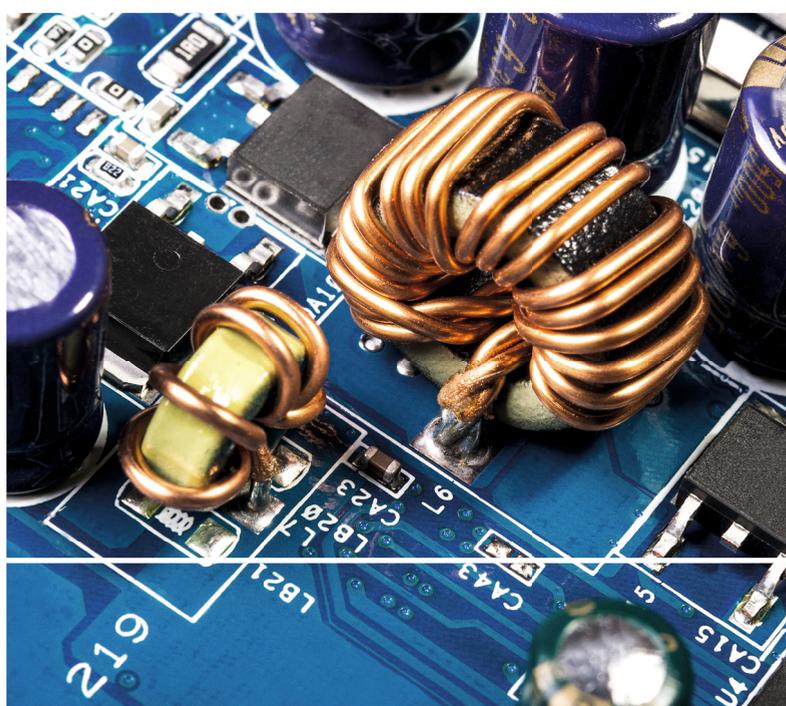


Rainer Ose



Elektrotechnik für Ingenieur:innen

Bauelemente und Grundschaltungen
mit MicroCap und LTspice



2., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Ose
Elektrotechnik für Ingenieur:innen



Ihr Plus - digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-i47rb-f3c8d

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Rainer Ose

Elektrotechnik für Ingenieur:innen

Bauelemente und Grundsaltungen mit MicroCap
und LTspice

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Über den Autor:

Prof. Dr.-Ing. Rainer Ose, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel,
Fakultät Elektrotechnik



Print-ISBN: 978-3-446-47706-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-47926-5

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text- und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2024 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Der Buchmacher, Arthur Lenner, Windach

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © shutterstock.com/KPixMining

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck: Elanders Waiblingen GmbH, Waiblingen

Printed in Germany

Vorwort

Die zweite Auflage des vorliegenden Lehrbuches entstand durch eine vollständige Überarbeitung der ersten Auflage „Bauelemente ...“. In der ersten Auflage wurde für die Simulation der elektrischen Eigenschaften von Bauelementen PSpice eingesetzt. Da PSpice seit 2019 nicht mehr zur Verfügung steht, wurden die Beispiele und Übungen auf MicroCap und LTspice umgestellt.

Im Vordergrund steht die Beschreibung des elektrischen Verhaltens von Bauelementen. Ausgehend von den Grundlagen der Elektrotechnik werden typische Eigenschaften elektronischer Bauelemente behandelt und am Beispiel des Einsatzes in einfachen Grundschaltungen erklärt. Die zur Simulation verwendeten Tools sind dabei lediglich Mittel zum Zweck.

Die Lösungen aller Lehr- und Simulationsbeispiele können mit den DemoverSIONen von MicroCap und LTspice nachvollzogen werden. Alle zur Simulation dieser Beispiele erforderlichen Projekte befinden sich in einem verlinkten Ordner im Internet unter plus.hanser-fachbuch.de sowie unter https://www.ostfalia.de/cms/de/pws/ose/BE_Microcap. Der Ordner umfasst über 170 Projekte für Simulationen mit MicroCap und ca. 50 Projekte für Simulationen mit LTspice. Die theoretischen Grundlagen dazu werden im Lehrbuch vermittelt und als Simulationsanleitung bereitgestellt.

Der Autor bedankt sich beim Carl Hanser Verlag für die hervorragende Zusammenarbeit sowie bei Herrn Prof. Dr. Vester [15], bei Herrn Prof. Dr. Viehmann [10] und bei Herrn Dipl.-Ing. Rohrman für die Hinweise zur Optimierung des Manuskriptes.

Wolfenbüttel, im August 2024

Rainer Ose

E-Mail: r.ose@ostfalia.de

Hinweise zur Arbeit mit diesem Lehrbuch

Ausgangspunkt sind die Schwerpunkte der Grundlagen der Elektrotechnik [6] und [7]. Diese Themen dienen zur Einarbeitung in die Simulationssoftware MicroCap. Es werden typische Anwendungsfälle aus der Gleichstromlehre, der Wechselstromtechnik und zu den Schaltvorgängen betrachtet. Mit der Kenntnis einer anderen Simulationstechnik (z. B. LTspice) sind diese Aufgaben selbstverständlich auch lösbar. Die eingesetzte Software dient lediglich der Auswertung und der Visualisierung der für ein Bauelement abgeleiteten Eigenschaften.

Zur Beschreibung des elektrischen Verhaltens passiver und aktiver Bauelemente dienen Kennlinien, Kenngrößen und Ersatzschaltbilder, die mit den Simulationsprogrammen MicroCap und LTspice anschaulich dargestellt werden. Die dazu verwendeten Grundsaltungen sollen das Verständnis für die Funktion des jeweiligen Bauelementes fördern. Auf schaltungstechnisch elegante Speziallösungen wurde demzufolge bewusst verzichtet.

Durch die Bereitstellung einer Vielzahl von Lehr- und Simulationsbeispielen werden die interessierten Leser:innen befähigt, praxisbezogene Bauelemente-Anwendungen und einfache Grundsaltungen zu konzipieren und ihre Funktionsfähigkeit nachzuweisen. Die dazu eingesetzten Simulationsprogramme sollen den Studierenden das Nachvollziehen des in der Vorlesung vermittelten Lehrstoffs ermöglichen und zugleich den Studienprozess in angrenzenden Lehrgebieten fördern. Nach einem intensiven Studium der Inhalte dieses Lehrbuches werden die Studierenden in die Lage versetzt (Lernziele):

- das elektrische Verhalten elektronischer Bauelemente zu verstehen und zu erklären,
- die elektrischen Eigenschaften von Bauelementen zu beschreiben und zu simulieren,
- die mit MicroCap und LTspice simulierten Ergebnisse zu interpretieren und kritisch zu bewerten,
- Verständnis für das elektrische Verhalten von Grundsaltungen zu entwickeln,
- elektronische Bauelemente zielgerichtet in der schaltungstechnischen Praxis einzusetzen.

Zur Erreichung dieser Ziele sind vielfältige Übungen erforderlich. Dazu werden Lehrbeispiele (LB) eingesetzt, die in der Regel die grundlegenden Eigenschaften eines Bauelementes mit einer Kennlinie beschreiben. Aus der simulierten Kennlinie werden dann typische Kenngrößen abgeleitet, die z. B. für die Dimensionierung einer schaltungstechnischen Realisierung verwendbar sind. Solche Beispiele werden auch im laufenden Text eingesetzt (K_{x,y}), um spezielle Sachverhalte bes-

ser erklären zu können. Sie werden insbesondere in den Kapiteln 1 und 2 (zur Einarbeitung) zusätzlich verwendet.

