) 83
- Bezugsknoten (*Ground*) 17, 34
- Bezugspfeil 33, 36, 182, 198
- Bibliothek 81, 89, 295
  - NOM.LIB 83, 86, 304
- BJT (*bipolar junction transistor*) 250
  - als Schalter 151, 261
  - als Verstärker 257
  - Early-Spannung 251, 255
  - Gummel-Poon-Modell 250
  - pnp- 267
  - Sättigungsverhalten 261
  - Schaltverhalten 263
  - Steilheit 255
  - Stromverstärkung 251, 254, 257
  - Übersteuerungsverhältnis 151, 261
  - Verstärker 174
- Blatt (*sheet*) 134
- Bode-Diagramm 25, 27
- Boltzmann-Konstante  $k$  168

### C

- Check Box* 3, 33
- Component Editor* 293
- Cursor* 118
  - -Positionierungen 119, 141, 171
  - *Tracker* 141

### D

- Data Points* 91, 115
- Datei
  - aufräumen (*Clean Up*) 6
  - öffnen 36, 294
  - speichern 34, 35
- Dateiname, sprechender 5, 34
- Dateityp 8, 294

- Datenblatt eines Bauelements 15, 68
- DC-Analyse 38
  - DCINPUT1 39
  - Schleifenhierarchie für Kurvenschar 255
- DC-Kennlinie 27
- Defaultwert 79
- DEFINE-Statement 151, 217
- Demo 13, 36
- Demoversion 3
- Dezibel (dB) 25, 124
  - Steigung in dB/Dekade, dB/Oktave 124
- Dezimal-Trennzeichen 2, 130
- Diagramm(s) 39, 116
  - Ausschnitt eines 117
- Dialogfenster
  - *AC Analysis Limits* 50
  - *Analysis Text* 120
  - *Animate Options* 125
  - *Calculator* 53
  - *Clean Up* 6
  - *Component Editor* 300
  - *Component Panel* 30, 300
  - *DC Analysis Limits* 38, 90, 171
  - *Default Properties For New Circuits* 7
  - *Dynamic AC Limits* 61
  - *Dynamic DC Limits* 36, 169
  - *Global Settings* 37, 94, 170
  - *Grid Text* 38, 89
  - *Label Curves Branches* 141
  - *Localize* 89
  - *New* 8
  - *Open* 295
  - *Path* 6
  - *Preferences* 6, 37, 95
  - *Print Preview* 134
  - *Properties* 7
  - *Properties for AC Analysis* 124
  - *Properties for DC Analysis* 128
  - *Properties for Transient Analysis* 115, 122, 125
  - *Save As* 34
  - *Stepping* 139
  - *Transient Analysis Limits* 56
  - *Translate to SPICE* 299
  - *Waveform Buffer* 131
- Differenzialgleichung 25
- differenzielle Größe 112
- Dimensionieren 15, 137, 143
  - Glättungskondensator 104
  - Kühlkörper 162
  - Stromquellenschaltung mit BJT 174
- Diode 68
  - , ideale 69
  - Attributfenster *Diode* 86
  - Aufbau 71
  - Diffusions-, Sperrschichtkapazität 96
  - Durchbruch 93, 101
  - Klemm- 152, 283
  - Modelle 77
  - pn-Übergang 69, 151
  - Schaltverhalten 96
  - Schleusenspannung einer Silizium- 69, 88, 145
  - Shockley-Gleichung 69, 72, 79
  - Sperrspannung 93
  - Sperrstrom 70, 93
  - Sperrverzugszeit, Rückwärtserholzeit 97, 153
- Downloads zum Buch und www-Adresse 3
- Drucken 132
- Druckvorschau 134
- Durchflutung 212
- Dynamic-AC-Analyse 44, 61
- Dynamic-DC-Analyse 36, 37
  
- E**
- E-6-Reihe 144
- Effektivwert 24
- Eigenerwärmung 70, 155, 165, 254
- Eigeninduktivität 195, 202, 204
- Eigenkapazität 195, 202, 204
- Eingabe-Modus 31
- Einheit 32, 160
- Einschwingvorgang 56, 58
  - , thermischer 159
- Elementarladung  $q$  168
- Ersatzschaltung 20, 22, 71
  - , linearisierte 44
  - , thermische 157, 160
  - eigene  $\sim$  in *Subcircuit* wandeln 299
  - elektrische und thermische  $\sim$  kombiniert 163
- Exponentialfunktion als Sprungantwort 26, 159
- Exponentialschreibweise 24
- Exportieren
  - von grafischen Ergebnissen 135
  - von numerischen Ergebnissen 127
- Extraktion von Parameterwerten 71, 102, 197

