

Elektrotechnisches Grundlagenpraktikum

Schaltungssimulation mit SPICE

- Arbeitspunktanalyse
- Transientenanalyse
- DC-Sweep-Analyse
- AC-Analyse

von

Dr.-Ing. A. Teltschik

Inhaltsverzeichnis

1	Lernziele	3
2	Literatur	3
3	Geräte	3
4	Grundlagen	4
4.1	Einleitung.....	4
4.2	Aufbau der Simulationsumgebung	4
4.3	Schaltplaneingabe	4
4.3.1	Bauteilbibliothek	6
4.3.2	Schaltplanelemente, Bauteileigenschaften und Eingabekonventionen	6
4.3.3	Ground Element.....	7
4.3.4	Widerstand, Spule und Kondensator	7
4.3.5	Spannungsquelle.....	8
4.3.6	Spice Anweisungen	9
4.4	Definition der Analyseart.....	9
4.4.1	Arbeitspunktanalyse [.op] (DC operating point / bias point)	9
4.4.2	Transientenanalyse [.tran].....	10
4.4.3	DC-Sweep Analyse [.dc].....	10
4.4.4	Analyse im Frequenzbereich [.ac]	11
4.5	Grafische Darstellung der Analyseergebnisse	11
4.5.1	Cursorfunktion im Plot	11
5	Versuchsteil	13
5.1	Aufgabe 1: Einfache DC-Arbeitspunkt- und DC-Transientenanalyse.....	13
5.2	Aufgabe 2: Kennlinienvermessung einer Zenerdiode (Z-Diode) mit der DC-Sweep-Analyse	15
5.3	Aufgabe 3: Spannungsstabilisierung mit Zenerdiode.....	16
5.4	Aufgabe 4: Begrenzung mit Zenerdiode.....	20
5.5	Aufgabe 5: AC-Transientenanalyse und AC-Analyse	20
	ETGP - Versuchsfeedback	25
	Anhang A Datenblatt Zenerdiode BZX84B xx	27
	Anhang B Frequenz- und Phasengang des RC-Gliedes.	29

5 Versuchsteil

5.1 Aufgabe 1: Einfache DC-Arbeitspunkt- und DC-Transientenanalyse

Der Hersteller einer Elektronikkomponente bekommt regelmäßig Reklamationen innerhalb der Garantiezeit. Ihre Aufgabe besteht darin herauszufinden, weshalb ein spezielles Bauteil zerstört wird. Bild 5.1 zeigt das Ersatzschaltbild der Elektronikkomponente. Das in allen Reklamationen defekte

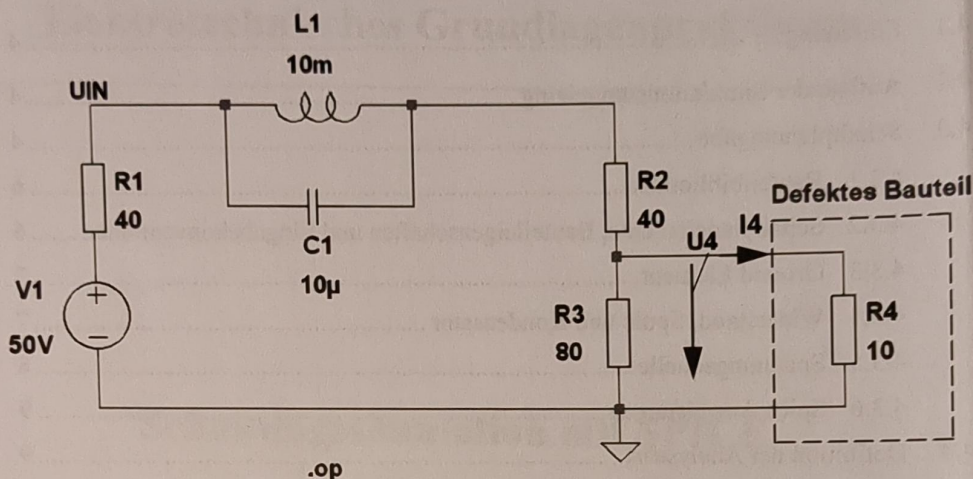


Bild 5.1 Ersatzschaltbild der Elektronikkomponente

Bauteil kann durch den Widerstand R4 modelliert werden. Laut Herstellerdatenblatt muss die Klemmenspannung U_4 des Bauteils immer kleiner 5.5V sein, damit es nicht zerstört wird. Untersuchen Sie die Schaltung, um die Ursache für die Zerstörung zu finden; gehen Sie dabei wie folgt vor:

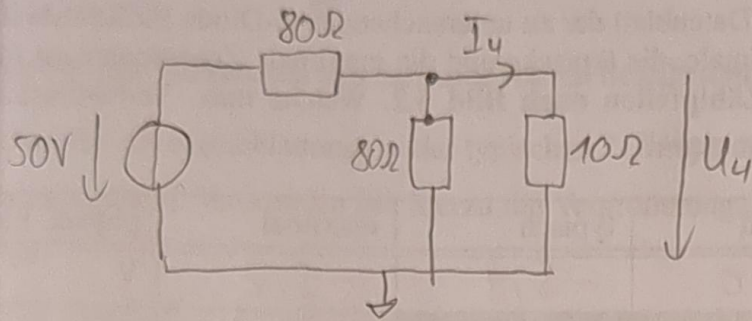
- ✓ 1. Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild (in den Kasten auf der nächsten Seite) für den stationären Zustand und berechnen Sie analytisch die Spannung U_4 und den Strom I_4 .
2. Melden Sie sich **Benutzer:** Lokaler ETGP Benutzer
am PC an: **Kennwort:** etgplocal Programmstart: 
- ✓ 3. Erstellen Sie den Schaltplan nach Bild 5.1 in LTSpice und führen Sie eine Arbeitspunktanalyse [.op], zur Ermittlung von U_4 , I_4 , und der Verlustleistung P_{R4} (berechnen) von R4, durch.
Speichern Sie den Schaltplan auf dem Desktop im Ordner "LTSpice".
3. Führen Sie eine Transientenanalyse für 20ms durch. Bestimmen Sie U_4 und I_4 . Welchen Einfluss simulieren Sie durch die Aktivierung der Option Start external DC supply at 0V?
4. Vergleichen Sie die Ergebnisse miteinander.
Wann und weshalb wird das Bauteil zerstört?

Hinweis:

Die Spannungsquelle finden Sie im Bauteilkatalog (Symbol: ) unter der Bezeichnung voltage. Spezifizieren Sie lediglich die DC-Value von 50V im Parametermenü der Spannungsquelle.



zu 1. ESB und analytische Berechnung:



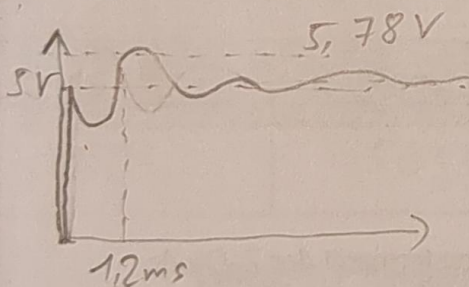
$$U_u = 50V \cdot \frac{80\Omega \parallel 10\Omega}{80\Omega + 80\Omega \parallel 10\Omega} = 5V$$

$$I_u = \frac{U_u}{R_u} = 500mA$$

zu 2. Lösung Arbeitspunktanalyse:

$$U_u = 4,99994V \quad I_u = 0,49994A \quad P_{R_u} = 2,49967W$$

zu 3. Lösung Transientenanalyse:



Wenn die Spannungsquelle von 0V eingeschaltet wird, übersteigt die Spannung kurzfristig 5,5V.

$$U_{u,max} = 5,78V, \quad I_{u,max} = 578mA$$

zu 4. Vergleich und Erklärung:

Das Bauteil wird beim Einschalten durch die Schwankungen in der Spannung zerstört ~ 1,2ms.

Dies wird durch die Effekte der Parallelschaltung aus Kondensator und Induktivität verursacht.

→ Schwingkreis

5.2 Aufgabe 2: Kennlinienvermessung einer Zenerdiode (Z-Diode) mit der DC-Sweep-Analyse

Im Anhang finden Sie das Hersteller Datenblatt der zu untersuchenden Z-Diode **BZX84b5v11t1**. Entnehmen Sie dem Datenblatt die minimale, die typische und die maximale Zenerspannung für einen Zenerstrom von $I_Z = -5\text{mA}$ gemäß Zählpfeilen nach Bild 5.2. Welche max. Verlustleistung verkraftet das Bauteil auf FR-5 Platinenmaterial?