Das elektrische Verhalten eines Bauelementes kann beim Einsatz in einer Grundschaltung dargestellt werden. Dazu dienen die Simulationsbeispiele (SB) am Ende jedes Kapitels. Alle Beispiele werden im Buch mit MicroCap bearbeitet und stehen im Internet als lauffähige Projekte zur Verfügung. Eine Auswahl dieser Beispiele (ca. 25%) ist zusätzlich als LTspice-Projekt im Internet verfügbar. Dabei handelt es sich um Beispiele aus dem Buch mit der gleichen Aufgabenstellung. An den entsprechenden Stellen des Buches wird das LTspice-Logo mit dem Hinweis auf den Dateinamen eingefügt. Eine Anleitung zur Nutzung dieser Projekte findet man für jedes Beispiel in einer separaten Datei online.



LTspice: LB_1.x

Die Simulationen mit beiden Techniken weisen auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse hin. Spätestens an dieser Stelle erkennt man, dass die zur Simulation verwendeten Tools lediglich Mittel zum Zweck sind. Auf eine wechselseitige Anwendung der beiden Simulationstechniken wurde im Buch bewusst verzichtet. Diese Kombination würde nur Verwirrung stiften.

Das Ergebnis einer Simulation ist wichtig. Es muss fachlich richtig sein und soll zum Verständnis für das elektrische Verhalten der vorgestellten Bauelemente und Grundschaltungen beitragen. Aus den Ergebnissen einer (richtig bewerteten) Simulation kann man dann die erforderlichen Daten für die Dimensionierung weiterführender Beispiele und Anwendungen ableiten. Dabei sollten immer folgende Grundüberlegungen im Vordergrund stehen:

1. Simulationsprogramme arbeiten auf der Grundlage von Modellen. Ein Modell ist aber immer nur ein bedingtes Abbild des Originals. Es ist demzufolge erforderlich, die Ergebnisse einer Simulation richtig zu interpretieren und sehr kritisch zu bewerten.
2. Jedes Simulationsprogramm besitzt Vorteile und auch Nachteile. Nur die Anwender:innen können entscheiden, welches Tool für die Lösung einer aktuellen Aufgabenstellung besser geeignet ist.

In diesem Lehrbuch wird folgende Notation verwendet:

> steil <	Tasten und Schaltflächen
< steil >	Rollmenüs
/ steil /	Registerkarten
,steil‘	Eingaben
<i>kursiv</i>	Analysen/Menüs/Dialoge
<i>kursiv</i> → <i>kursiv</i>	Menüverzweigungen
<i>kursiv</i> -Fenster	Fenster-Bezeichnungen
<i>kursiv</i> -Liste	Listen-Bezeichnungen
<i>Analog Primitives</i>	Komponenten-Liste: Hauptgruppe
{ <i>Waveform Sources</i> }	Komponenten-Liste: Gruppe (Untergruppe)
[<i>Voltage Source</i>]	Komponenten-Liste: Komponente

Eine einheitliche Umsetzung dieser Notation ist nicht immer möglich, da in Simulationsprogrammen die vorgegebenen Begriffe leider häufig auch für andere Bezeichnungen verwendet werden.

Der Autor wünscht bei der Bearbeitung dieses Lehrbuches viel Erfolg.

Inhalt

Vorwort	V
1 Grundlagen der Elektrotechnik mit MicroCap	1
1.1 Einführung in MC 12	1
1.1.1 Arbeitsoberfläche	1
1.1.2 Zeichnen eines Stromkreises	3
1.1.3 Anpassung der Schaltungsdarstellung	5
1.2 Analyse von Gleichstromkreisen	7
1.2.1 Arbeitspunktanalyse	7
1.2.2 DC-Analyse	11
1.2.3 Änderung der x -Achsen-Variablen	16
1.2.4 DC-Analyse mit Parametervariation	17
1.3 Analyse von Wechselstromkreisen	22
1.3.1 Transienten-Analyse	22
1.3.2 Dynamic-AC-Analyse	28
1.3.3 Fourier-Analyse (FFT)	29
1.3.4 AC-Analyse (AC-Sweep)	33
1.3.5 AC-Analyse (Stepping)	40
1.4 Analyse von Schaltvorgängen	45
1.4.1 Schalten von RC-Kombinationen	45
1.4.2 Umschalten vorgeladener Kondensatoren	48
1.4.3 Simulation von Ausgleichsvorgängen	50
1.4.4 Schalten von RL-Kombinationen	55
1.4.5 Schalten von Schwingkreisen	58
1.4.6 Schalten einer Wechselquelle	61

1.5	Simulationsbeispiele.	66
1.6	Zusammenfassung zur Einführung in MicroCap.	95
2	Passive Bauelemente	96
2.1	Klassifikationskriterien	96
2.2	Grundbauelemente	101
2.2.1	Widerstände	101
2.2.2	Kondensatoren	110
2.2.3	Spulen	116
2.3	Homogene Halbleiter	129
2.3.1	Halbleiter-Übersicht	130
2.3.2	Thermistoren.	135
2.3.3	Varistor	139
2.3.4	Fotowiderstand	142
2.3.5	Magnetfeldabhängige Halbleiter.	145
2.4	Simulationsbeispiele.	149
3	Halbleiter-Dioden	174
3.1	pn-Übergang	174
3.2	Universaldiode.	178
3.3	Simulation von Halbleiter-Dioden	182
3.4	Gleichrichterioden	191
3.4.1	Einweggleichrichtung.	192
3.4.2	Zweiweggleichrichtung (Mittelpunktschaltung).	194
3.4.3	Brückengleichrichtung.	197
3.5	Schaltdioden	199
3.5.1	Eigenschaften von Schaltdioden	199
3.5.2	Logikgatter.	202
3.6	Z-Diode	207
3.6.1	Eigenschaften einer Z-Diode	207
3.6.2	Spannungsstabilisierung.	210
3.7	Varaktor-Dioden	213
3.7.1	Kapazitätsdiode.	213
3.7.2	Step-Recovery-Diode.	216

3.7.3	pin-Diode als Spezialfall.....	216
3.8	Schottky-Diode.....	217
3.9	Simulationsbeispiele.....	219
4	Unipolare Transistoren.....	241
4.1	Aktive Bauelemente.....	241
4.2	Feldeffekttransistoren.....	242
4.2.1	Sperrschicht-FET.....	244
4.2.2	MOS-FETs.....	248
4.2.3	Leistungs-MOS-FETs.....	250
4.3	Kenngrößen und Modelle von FETs.....	253
4.3.1	Modelle von Sperrschicht-FETs.....	254
4.3.2	Modelle von MOS-FETs.....	258
4.3.3	Ersatzschaltungen für FETs.....	258
4.4	Anwendungen von Feldeffekttransistoren.....	264
4.4.1	Kleinsignalverstärker.....	264
4.4.2	Schaltverstärker/Negator.....	270
4.5	Simulationsbeispiele.....	272
5	Bipolare Transistoren.....	286
5.1	Aufbau und Wirkungsweise.....	286
5.2	Kennlinien und Kenngrößen.....	288
5.2.1	Kennlinienfelder.....	289
5.2.2	Statische Kenngrößen.....	290
5.2.3	Dynamische Kenngrößen.....	293
5.3	Arbeitspunkt eines bipolaren Transistors.....	301
5.3.1	Arbeitspunkteinstellung.....	301
5.3.2	Arbeitspunktstabilisierung.....	302
5.4	Modelle von bipolaren Transistoren.....	307
5.5	Frequenzabhängigkeiten.....	311
5.6	Elementare Anwendungen.....	318
5.6.1	Kleinsignalverstärker.....	318
5.6.2	Basis- und Kollektorschaltung.....	321