**F**

- FAQ (frequently asked questions) 14
- Fehlermeldung
  - Already have a ... value 32
  - Duplicate Statement '...' 218
  - Inductor/voltage source loop found 35, 183, 238
  - Missing Model Statement '...' 90, 305
  - Must specify model name and type 90
  - Nodes ... have no DC path to ground 59
  - The AC signal magnitudes of ... 48, 204
  - The circuit is missing a ground 35
- Fenster 10
- Ferrit-Material 226
- ferromagnetischer Kern 211
- FFT Fast Fourier Transform (spektrale Analyse) 47, 126
- Fluss, Verkettungsfluss 214
- Flussdichte 212
  - Remanenz 227
  - Sättigungs- 213, 219
- Fremderwärmung 70, 155
- Frequenz 24
  - 3-dB-Grenz- 24, 257
  - Kreis- 24
  - Transit- 257, 275
- Frequenzgang
  - , komplexer 24, 47, 258
- Frequenzweiche für Lautsprecherbox 67
- Funktionen in MC
  - ABS() 93, 203
  - AVG() 147, 163
  - DB() 50, 53, 62, 202
  - IF() 111
  - IM() 202
  - LOG() 53, 203
  - MAG() 53, 202
  - PH() 51, 53, 202
  - RE() 202
  - SIN(), COS(), ATAN() 203
  - TABLE() 201
  - Z() 202
- G**
- Gitternetz 40, 58
- Gitterpunkte 43, 133
- Gleichrichterschaltung
  - Einweg- 104
  - Zweiweg-, Brücken- 108
- Gleichspannungsquelle 34
- Grenzfrequenz, 3-dB- 24, 257

Ground 17, 34

GS-Parameter (Global Settings)

- C<sub>SHUNT</sub> 95
- Einschub 94
- G<sub>MIN</sub> 94
- R<sub>MIN</sub> 95, 183, 285
- R<sub>NODE\_GND</sub> 37, 63, 94, 184
- R<sub>P\_FOR\_ISOURCE</sub> 95
- R<sub>SHUNT</sub> 95
- T<sub>NOM</sub> 95, 169, 200

**H**

- Hersteller
  - -Datenblatt 71
  - -Modell 73, 82, 253, 282, 294
- Hilfe 40
- Hochpass 66
- Hotkey 10
- Hystereseschleife 227

**I**

- Imaginärteil 24, 61
- induktive Spannung 214
- Induktivität 23, 214
  - , differenzielle 214, 216, 219, 225
  - , lineare 215
  - , nichtlineare 216
  - Haupt-, Streu- 240
  - Selbst-, Gegen- 233
- Installation von MICRO-CAP 4
- Integrationsverfahren 55, 95, 248

**K**

- Kapazität 23
  - , differenzielle 206
  - Miller- 266, 275
- Kleinsignal-Bedingung 45
  - Beispiel Diode 111
  - Einschub 45
  - prüfen 46, 113, 150
- Knoten 17, 34
  - -anzahl 34
  - -name 38, 43
  - -nummer 34
  - -potenzial anzeigen 36
- Knotenpotenzialverfahren 17, 35
- Komparator 273
- komplexe Wechselstromrechnung 23, 44, 113, 198

- Kondensator 20, 23, 33, 195
  - , idealer 25
  - Frequenzverhalten eines 208
  - Glättungs 209
  - Glättungs- 104, 149
  - Glättungs- 247
  - Keramik-, spannungsabhängiger 207
  - Spannungsstetigkeitsbedingung 25
- Konvergenz 248
  - -Checkliste 43
  - -problem 42, 69, 95
- Kopplungsfaktor(s) 232
  - messtechnische Bestimmung des 235
- Kreisfrequenz 24
- Kühlkörper 155, 160
  - dimensionieren 162
- Kurve 39
  - , ausgewählte 116
  - , eckige 53
  - , glatte 57
  - beschriften 121
  - Farbe 39
  - gruppieren 39
  - Name der 116
  - Skalierung 39
  - speichern 131
  - *X Expression, Y Expression* 39
  - *X Range, Y Range* 40
- Kurvenschar 138, 171, 255
- Kurzschluss 24
  