BZX84b5v11t1	minimal	typisch	maximal	physik. Einheit
U_Z bei $I_Z = -5\text{mA}$	-5,00	-5,1	-5,2	V
FR-5 Verlustleistung P_D			225 26	mW

Tabelle 5.1 Kenndaten der Z-Diode BZX84b5v11t1

Bestimmen Sie nun die Kennlinie der Zenerdiode mit der DC-Sweep Analyse in LTSpice. Erstellen Sie dazu den folgenden Schaltplan in LTSpice:

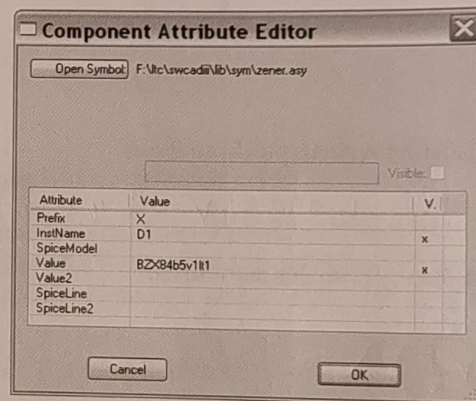
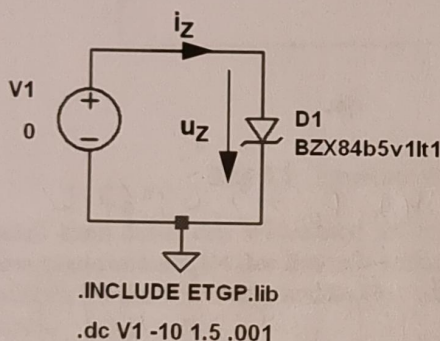


Bild 5.2 a. Schaltplan zur Kennlinienvermessung b. Parametermenü der Z-Diode

Hinweise:

- Das Symbol für die Zenerdiode finden Sie im Bauteilkatalog (Symbol: ) unter der Bezeichnung **zener**.
- Den **Component Attribute Editor** der Z-Diode erhalten Sie, indem Sie bei gedrückter **Strg**-Taste einen Rechtsklick mit der Maus auf das Bauteil machen. Ändern Sie das Feld **Prefix** und **Value** (Schreibweise beachten) wie in Bild 5.2b angegeben.
- Die Diodenmodellbeschreibung befindet sich in der Datei **ETGP.lib**. Erstellen Sie eine **SPICE Directive** **.INCLUDE ETGP.lib** wie in Bild 5.2a, damit LTSpice darauf zugreifen kann.
- Erstellen Sie eine weitere **SPICE Directive** für eine **DC-Sweep** Untersuchung. Typ **Linear**, von **-10V** bis **1.5V** in **0.001 V** Schritten.

5. Kapitel: Versuchsteil

Starten Sie die Simulation und erstellen Sie einen Plot der Diodenkennlinie ($i_Z = f(u_Z)$) , sowie der Verlustleistung der Diode  (Taste ALT + Mausklick auf das Bauteil).

 **Beachten Sie das Vorzeichen des Stromes wie im Schaltplan in Bild 5.2 !**

Vergleichen Sie die Datenblattangabe der typischen Zenerspannung bei -5 mA Zenerstrom mit ihrem Simulationsergebnis. Verwenden Sie hierzu die Vergrößerungsfunktion  und die Cursorfunktion im Plot.

BZX84b5v1lt1	U_Z	physikalische Einheit
U_Z bei $I_Z = -5.00$ mA (Datenblatt)	- 5100	mV
U_Z bei $I_Z = -5.00$ mA (Analyse)	- 5103,7	mV

Tabelle 5.2 Vergleich Kenndaten

 LTSpice liefert über das gesamte Spannungsintervall [-10V ... 1.5V] von u_Z einen Diodenstrom i_Z , ohne Berücksichtigung der maximalen Verlustleistung, die das Bauteil verkraftet, bevor irreversible Schäden entstehen.