5.6.3	Differenzverstärker	323
5.6.4	Transistor als Schalter	325
5.7	Simulationsbeispiele.	331
6	Thyristoren	348
6.1	Ausführungsformen	348
6.1.1	Aufbau und Wirkungsweise	348
6.1.2	Diac und Triac	350
6.1.3	Rückwärtssperrender Thyristor (SCR)	351
6.2	Simulation von Thyristoren	354
6.3	Thyristor als Schalter	357
6.3.1	Gleichstromschalter	358
6.3.2	Wechselstromschalter	359
6.4	Simulationsbeispiele.	362
7	Optoelektronische Halbleiterbauelemente	371
7.1	Einteilung optoelektronischer Bauelemente	371
7.2	Strahlungskenngrößen	372
7.2.1	Radiometrische Größen	372
7.2.2	Fotometrische Größen	373
7.3	Fotodetektoren.	374
7.3.1	Fotowiderstand und Fotodiode.	376
7.3.2	Fotoelement und Solarzelle	379
7.3.3	Fototransistor	381
7.3.4	Fotothyristor	383
7.4	Fotoaktoren	385
7.4.1	Lumineszenzdiode	385
7.4.2	Optokoppler	389
7.5	Simulationsbeispiele.	392
8	Operationsverstärker	400
8.1	Grundprinzip eines Operationsverstärkers	400
8.2	Kenngrößen des Operationsverstärkers	402

8.3	Reales Verhalten eines Operationsverstärkers.....	415
8.3.1	Kompensationsmaßnahmen	415
8.3.2	Frequenzgangkorrektur.....	417
8.4	Grundsaltungen mit OV	418
8.4.1	Invertierender Verstärker	418
8.4.2	Nichtinvertierender Verstärker.....	420
8.5	Analoge Rechenschaltungen	423
8.5.1	Summenverstärker	423
8.5.2	Differenzverstärker.....	426
8.5.3	Differenzierer	427
8.5.4	Integrierer	429
8.6	Komparatoren	431
8.7	Konstantstromquellen	435
8.8	Spitzenwertgleichrichter	436
8.9	Aktive RC-Filter.....	439
8.9.1	Tief- und Hochpässe	440
8.9.2	Bandpassschaltungen.....	452
8.10	Simulationsbeispiele.....	463
9	Anhang	489
9.1	Waveform Sources (Voltage Source/Current Source)	489
9.2	Switch (Switch/V-Switch/I-Switch)	495
9.3	Passive Bauelemente (linear).....	499
10	Formelzeichenverzeichnis	503
11	Literaturverzeichnis	509
Index	510

1

Grundlagen der Elektrotechnik mit MicroCap

In diesem Kapitel stehen die passiven Zweipole R , L und C im Vordergrund. Ihr elektrisches Verhalten soll mit elementaren Grundsaltungen (bekannt aus den Grundlagen der Elektrotechnik, z.B. [6]) analysiert werden. Dazu dienen die Arbeitspunktanalyse (*Bias Point*), die Gleichstromanalyse (*DC*), die Wechselstromanalyse (*AC*) und die Analyse *Transient*. Zur Variation ausgewählter Parameter werden die aus PSpice oder LTspice bekannten Sweeps (DC- und AC-Sweep) als Main- und als Nested-Sweep eingesetzt.

■ 1.1 Einführung in MC 12



Nach der Installation von MicroCap 12 (MC) ist das Icon auf dem Desktop verfügbar. Mit einem Doppelklick wird die Arbeitsoberfläche geöffnet. Wenn die Schaltplanfläche noch grau unterlegt ist, muss mit *File* → *New* eine neue Datei geöffnet werden. Es meldet sich das *New*-Fenster mit einer Auswahl von Dateitypen. Wir wählen Schematic-File (*.cir für circuit). Damit wird mit dem Abspeichern eine Datei „Name.cir“ erstellt. Dieser Name steht dann mit dem Dateipfad über der Arbeitsoberfläche in der Titelleiste (*title bar*). (siehe auch: Vester [15])

1.1.1 Arbeitsoberfläche

Im oberen Bereich der Arbeitsoberfläche befinden sich mehrere Kopfzeilen, die in der Grundeinstellung der gekürzten Anordnung in Bild 1.1 entsprechen.



Bild 1.1 Kopfzeilen der Arbeitsoberfläche (Auszug)

In der ersten Zeile sind die verfügbaren Menüs in Textform (*menu bar*) aufgelistet. Es folgen in der zweiten Zeile die grafischen Symbole der zu ① gehörende Untermenüs (hier nur eine Auswahl) und eventuell noch (je nach Einstellung der Arbeitsoberfläche) die Elemente der Editor-Menü-Leiste. Die dritte Zeile zeigt den Rest der Editorleiste in Kombination mit der Komponenten-Spalte. Sie wird links unter ③ als Liste dargestellt.

Diese Komponenten-Liste (unter: Browse – Search – Favorites) ermöglicht den Zugriff auf alle verfügbaren Bauelemente der MicroCap-Evaluationssoftware. Die Einteilung wird in Hauptgruppen, in Untergruppen und in Komponenten vorgenommen.

Für die weitere Kennzeichnung verwenden wir folgende Schreibweise (z. B. U_q):