- L**
- LED 80, 102
- Leerlauf 24
- Leitung 15
- Leitwert, differentieller 112
- Linearisierung 46, 198
- Literatur 23, 78, 180
- Logarithmus 53
- Lösungen
  - von Berechnungsaufgaben 23
  - von Simulationsübungen 1, 13
  
- M**
- Macro* 8, 83, 295
  - POT.MAC (Potenziometer) 132
  - SCR.MAC (Thyristor) 295
- magnetische Feldkonstante  $\mu_0$  212
- Magnetisierung, Sättigungs- 213
- Maß, logarithmisches 25, 51
- Masse (*Ground*) 35
- Materialkennlinie  $B_{Fe} = f(H_{Fe})$  221, 227
- Maus, -taste, -zeiger 9
- MC-BUCH.ZIP 3, 4
- MC-BUCH\_ERGAENZUNGEN.PDF 3
- MC-DEMO\_9061.ZIP 3
- MC-Musterschaltung 13
- MC-Programm MODEL 9, 74, 86
- Menü-Bedienung, -Konventionen, -folge 12
- Messschaltung
  - für Abgleich eines 10:1-Teilertastkopfs 65
  - für Durchbruch bei Dioden 94
  - für Kopplungsfaktor 235
  - Simulation einer 84
- Messtemperatur 84
- Messwerte 68
- MICRO-CAP (MC) 19
- Model Editor* 9, 82
- Model Under Test* (MUT) 180, 228, 249, 304
- Modell 16, 20, 68
  - , thermisch rückgekoppeltes 165
  - AKO- 173, 271
  - -Bezeichner 17, 31, 75
  - eines Bauelement-Herstellers 292, 295
  - -Element 16, 31
  - -Name 16, 49, 75, 299
    - \$GENERIC... 82
  - -Name, sprechender 49
  - -Symbol 16, 31, 75, 293
  - -Typ 16, 75
  - -Typ-Level 75, 79
- Modellbeschreibung 16
  - BSDL 292
  - IBIS 292
  - MATLAB/SIMULINK 292
  - SABER 292
  - SPICE 16, 294
- Modell-Element
  - analoge ~e in MC9, Übersicht 180
  - *Animated Analog LED* 103
  - *Animated Meter* 176
  - *Animated SPST Switch* 110
  - *Battery* (ideale Gleichspannungsquelle) 34, 86, 183
  - *Bipolar Transistor (BJT)* 250, 298
  - *Capacitor* 33, 205
  - *Current Source I* 159, 188, 217, 258
  - *Dependent Sources VofV, IofI* 239, 261
  - *Diode* 77, 86, 167, 248
  - *Ground* 34
  - *Independent sources* 188
  - *Inductor* 206