Bestimmen Sie unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Verlustleistung mit der Cursorfunktion das korrekte Spannungsintervall von u_Z und den zugehörigen Diodenstrom i_Z . Reduzieren Sie anschließend in der Spice Directive das Simulationsintervall auf ihre ermittelten Grenzen und starten Sie die Simulation erneut. Erstellen Sie einen Ausdruck der korrekten Kennlinie (**Achten Sie auf das richtige Vorzeichen des Stromes wie in Bild 5.2a!**) einschließlich der Verlustleistung. Kennzeichnen Sie im Ausdruck die aus dem Datenblatt entnommene typische Zenerspannung.

u_{Zmin} / mV	i_{Zmin} / mA	u_{Zmax} / mV	i_{Zmax} / mA
- 5107	- 5093	836,1	31,17

Tabelle 5.3 Kennlinienintervall der Z-Diode BZX84b5v1lt1

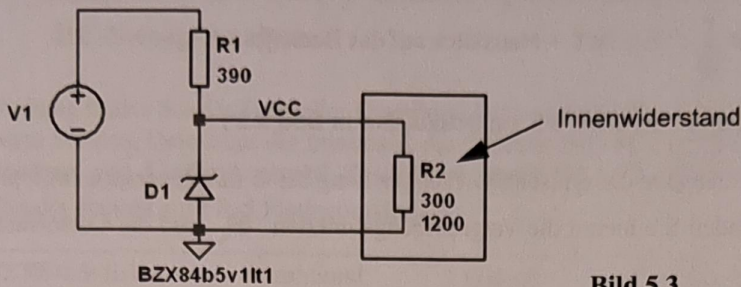
5.3 Aufgabe 3: Spannungsstabilisierung mit Zenerdiode

Die spezielle Eigenschaft der Zenerdiode (Knickbereich im negativen u_Z -Spannungsbereich) lässt sich nutzen, um eine einfache Spannungsbegrenzung bzw. -stabilisierung aufzubauen. Logikbausteine für den 5V Betrieb, wie z. B. die Serie 74F..., sind für einen Betriebsspannungsbereich von $V_{CC} = 4.5V - 5.5V$ spezifiziert. Um einen solchen Baustein im PKW an der 12V Bordatterie zu betreiben, müssen Sie die Bordspannung u. a.¹ mit einer Zenerdiode nach Bild 5.3 begrenzen. Zu berücksichtigen ist dabei, dass je nach Ladezustand der Bordatterie deren Batteriespannung im

¹ Die Störungen im KFZ-Netz sind in der Regel so stark, dass noch zusätzliche Filter (z.B. L/C-Kombinationen) für den robusten Betrieb benötigt werden; dies wird jedoch hier vernachlässigt.

5.3 Aufgabe 3: Spannungsstabilisierung mit Zenerdiode

Bereich von 10V - 14V variieren kann. Der Digitalbaustein wurde in Bild 5.3 durch seinen Innenwiderstand (R2) modelliert.

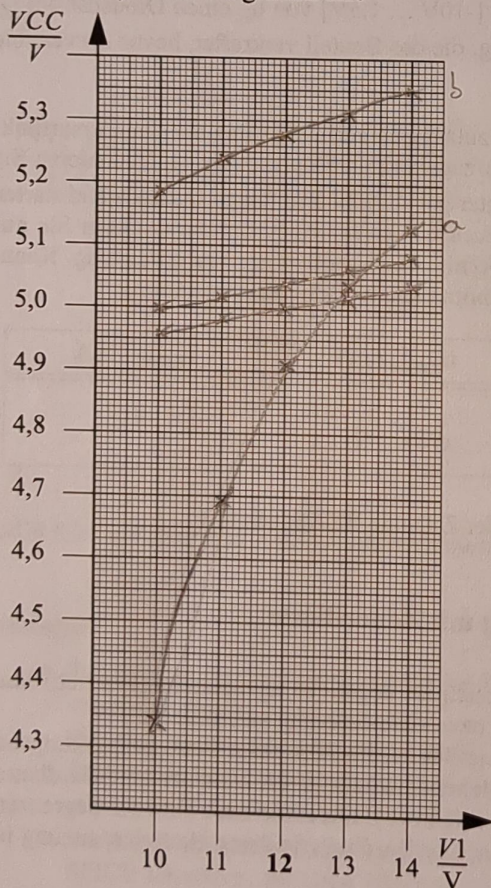


.dc V1
.INCLUDE ETGP.lib

Bild 5.3

Schaltplan zur Spannungsbegrenzung mit Zenerdiode

Untersuchen Sie die Schaltung in LTSpice mit der DC-Sweep-Analyse. Bestimmen Sie jeweils für die beiden Innenwiderstände $R2=300\ \Omega$ und $R2=1200\ \Omega$ die Versorgungsspannung VCC in Abhängigkeit der Batteriespannung V1. Ermitteln Sie hierzu VCC mit der Cursorfunktion für die in Tabelle 5.4 angegebenen Werte und zeichnen Sie die Funktionen $VCC=f(V1, R2=300\ \Omega)$ sowie $VCC=f(V1, R2=1200\ \Omega)$ in das Diagramm ein.