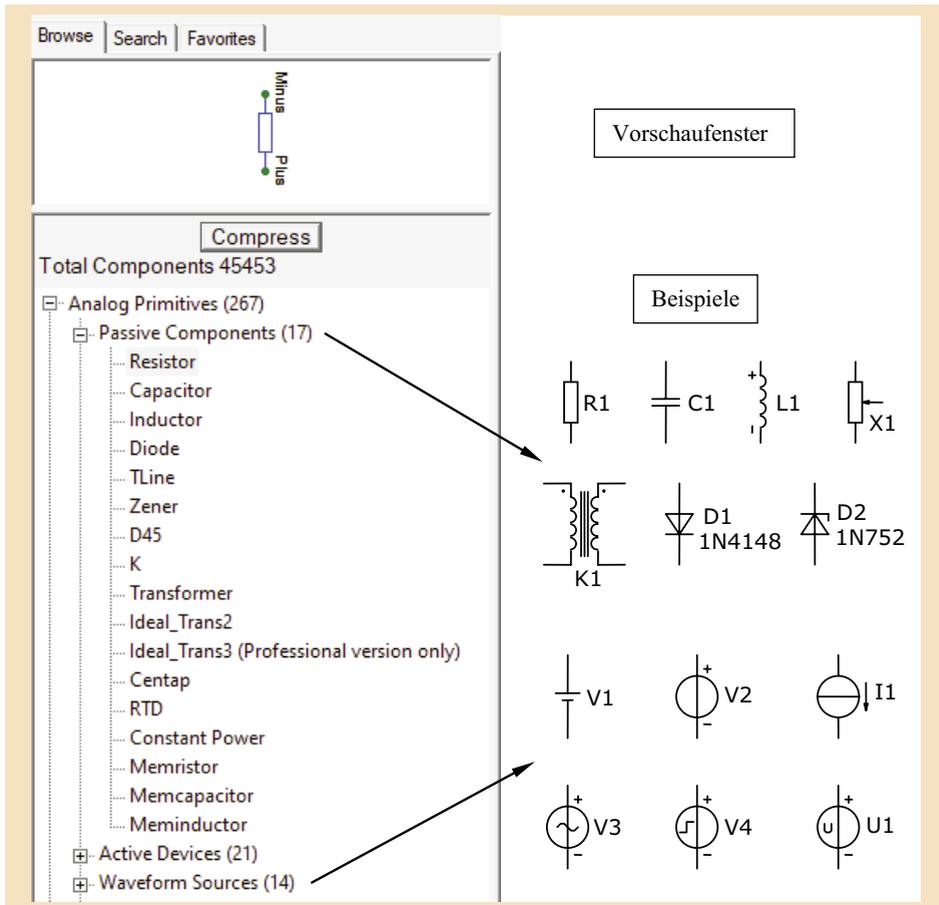
- Hauptgruppe: |*Analog Primitives*|,
- Gruppe (Untergruppe): {*Waveform Sources*},
- Komponente: [*Voltage Source*].

Die gewünschte Komponente wird angeklickt (linke Maustaste – LMT) und auf die Arbeitsoberfläche übertragen. Das Vorschauenfenster ermöglicht eine Kontrolle der Auswahl. Mit der Taste > Esc < oder mit der Leertaste wird dieser Vorgang beendet.

Die Suche einer Komponente ist mit > Search < möglich. Häufig verwendete Komponenten werden unter > Favorites < angezeigt. Weitere Komponenten findet man auch im Menü *Component*. Hier sind dann die Elemente teilweise um jeweils 90° zueinander verdreht oder auch in einer gespiegelten Darstellung verfügbar.

Die Position der Pins einer Komponente kann man über  (Node Numbers) abrufen. Die aktuelle Ausrichtung wird im Bedarfsfall mit  (Flip X) oder  (Flip Y) verändert.

Im Anhang zu diesem Buch werden die wichtigsten Komponenten beschrieben.

Tabelle 1.1 Elemente der Komponenten-Liste *Components*

1.1.2 Zeichnen eines Stromkreises

Zum Erstellen eines Schaltplanes für einen Gleichstromkreis wollen wir als Beispiel eine gemischte Schaltung verwenden, die eine Spannungsteilung und eine Stromteilung bewirkt. Für die Aufbauelemente (Bild 1.3) gilt:

$$U_q = 12 \text{ V mit } R_1 = 1,6 \text{ k}\Omega, R_2 = 6 \text{ k}\Omega, R_3 = 4 \text{ k}\Omega.$$

Als Spannungsquelle wird über die Komponentenliste des Panels (Hauptgruppe: *|Analog Primitives|*) aus der Gruppe *{Waveform Sources}* die Komponente *[Voltage Source]* ausgewählt. Es meldet sich das Fenster *[Voltage Source]*. Diese Universalquelle verfügt über mehrere leistungsfähige Funktionen, die über eine / Registerkarte / festgelegt werden. Für die DC-Quelle / None / werden folgende Einstellungen vorgenommen (vgl. auch Anhang – Abschnitt 9.1):

VALUE: überschreiben mit 12 V und aktivieren der Anzeige mit > Show <

PART: überschreiben von V1 mit U_q und > OK <.

Nun ist die Quelle auf der Arbeitsoberfläche sichtbar. Da keine weiteren Quellen benötigt werden, schließen wir diesen Vorgang mit > Esc < ab. Falls das dargestellte Quellsymbol zu klein ist, können wir diesen Sachverhalt mit > Strg < und > + < (Zehntertastatur), mit dem Zoom -Button oder mit dem Scrollrad und > Strg < unserer Maus korrigieren.

Wir stellen fest, dass für die Quelle kein Zählpfeil angegeben wird. Diese Tatsache müssen wir so akzeptieren, da eine Änderung in der Evaluationssoftware nicht vorgesehen ist. Als Ersatz wird ja die „Polarität“ der Quelle mit (+) und (-) angegeben (↓).

Die Reihenfolge und die Position von VALUE und PART kann man nach dem Markieren (Anklicken) durch eine Verschiebung mit dem Mauszeiger korrigieren. Das Ändern dieser Angaben gelingt mit einem Doppelklick auf VALUE oder PART und einer neuen Eingabe.

Für einen Widerstand wird über die Komponentenliste des Panels (Hauptgruppe: |*Analog Primitives*|) aus der Gruppe {*Passive Components*} die Komponente [*Resistor*] ausgewählt. Es meldet sich das Fenster [*Resistor*]. Dort sind folgende BE-Attribute zu setzen:

VALUE: R1=1.6k (usw.) und aktivieren der Anzeige mit > Show < .

PART: wird automatisch mit ansteigendem Index gesetzt und > OK <.

Nachdem die drei Widerstände positioniert sind, wird der Vorgang mit > Esc < beendet.

Nun verdrahten wir die Anordnung über den Button  (wire mode). Dazu wird der Mauszeiger an den Ansatz eines Bauelementes gesetzt. Bei gedrückter Maustaste (LMT) kann nun eine Verbindung gezeichnet werden. Die erste Abwinklung wird nach Vorbild des Verlaufes des Mauszeigers übernommen. Für weitere Abwinklungen muss der Mauszeiger neu gesetzt werden.

Hinweis: Das Verdrahten wird erleichtert, wenn man vor dem Zeichnen des Stromkreises ein Raster über  (grid) auswählt. Nach Fertigstellung der Schaltung kann das Raster im Bedarfsfall wieder entfernt werden.

Zum Abschluss muss noch ein Bezugsknoten \perp gesetzt werden. Seine Position ist sinnvoll zu wählen. Diesem Punkt \perp wird von MC das Bezugspotential $\varphi_{PB} = 0$ V zugewiesen. Alle Potentialaussagen gelten dann relativ zum Potentialbezugspunkt (Masse, Ground). Das dazu verwendete Symbol \perp steht als ‚Default‘ und als ‚Euro‘ (etwas kürzer) zur Verfügung.

1.1.3 Anpassung der Schaltungsdarstellung

Die fertig gezeichnete Schaltung kann nun noch an die Vorstellungen des Bearbeiters angepasst werden. Dazu wird die gesamte Schaltung markiert (mit dem gedrückten Mauszeiger umfassen) und in eine einheitliche Farbdarstellung gewandelt. Nach Anklicken des markierten Bereiches (RMT) meldet sich ein Kontextmenü. Wir wählen / Color / aus und klicken die gewünschte Farbe (hier: schwarz) an. Nun könnten uns noch die roten Knotenpunkte stören. Zur Änderung wählen wir aus dem gleichen Kontextmenü die Option *Properties*.