- *I*Source (ideale Gleichstromquelle) 94, 184
  - *K* device als Modell für ferromagnetisches Material (*CORE*) 224
  - *K* device als Modell für induktiv gekoppelte Wicklungen (*Mutual inductance*) 243
  - *NFI* (*numeric function current source*) 164
  - *Opamp* (*operational amplifier*) 269
  - *Pulse Source* 59, 186
  - *Resistor* 31, 111, 196
  - *Sine Source* 48, 62, 76, 184
  - *Subcircuit* 82, 299
  - *Switch* 97
  - *Tie* (Verbinder) 43, 176
  - *Transformer* 236
  - *User Source* 130
  - *Voltage Source V* 188, 194
  - *Voltage Source V (Define)* 194
  - *Voltage Source V (None)* 193
  - *Voltage Source V (Pulse)* 189
  - *Voltage Source V (PWL)* 192
  - *Voltage Source V (Sin)* 191, 258
  - Modell-Element parken 59
  - Modelltiefe 16, 68, 157, 269
  - MODEL-Statement 76, 297
  - Monte-Carlo-Analyse 137, 200
  - Mustersimulation 13, 180, 228, 249, 256, 268
- N**
- Netzliste 17, 35
  - Netztransformator 104
  - Neukurve 227
  - Newsletters* 14, 100, 103
  - Normieren 125
  - Nulllinie 115
  - Nullphasenwinkel 23, 61
  - Number of Points* 39, 51, 127
  - Numeric Output* 39, 127
- O**
- Objekt
    - ausschneiden 33
    - auswählen/markieren 116
    - drehen 33
    - einfügen 33
    - kopieren 33
    - markieren/auswählen 32
    - nur entfernen 33
  - OP (Operationsverstärker) 269
    - , idealer 278
    - Ausgangswiderstand, komplexer 289
    - Biasstrom, Offsetstrom 274, 287
    - Eingangs-Differenzverstärker 270, 282
    - Einsverstärker 276
    - Frequenzgang-Korrektur 275
    - -Modell
      - als *Subcircuit* 290, 303
      - auf Transistorebene 290
      - Boyle-Modell 282, 289
    - Offsetspannung, -skompensation 273, 303
    - Schaltung eines
      - , prinzipielle 270
      - , reale 290
    - *Slew Rate* 276, 280, 289
    - Spannungsverstärkung 273, 286
    - Transitfrequenz ( $G_{BW}$ ) 275
    - Versorgungsspannung 7, 269, 271, 283, 285
    - Operating Point* 37, 45, 57, 257, 274
    - OPTIONS-Statement 95, 248
    - Ordner
      - aufräumen (*Clean Up*) 6
      - DATA, DOCUMENTS, LIBRARY 4
      - MC-CIRS, MC-DOCS, MC-LIBS 5
    - Ordnerstruktur 4
    - Oszilloskop 20, 56
      - AC-Kopplung beim 66
- P**
- Parameter 16, 49, 75, 285
    - , sprechender 77, 146, 270
  - Parameterwert 16, 49, 75
    - -Extraktion 71, 102, 197
    - -Verifikation 73, 84
  - Parameterwertesatz 16, 75
  - Parasitärer Effekt
    - Bahnwiderstand 71
    - Eigeninduktivität, Eigenkapazität 195
    - Kapazität einer Leitung 20
  - Periodendauer 24
  - Pfad, Pfadsammlung 5
  - Phasenanschnitt-Steuerung 295
  - Phasengang 24, 27, 51
  - Pin-Namen 33
  - Preferences* 6
  - PSPICE 19
  - $P_{SRR}$  (*power supply rejection ratio*) 148
  - Pt100-Temperatur-Messwiderstand 200
- Q**
- Quelle(n) 42, 182
    - ideale Gleichspannungs- (*Battery*) 183
    - ideale Gleichstrom- (*I*Source) 184
    - ideale Puls-Spannungs- (*Pulse Source*) 186

- ideale Universal-Strom/Spannungs- 188
- Sinus-Spannungs- (*Sine Source*) 184
- QuickInfo* 3, 11
- R**
- Rauschen 79, 200
- Realteil 24, 61
- Reference Manual* (RM.PDF) 3
- Registerkarte 12
- Rückkopplung, thermische 165
- S**
- Schalter
  - mit Modell-Element *Animated SPST Switch* 110
  - mit Modell-Element *Resistor* 111
  - mit Modell-Element *Switch* 97
- Schaltfläche 3, 11
- Schaltplan(s) 22, 31
  - Eingabe eines 30
  - Sieben Tipps zum Gestalten eines 43, 133
- Schaltplandatei 5, 8
  - speichern 35
- Schaltplanseite 89
  - aktivieren/deaktivieren 132
  - Rahmen und Titelblock einer 133
- Schaltung 15
- Schaltverhalten
  - BJT (*bipolar junction transistor*) 263
  - Diode 96
  - Komparator 273
  - OP (Operationsverstärker) 273
- Schematic Editor* 30
- Schleusenspannung einer Silizium-Diode 69, 88, 145
- Schreibweisen 2
- Schrittweite
  - , logarithmische 140, 143
  - Frequenz-, Berechnung der 51, 53
  - Zeit-, maximale 57, 164
- Scope* (Werkzeuge zum Auswerten) 114
- Seite (*page*) 133
- Select Mode* 32, 33, 116
- Shortcut* 10
- Shunt* 203, 285
- Silizium 80, 251, 252
- Simulation elektronischer Schaltungen 15
- Simulationslauf 125, 138
- Sinus
  - -analyse 44
  - -spannung 23
  - -Spannungsquelle 48
  - -strom 23
- Skalen 32
  - mehrere y-Skalen 118
- Skalierung 40
- Spannungs-Inverter 109
- Spannungsverdoppler-Schaltung (Villard) 108
- Spannungsversorgung, bipolare (*dual supply*) 108, 271, 283, 285
- SPICE 17
- Sprungantwort 26, 29, 158
- Spule 21, 23, 195
  - , ideale 25, 214
  - , nichtlineare 212
  - , nichtlineare und hysteresebehaftete 226
  - Kern mit Luftspalt 220, 230
  - Ringkern 212
  - Stromstetigkeitsbedingung 25
  - Wicklung 212
  - Wicklungskapazität einer 210
- Statusleiste 12
- Stepping* 138
  - der globalen Temperaturvariablen  $T_{EMP}$  171, 172
  - Schrittweitenberechnung 140
- Subcircuit(s)* 82, 292, 294
  - als Modell-Element 300
  - mit MC erstellen 299
  - Modell-Bezeichner eines 302
  - Modell-Symbol eines 300
  - -Name 299
- Support per E-Mail 14
- T**
- Tabellenkalkulationsprogramm 129
- Tag* (Etikett) 121
- Taschenrechner (*Calculator*) 53
- Tastatur, Taste, Tastenkombination 10
- Tastkopf 20, 143
  - , abgeglichener 64
- Temperatur
  - , absolute oder thermodynamische 158
  - , globale ~variable  $T_{EMP}$  78, 167, 200
  - Bezugs- 157
  - Celsius- 157, 160
  - Innen- 78, 154
  - -koeffizient 169, 176, 200
  - Mess- 81, 84, 167, 200
  - -spannung 70
  - Sperrschicht- 70, 78, 154
  - $T_x$ -Größen 172, 200