V1	Z-Diode	
	R2=300 Ω	R2=1200 Ω
10V	4,34	5,19
11V	4,69	5,24
12V	4,91	5,28
13V	5,04	5,32
14V	5,13	5,35

Tabelle 5.4 $VCC = f(V1, R2)$

V1	Z-Diode & Transistor	
	R2=300 Ω	R2=1200 Ω
10V	4,96	5,00
11V	4,98	5,02
12V	5,00	5,04
13V	5,02	5,06
14V	5,04	5,08

Tabelle 5.5 $VCC = f(V1, R2)$

Bild 5.4 VCC in Abhängigkeit von V1 und R2

5. Kapitel: Versuchsteil

Beschreiben Sie die Stabilisierungswirkung von VCC durch die Z-Diode in Abhängigkeit der Batteriespannung und des Widerstandes R2 verbal.

Beschreibung:

Die Z-Diode sorgt dafür, dass die Versorgungsspannung VCC in einem kleinen Rahmen um 5V bleibt, aber trotzdem noch mit V1 steigt. Ein höherer R2 sorgt für eine flachere Kurve, aber auch höhere Spannungswerte insgesamt.

Ein höherer Widerstand sorgt für einen höheren Strom durch die Z-Diode. Für welche Werte von V1 und R2 wird der Digitalbaustein außerhalb seiner Spezifikation betrieben? Warum?

Antwort:

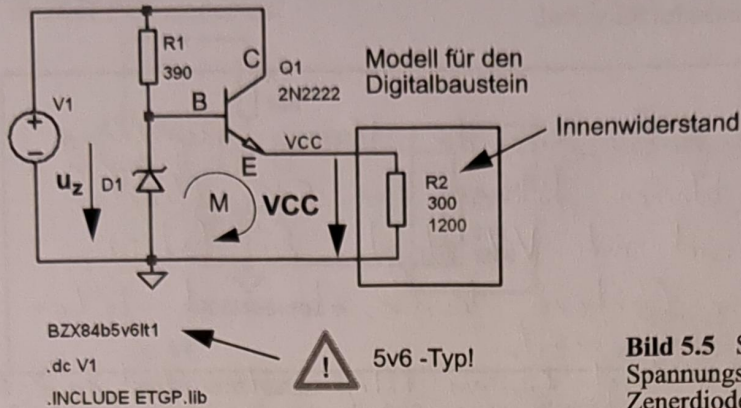
Für $R2 = 300\Omega$ und $V1 \approx 10V$ liegt $V_{CC} = 4,34V$ unter der 4,5V Min-Sp.

Bild 5.5 auf Seite 19 zeigt eine weitere Möglichkeit der Spannungsstabilisierung mittels Z-Diode und Transistor. Untersuchen Sie auch diese Schaltung in LTSpice mit der DC-Sweep-Analyse. Bestimmen Sie für die Innenwiderstände $R2 = 300\Omega$ und $R2 = 1200\Omega$ die Versorgungsspannung VCC in Abhängigkeit der Batteriespannung V1. Tragen Sie ihre Ergebnisse in Tabelle 5.5 und in das Diagramm auf Seite 17 ein.

Hinweise:

- Beachten Sie, dass die Zenerdiode vom Typ 5v1 zum Typ 5v6 zu ändern ist.
- Das Symbol für den bipolaren NPN-Transistor finden Sie im Bauteilkatalog (Symbol: ) unter der Bezeichnung npn. Platzieren Sie das Symbol im Schaltplan und wählen Sie dann über das Parametermenü des Transistors (Rechtsklick auf das Bauteil) den Typ 2N2222 (Pick New Transistor).
- Die Diodenmodellbeschreibung befindet sich in ebenfalls in der Datei ETGP.lib. Daher wird auch hier die SPICE Directive .INCLUDE ETGP.lib benötigt.

5.3 Aufgabe 3: Spannungsstabilisierung mit Zenerdiode



Vergleichen Sie die beiden Stabilisierungsschaltungen hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von der Batteriespannung V_1 und vom Innenwiderstand R_2 . Welche Schaltung ist besser geeignet? Warum?