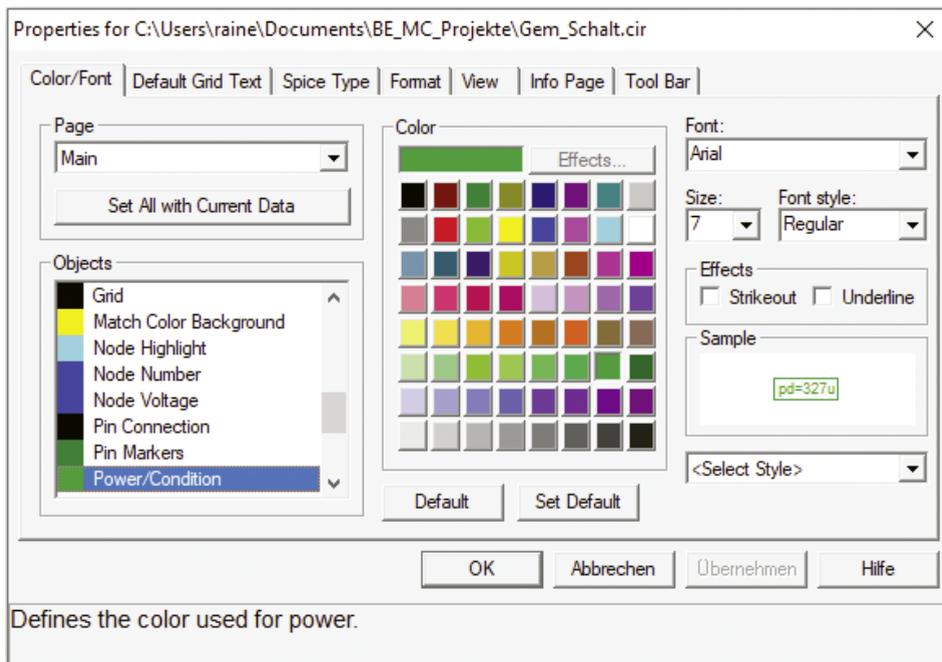


Bild 1.2 Einstellungen unter *Properties*

Hier nehmen wir folgende Einstellungen unter: / Color / und Page: < Main > vor:

- Pin Connection (Knoten) = schwarz
- Node Number (Potentialmarker) = dunkelblau und: Size = 7
- Node Voltage (Potentialangabe) = dunkelblau und: Size = 7
- Power/Condition (Leistungsmarker) = dunkelgrün und: Size = 7
- Current (Strommarker) = rotbraun und: Size = 7

Im Sinne eines Schwarz-Weiß-Druckes sollten dunkle Farben gewählt werden.

Alle anderen Einstellungen bleiben zunächst unverändert. Wenn wir mit unserem Ergebnis zufrieden sind, sollten die Einstellungen mit \gt Set Default \lt als vorläufige Standardwerte deklariert werden. Das erspart bei weiteren Projekten den erneuten Einstellungsaufwand.

Bild 1.3 (links) zeigt die fertiggestellte Schaltung. Diese Schaltung kann aus der Arbeitsoberfläche von MC übernommen und zum Zwecke der Archivierung (usw.) in ein Textverarbeitungssystem (z. B. Word) wie folgt eingefügt werden:

MC: *Edit* \rightarrow *Copy to Clipboard* \rightarrow *Copy ... in EMF-Format*

Word: *Start* \rightarrow *Einfügen* \rightarrow *Inhalte einfügen* \rightarrow *Grafik* oder: \gt Strg \lt & \gt V \lt

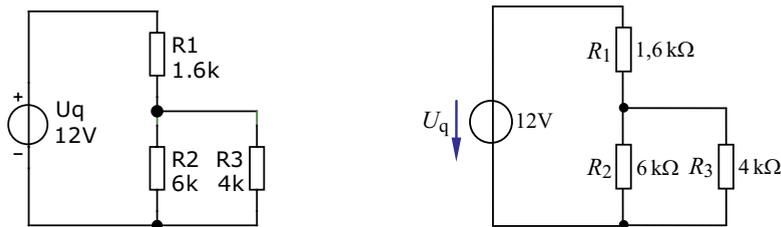


Bild 1.3 Testschaltung in MC (links) und in einer mit Word überarbeiteten Version (rechts)

Wenn eine Schaltungsdarstellung nach DIN erforderlich ist, muss eine Überarbeitung in Word vorgenommen werden. Dazu klickt man die Schaltung mit der RMT an und wählt aus dem Kontextmenü die Position *Bild bearbeiten*. Jetzt erscheint die Schaltung in dem von Word bekannten Zeichenbereich ohne Gruppierung. Nach Korrektur der Strichstärke können nun auch die überdimensionalen Knoten in der Größe angepasst werden. Durch Markieren der gesamten Schaltung ist eine gleichzeitige Änderung der Schriftart und der Schriftgröße möglich. Der Indizes müssen einzeln tiefgestellt werden. Zum Abschluss kann man der Quelle auch noch den üblichen Zählpfeil spendieren (Polaritätsangaben löschen).

In den folgenden Ausführungen wird auf die Überarbeitung einer Schaltung verzichtet, um die aktuelle schaltungstechnische Grundlage einer Simulation im Original anzugeben. Bei grafischen Darstellungen von Simulationsergebnissen ist diese Überarbeitung erforderlich.



Lehrbeispiel 1.1

Erstellen Sie eine Schaltung nach Vorbild des Lehrbeispiels 5.1 aus [6]. Dabei handelt es sich um ein einfaches Netzwerk mit drei Zweigen. Es fließen demzufolge drei Zweigströme. In jedem Zweig ist eine Spannungsquelle zu einem Widerstand in Reihe geschaltet. Messen Sie mit einem verfügbaren Instrument (hier: *[Animated Meter]*) die resultierende Spannung U_{DE} über den drei Zweigen.

Für die Aufbauelemente gilt: $U_A = 24\text{ V}$, $U_B = 12\text{ V}$ und $U_C = 5\text{ V}$ sowie $R_1 = R_2 = R_3 = 1\text{ k}\Omega$.

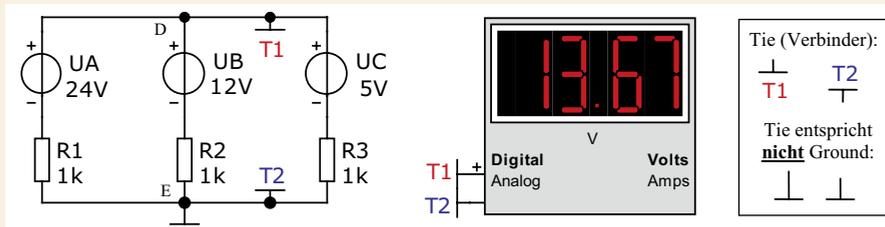


Bild 1.4 Schaltung zum Lehrbeispiel 1.1

■ 1.2 Analyse von Gleichstromkreisen

Zur Beschreibung des elektrischen Verhaltens eines Gleichstromkreises sollte zunächst die Situation in einem fest eingestellten Arbeitspunkt analysiert werden. Diese Situation entsteht z. B. in einer schaltungstechnischen Kombination von Widerständen, die über eine Quelle mit einer konstanten Quellengröße (U_q oder I_q) betrieben wird. Dabei stellt sich für jeden Widerstand R_x ein Arbeitspunkt ein, der mit U_x , I_x und P_x beschrieben werden kann. Diese Analyse wird demzufolge als Arbeitspunktanalyse (*bias point*) bezeichnet.