- Umgebungs- 70, 155
- -verhalten einer Schaltung 174
- Text connects* 43
- Text Editor* 9
- Text Mode* 38
- Textfeld 38, 298
- aktivieren/deaktivieren (*enabled/disabled*) 218
- Verankerungspunkt 38
- Zeilenumbruch 38
- Textseite 89, 298
- Kopf- und Fußblock einer 135
- thermische Rückkopplung 165
- Thyristor 83, 295
- Tiefpass 25
- Token* (Grafikelement) 91, 115
- Toleranz 137
- TR-Analyse 55
- Transformator 231
- Transistor 250
- Transitfrequenz 257
- Trennzeichen 32, 128
- Typografie 1, 32, 49, 52, 72, 75
- Schriftart *Courier New* 49, 89
  
- U**
- Übersetzungsverhältnis 234
- Übertrager 231
- , idealer 238
- Ersatzschaltung mit idealem 240
- Übertragungsverhalten 24
- Übungen 1, 13, 23
- User's Guide* (UG.PDF) 3
  
- V**
- Variable
- , \$-Variable 4, 128, 133
- , globale Temperatur- ( $T_{EMP}$ ) 78, 167, 200
- , symbolische 151
- Ausgabe- 40, 163, 182, 229, 252
- VDR (Varistor) 197
- Verbindungs-Modus 34
- Verbindungsplan 17, 22
- Verdrahtungsplan 15, 20, 22
- Verifikation von Parameterwerten 73, 84
- Verlustleistung 155
- , zeitabhängige 162
  
- Verzerrungs-Analyse 47
- Voreinstellungen
- , bevorzugte (*Preferences*) 6
- Pfade 5
- Vorsätze  $\mu$ , m, k usw. 32
  
- W**
- Wärme
- Eigenerwärmung 70, 155, 165, 254
- Fremderwärmung 70, 155
- -kapazität 156, 159
- -leistung 156
- thermische Trägheit 156
- -widerstand 156
- Wicklungen
- , induktiv gekoppelte 231, 234
- , linear gekoppelte ~ mit *K device* 243
- , nichtlinear gekoppelte ~ mit *K device* 245
- Widerstand 20
- , differenzieller 101, 112, 147, 198
- , komplexer 23
- , nichtlinearer (VDR) 197
- , temperaturabhängiger (Pt100) 200
- Attributfenster *Resistor* 196
- bei Hochfrequenz 201, 203
- Modelle 196
- *Shunt*- 203, 285
- Worst Case* 142, 177
  
- Z**
- Zahl 32
- , komplexe, komplexwertige 24, 61, 64
- Format *Engineering* 7, 149
- Vorsätze  $\mu$ , m, k usw. 32
- Zählpfeil 33
- Z-Diode 100, 147, 177
- Zener-Effekt, Avalanche-Effekt 101, 177
- Z-Spannung 101
- Zeitkonstante 26
- , thermische 157
- Zustand
- , eingeschwungener 44
- , gesättigter (BJT) 153
- Zustandsgröße (*state variable*) 57, 196
- Zweipol, Grund- 21, 74
- Zwischenspeicher 33
- , grafischer 136