Antwort:

Transistorschaltung, da deutlich weniger abhängig von V_1 , R_2 .

Erklären Sie die Funktionsweise der Schaltung nach Bild 5.5. Überlegen Sie sich dazu, wie sich die Spannungen der Masche M zusammensetzen:

Erklärung:

$$0 = U_{BE} + V_{CC} - U_Z$$

Maschengleichung: $\rightarrow V_{CC} = U_Z - U_{BE}$

Der Transistor fungiert als Stromverstärker, sodass durch die Zenerdiode nur wenig Strom fließen muss.

Weshalb wurde die Zenerdiode mit $u_z = 5.1 \text{ V}$ durch die Zenerdiode mit $u_z = 5.6 \text{ V}$ ersetzt?

Antwort:

Der Transistor hat ein Spannungsabfall, der von der höheren Spannung u_z kompensiert wird.

5.4 Aufgabe 4: Begrenzung mit Zenerdiode

Nutzen Sie nun Ihr erlerntes Wissen über Zenerdioden und modifizieren Sie die Schaltung aus Aufgabe 1 mittels Zenerdiode so, dass das Bauteil (modelliert durch R4) nicht mehr zerstört wird. Zeichnen Sie ihre Änderung in den nachfolgenden Schaltplan ein:

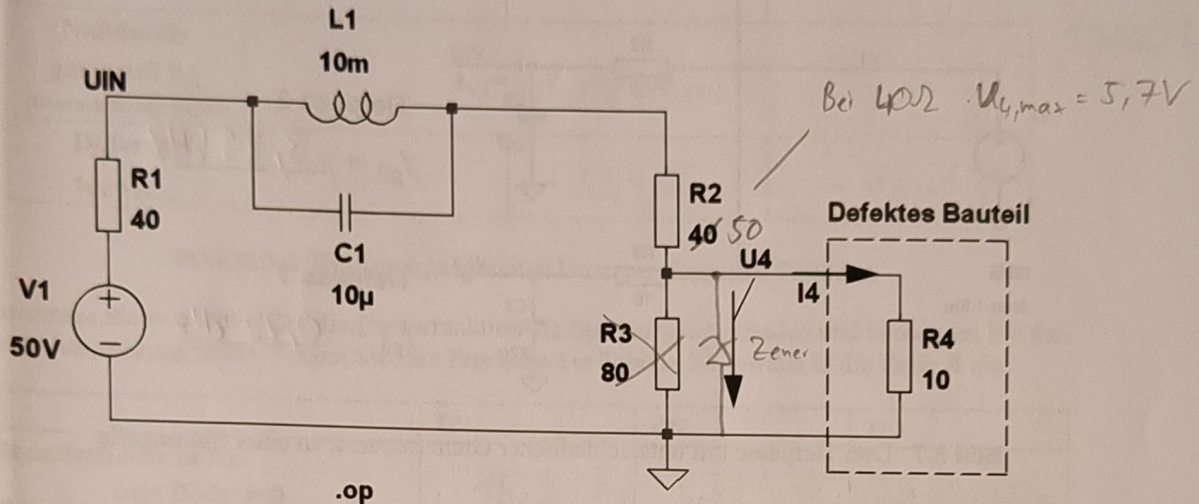


Bild 5.6 Ersatzschaltbild der Elektronikkomponente (mit Schutzbeschaltung)

Erstellen Sie dieselbe Transientenanalyse wie in Aufgabe 1 Punkt 3. mit der Option **Start external DC supply at 0V** und erstellen Sie einen Plot der Spannung U4 und der Verlustleistung der Zenerdiode. Verwenden Sie eine **Schrittweite von 0.01mV**.

Welche maximale Verlustleistung P_{zmax} wirkt auf die Zenerdiode bei maximaler Spannung $U_{4,max}$?

Antwort:

$$P_{zmax} = 773,61 \text{ mW}$$

$$U_{4,max} = 5,47 \text{ V}$$

5.5 Aufgabe 5: AC-Transientenanalyse und AC-Analyse

In Ihrem ersten Versuch "Einführung in die Oszilloskopmesstechnik" haben Sie das Verhalten eines RC-Gliedes an eine Rechteckspannung im Zeitbereich untersucht. In diesem Versuch besteht ihre Aufgabe darin, das RC-Glied im Frequenzbereich näher kennen zu lernen. Dazu steht Ihnen in LT-Spice die AC-Transientenanalyse zur Verfügung, mit welchem Sie Ausgleichsvorgänge vor dem Übergang zum stationären Betrieb visualisieren können. Machen Sie sich zuerst mit den wichtigsten Zusammenhängen des RC-Gliedes nochmals vertraut (s. Anhang B ab Seite 29).