In vielen Fällen soll ein Gleichstromkreis bei Variation eines Parameters untersucht werden. Damit stellen sich je nach Variation eine Vielzahl unterschiedlicher Arbeitspunkte ein, die in einer grafischen Darstellung visualisiert werden müssen. Diese Situation entsteht, wenn eine Quellengröße (U_q bzw. I_q) oder ein Widerstand R_x einen vorgegebenen Bereich durchläuft. Die Variation wird als DC-Sweep bezeichnet. Solche Sweeps können miteinander kombiniert werden (DC-Main-Sweep und DC-Nested-Sweep). Dann erhält man mehrere Funktionsverläufe in einer gemeinsamen oder in einer getrennten Darstellung.

1.2.1 Arbeitspunktanalyse

Wir wollen uns in einem ersten Schritt eine Übersicht über diese Analyseart verschaffen. Dazu verwenden wir die Schaltung aus Bild 1.3. Für die Arbeitspunktanalyse kann die Analyse *Dynamic-DC* eingesetzt werden:

Analysis → *Dynamic-DC* ... und: > OK <.

Obwohl zur Beschreibung eines Arbeitspunktes (AP) pro Bauelement nur ein Datenpaar (U_{AP} ; I_{AP}) ermittelt werden muss, trägt diese Analyse die Bezeichnung ‚Dynamic‘. Warum ist das so? Mit dieser Analyseart kann der Anwender bei Bedarf experimentieren. Bei der Änderung eines Parameters (U_q oder R_x) wird das Analyseergebnis automatisch korrigiert.

Wir starten diese Analyse für die Testschaltung in Bild 1.3 und erhalten die Angaben für die Potentiale  relativ zum Potentialbezugspunkt \perp . Die Spannungen über den jeweiligen Elementen ergeben sich dann aus den Potentialdifferenzen.

Die Ströme in allen Zweigen werden über die Schaltfläche  angezeigt. Der angegebene Pfeil ist ein Richtungspfeil für $I_x \geq 0$. Zur Anzeige der Leistungen wird  betätigt.

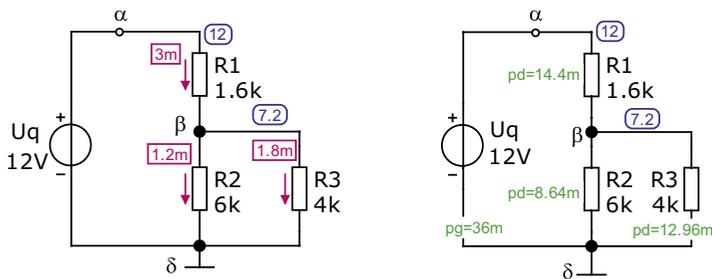


Bild 1.5 Arbeitspunktanalyse (links: Potentiale und Ströme, rechts: Potentiale und Leistungen)

Bild 1.5 zeigt auf der linken Seite die Ergebnisse für die Knotenpotentiale (Rechtecke) und für die Zweigströme (Pfeile). Die Position der Textfenster muss im Bedarfsfall durch Verschieben mit der Maus korrigiert werden. Den Rahmen kann man bei Platzproblemen entfernen.

Der obere Knoten (hier: virtueller Knoten α) besitzt das Potential $\varphi_\alpha = 12\text{V}$. Der echte Knoten β weist ein Potential von $\varphi_\beta = 7.2\text{V}$ auf. Voraussetzung für diese Zahlenwerte ist die Festlegung des Knotens δ als Bezugsknoten mit $\varphi_{P\beta} = \varphi_\delta = 0\text{V}$.

Wir wollen diese Angaben mit der Spannungsteilerregel überprüfen:

$$U_2 = U_3 = U_q \cdot \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + R_2 \parallel R_3} = 12\text{V} \cdot \frac{2,4}{1,6 + 2,4} = 12\text{V} \cdot 0,6 = 7,2\text{V}$$

Über dem Widerstand R_1 liegt dann die Spannung $U_1 = \varphi_\alpha - \varphi_\beta = 4,8\text{V}$.

Die Quelle liefert einen Gesamtstrom $I_{\text{ges}} = I_1 = 3\text{mA}$. Dieser Strom wird im Knoten β in die Teilströme $I_2 = 1,2\text{mA}$ und $I_3 = 1,8\text{mA}$ aufgeteilt. Diese Angaben können wir mit der Stromteilerregel überprüfen. Der Gesamtstrom ergibt sich über das Ohmsche Gesetz:

$$I_{\text{ges}} = I_1 = \frac{U_q}{R_1 + R_2 \parallel R_3} = \frac{12\text{V}}{4\text{k}\Omega} = 3\text{mA}$$

Die Leistungen werden mit p_g (p_g = power generated) und mit p_d (p_d = power dissipated) angegeben. Wir werden diese Leistungen im Weiteren mit Quellenleistung P_q und mit Verbraucherleistung P_v bezeichnen. Im vorliegenden Fall gilt dann:

$$P_q = 36 \text{ mW} \quad \text{und:} \quad P_1 = 14,4 \text{ mW}; P_2 = 8,64 \text{ mW}; P_3 = 12,96 \text{ mW}$$

$$\text{Probe: } \Sigma P_q = \Sigma P_v \quad \text{bzw.:} \quad P_q = (P_1 + P_2 + P_3) = 36 \text{ mW}$$

Dabei werden die Quellenleistungen im Quellen-Zählpeilsystem (Q-ZPS) und die Verbraucherleistungen im Verbraucher-Zählpeilsystem (V-ZPS) dargestellt. Den Strom durch eine Quelle stellt MicroCap im V-ZPS dar (I_q in Richtung U_q).



Lehrbeispiel 1.2



LTspice: LB_1.2

Berechnen Sie für das Netzwerk im Lehrbeispiel 1.1 alle Knotenpotentiale und überprüfen Sie diese Ergebnisse mit einer Arbeitspunktanalyse (Analyse *Dynamic-DC*). Es gilt: $R_1 = R_2 = R_3 = R$.

Das Netzwerk verfügt über zwei echte Knoten. Wenn wir den unteren Knoten als Potentialbezugspunkt wählen ($\varphi_{PB} = 0 \text{ V}$), können wir das Potential des oberen Knotens (Name: α) über das Knotenpotentialverfahren (siehe [6] – Abschnitt 5.4) bestimmen. Es ergibt sich für φ_α nur eine Gleichung:

$$\varphi_\alpha \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{U_A}{R_1} + \frac{U_B}{R_2} + \frac{U_C}{R_3}$$

$$\varphi_\alpha \cdot \frac{3}{R} = \frac{U_A + U_B + U_C}{R}$$

$$\varphi_\alpha = \frac{U_A + U_B + U_C}{3} = \frac{41}{3} \text{ V} = 13,6\bar{6} \text{ V}$$

Daraus können wir die Potentiale der virtuellen Knoten (das sind hier die Knoten zwischen je einer Quelle und einem Widerstand) bestimmen. Diese Potentiale werden von MicroCap automatisch mit berechnet. Wir bezeichnen diese Knoten mit den Indizes der anliegenden Bauelemente und wenden zur Berechnung den Maschensatz im Uhrzeigersinn an.

Im Bild 1.6 (rechts) wird gezeigt, wie das Potential am Knoten A1 (entspricht: U_1) berechnet werden kann.

$$\varphi_{A1} = U_{\alpha 0} - U_A = -10,3\bar{3} \text{ V}$$

Vergleichbare Maßnahmen führen zu den Potentialen an den Punkten B2 und C3.

$$\varphi_{B2} = U_{\alpha 0} - U_B = +1,6\bar{6} \text{ V}$$

$$\varphi_{C3} = U_{\alpha 0} - U_C = +8,6\bar{6} \text{ V}$$

Nun starten wir die Simulation mit *Analysis* → *Dynamic-DC* ...

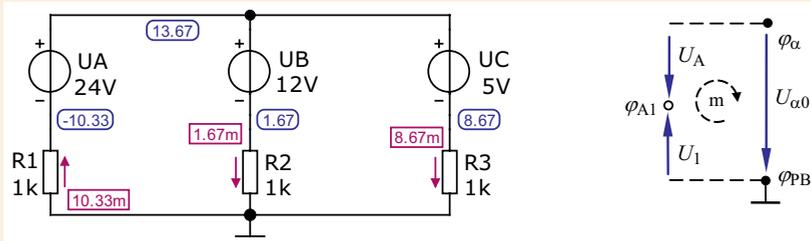


Bild 1.6 Arbeitspunktanalyse zum Lehrbeispiel 1.2 (rechts: Anwendung des Maschensatzes)

Die Analyseergebnisse bestätigen unsere Potentialberechnung. Die Ströme ergeben sich im vorliegenden Fall direkt aus den Potentials, da alle Widerstände mit $R = 1 \text{ k}\Omega$ den gleichen Wert aufweisen. Der Strom I_1 fließt gegen den Zählpfeil der Quelle A (Quellen-Charakteristik). Die Ströme I_2 und I_3 fließen in Richtung des Zählpfeils der Quellen B bzw. C (Verbraucher-Charakteristik). Das sagt auch die Leistungsanalyse im Bild 1.7 aus.

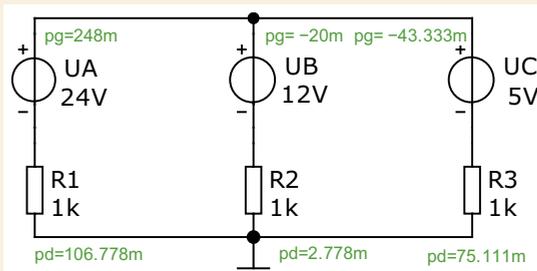


Bild 1.7 Leistungsanalyse zum Lehrbeispiel 1.2

Die Quelle A wirkt als Quelle. Sie gibt eine Leistung $P_A = 248 \text{ mW}$ an die Schaltung ab (+ pg).

Die Quellen B und C wirken als Verbraucher (-pg = + pd).

Sie nehmen Leistung auf: $P_B = -20 \text{ mW}$ und $P_C = -43,3 \text{ mW}$.

1.2.2 DC-Analyse

Bei der Analyse *DC* wird eine Schaltung bei Variation eines Parameters untersucht. Dazu zählt im Gleichstromfall die Variation einer Quellengröße oder eines Widerstandes. Wir entscheiden uns zunächst für die Variation der Quellengröße. Als Beispiel verwenden wir eine Kompensatorschaltung (vgl. [6] – Abschnitt 4.3), mit der ein Vergleich einer unbekanntenen Spannung U_x mit einer Referenzspannung U_{ref} durchgeführt werden kann.

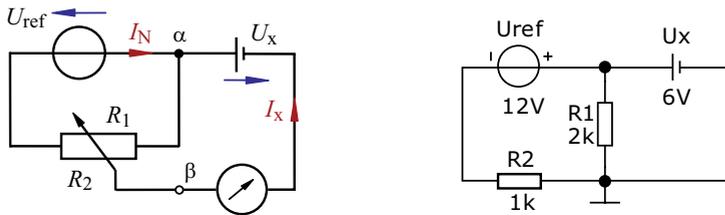


Bild 1.8 Simulation einer Kompensatorschaltung

In der Praxis wird die Schaltung mit dem Stellwiderstand $R_S = R_1 + R_2$ abgeglichen. Der Abgleich ist erreicht, wenn der Strom I_x gleich null ist. Dann ergibt sich der Wert von U_x über die Spannungsteilerregel ([6] – (4.9)):

$$U_x = U_{\text{ref}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Dieser Abgleich kann auch bei einem fest eingestellten Teilverhältnis über eine Variation der Referenzspannung (das ist ja unser Ziel) erreicht werden. Dazu geben wir uns einfache Werte vor: Geg.: $U_x = 6\text{ V}$; $R_1 = 2\text{ k}\Omega$; $R_2 = 1\text{ k}\Omega$ und $U_{\text{ref}} = (6 \dots 12\text{ V})$.

Zur Orientierung wollen wir zunächst die Situation bei $U_{\text{ref}} = 12\text{ V}$ berechnen. Wenn dazu (wie in MicroCap) die Knotenpotentialanalyse eingesetzt wird, ergibt sich bei $\varphi_\beta = 0\text{ V}$ (Bezugsknoten) nur eine Gleichung für das Potential φ_α mit $\varphi_\alpha = U_x = 6\text{ V}$:

$$\varphi_\alpha \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) = \frac{U_{\text{ref}}}{R_2} + I_x \quad \text{bzw.} \quad I_x = \varphi_\alpha \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) - \frac{U_{\text{ref}}}{R_2}$$

Bei $U_{\text{ref}} = 12\text{ V}$ fließt ein Strom von $I_x = -3\text{ mA}$. Dieser Strom fließt in Richtung des Zählpfeils von U_x . Der Akku x nimmt in diesem Fall Leistung auf (er wird „geladen“). Das muss bei der folgenden Simulation berücksichtigt werden.

Für die zu bestimmende Referenzspannung (Bedingung: $I_x = 0$) erhalten wir:

$$\varphi_\alpha \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) = \frac{U_{\text{ref}}}{R_2} \quad \text{bzw.} \quad U_x \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} = \frac{U_{\text{ref}}}{R_2}$$

$$U_{\text{ref}} \Big|_{I_x=0} = U_x \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 6 \text{ V} \cdot \frac{3}{2} = 9 \text{ V}$$

Nun können wir die Analyse mit *Analysis* → *DC* starten. Es meldet sich das Fenster für die Einstellung des DC-Sweeps: *DC Analysis Limits* (Bild 1.9).

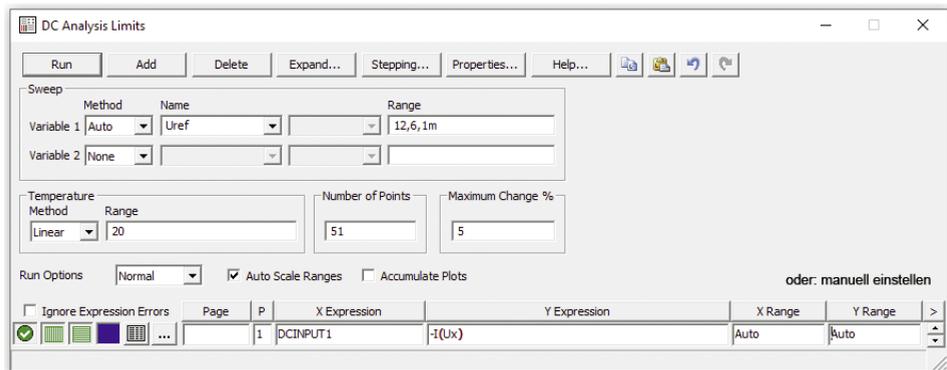


Bild 1.9 Einstellungen im Fenster *DC Analysis Limits*

Hier sind folgende Einstellungen erforderlich:

- Variable 1: Method = Auto Name = Uref Range = 12,6,1m
- Expressions: X Expr. = DCINPUT1 Y Expr. = -I(Ux) Range = Auto

Damit wird die Quellenspannung U_{ref} im Bereich von 6 V bis 12 V variiert. In MicroCap müssen Bereiche von der Obergrenze zur Untergrenze angegeben werden. Es folgt die Schrittweite. Die Angaben werden mit Komma (ohne Leerzeichen) getrennt.

Die Simulation wird mit > Run < gestartet. Es meldet sich das probe-Fenster mit der grafischen Darstellung des Analyseergebnisses: $-I_x = f(U_{\text{ref}})$. Das negative Vorzeichen berücksichtigt der Richtung des in Bild 1.8 festgelegten Stromzählpfeils (↑). Da wir eine Auto-Darstellung gewählt haben, könnte die Skalierung der Achsen noch nicht unseren Vorstellungen entsprechen. Zur Korrektur wird das Fenster *Properties for DC Analysis* mit einem Doppelklick (LMT) geöffnet. In der Registerkarte / Scales and Formats/ können diese Angaben mit neuen Werten überschrieben werden. Das geht auch direkt unter ‚Range‘.

Die Grafik wird in die Zwischenablage kopiert und in Word (oder in ein anderes Textverarbeitungsprogramm) wieder eingefügt. Nach einigen Schönheitsoperationen (Größe, Farbe, Schriftgröße, Linienart, usw.) erhalten wir das Bild 1.10.

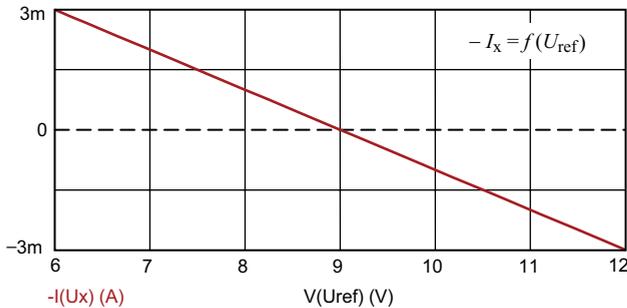


Bild 1.10

Simulationsergebnis zur Kompensatorschaltung

Das Ergebnis sagt aus, dass die Kompensatorschaltung gemäß Bild 1.8 bei $U_{\text{ref}} = 9 \text{ V}$ den abgeglichenen Zustand erreicht ($I_x = 0$).

Diese Aussage kann man auch über die Analyse *Dynamic-DC* abrufen. Dazu wird diese Analyse mit *Analysis* → *Dynamic-DC* ... gestartet, die uns zunächst den Zustand für die in der Schaltung gesetzten Parameter anzeigt. Mit *Dynamic-DC* → *Optimize* kann man nun im sich öffnenden Fenster „eine Frage“ stellen.

Sie lautet: Bei welcher Referenzspannung U_{ref} wird der Strom I_x gleich null?

- Parameter: Uref (Bereich ...)
- That: Equates Expression = I(Ux) To = 0 > Optimize <

Im Ergebnis der Optimierung wird für U_{ref} ein Wert von 9 V angezeigt (oben rechts). Bitte probieren Sie das aus. Diese Analyse ist leistungsfähig und kann sehr hilfreich sein.

Hinweis: *Help* → *Sample Circuits* → *Optimizer* → *Using in ... Dynamic-DC*

Nun wollen wir die Variation eines Widerstandes vorstellen. Dazu verwenden wir als klassisches Beispiel den Grundstromkreis mit variabler Last. Er besteht aus einer linearen Spannungsquelle mit $U_q = 10 \text{ V}$ und $R_1 = 50 \Omega$ sowie einem variablen Lastwiderstand R_a . Der Hinweis (var) wurde mit dem Texteditor > Text Mode < (Grid Text) zusätzlich eingefügt.

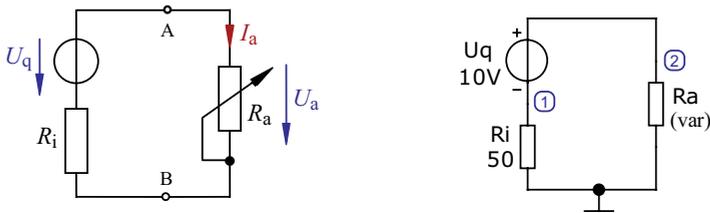


Bild 1.11 Simulation eines Grundstromkreises mit variabler Last

Es besteht die Aufgabe, die Funktionen $U_a = f(R_a)$; $I_a = f(R_a)$ und $P_a = f(R_a)$ in einer geeigneten Form grafisch darzustellen.

Zur Einstellung des DC-Sweeps öffnen wir das Fenster *DC Analysis Limits* (Bild 1.9). Hier sind folgende Einstellungen erforderlich:

- Variable 1: Method = Auto Name = Ra Range = 500,0,10m
- Expressions:

X Expr. = DCINPUT1	Y Expr. = V(Ra)	Range = Auto
X Expr. = DCINPUT1	Y Expr. = I(Ra)	Range = Auto
X Expr. = DCINPUT1	Y Expr. = Pd(Ra)	Range = Auto

Wir geben also gleich alle drei Funktionen ein. Für eine einzelne Darstellung müssen dann die anderen beiden Funktionen deaktiviert werden. Dazu ist der grüne Schaltknopf in Bild 1.9 auszuschalten.

Die Simulation wird zunächst für $V(R_a)$ mit > Run < gestartet. Das probe-Fenster zeigt den Verlauf der Spannung über dem Lastwiderstand für den Bereich: $0 \leq R_a \leq 500 \Omega$ an.

Nun wechseln wir zur Darstellung für $I(R_a)$. Dazu muss das probe-Fenster nicht unbedingt ausgeschaltet werden. Eine Änderung ist auch über *DC → Limits ...* möglich. Jetzt zeigt das probe-Fenster den Verlauf des Stromes durch den Lastwiderstand an.

Den Verlauf der Leistung erhalten wir bei Aktivierung der Expression-Funktion $P_d(R_a)$. Die vom Lastwiderstand aufgenommene Leistung durchläuft bei $R_a = R_i$ (Anpassungsfall) ein Maximum. Dann liegt über R_a die halbe Leerlaufspannung. Durch die Schaltung fließt der halbe Kurzschlussstrom.