Bild 5.7 zeigt den Schaltplan von drei Tiefpässen mit unterschiedlichen Grenzfrequenzen, die von einer sinusförmigen Spannungsquelle gespeist werden. Bestimmen Sie zuerst analytisch die Grenzfrequenzen f_{g1}, f_{g2}, f_{g3} der Tiefpässe in Bild 5.7.

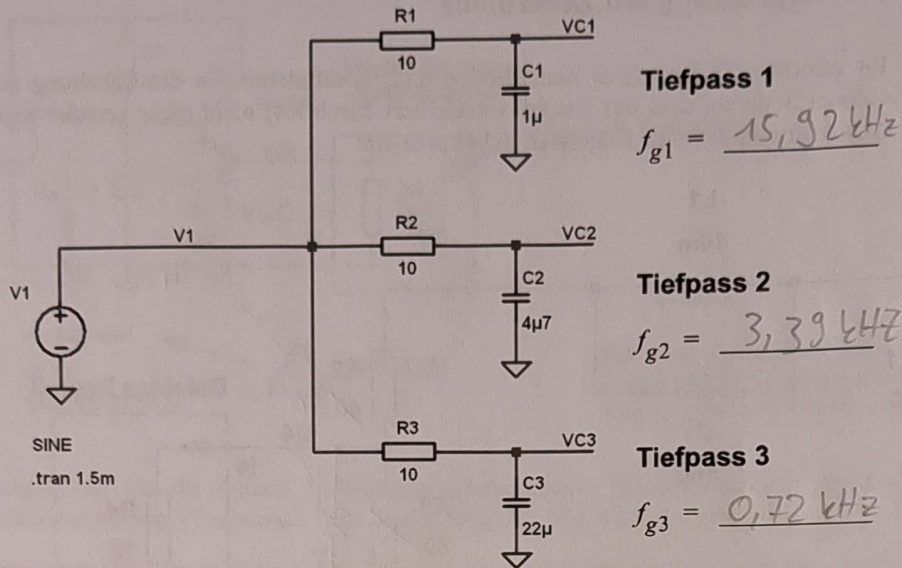


Bild 5.7 Drei Tiefpässe mit unterschiedlicher Grenzfrequenz an einer Sinusquelle

Für die Bestimmung der Phasenverschiebung und der Verstärkung der Ausgangsspannungen VC1, VC2 und VC3 bezüglich der Eingangsspannung V1 müssen Sie eine AC-Transientenanalyse durchführen. Erstellen Sie zuerst den Schaltplan nach Bild 5.7 in LTSpice.

Hinweise:

- Nach dem Platzieren der Spannungsquelle aus dem Bauteilkatalog (Symbol: ) müssen Sie diese über das Parametermenü (Rechtsklick auf das Bauteil – Advanced) in eine Sinusquelle umwandeln. Wählen Sie: **Functions: SINE, Amplitude [V]: 1, Freq. [Hz]: 2.777k**
- Überlegen Sie sich weshalb für diese Aufgabe die Frequenz von 2.777kHz besonders günstig ist!



Die Phasenverschiebung berechnet sich aus der Differenz der Phase von V1 und der Phase der Spannung des entsprechenden Tiefpasses VCi:

$$\Delta\phi_{VCi} = \phi_{V1} - \phi_{VCi} \Big|_{i=1,2,3} \quad \text{Gl. (5.1)}$$

Führen Sie zur Phasenbestimmung eine Transientenanalyse (ohne Option **Start external DC supply at 0V**) für einen Zeitraum von **1.5ms** durch. Erstellen Sie dann einen Plot mit allen vier Spannungen und drucken Sie diesen aus (Papierformat auf Querformat stellen). Zeichnen Sie die Phasenverschiebungen $\Delta\phi_{VCi} \Big|_{i=1,2,3}$ in ihren Ausdruck in die 3. Periode ein.

Ermitteln Sie nun die Phasenverschiebung mit der Cursorfunktion im Plot aus der 3. Periode durch Vermessung der korrespondierenden Nulldurchgangszeiten der einzelnen Kurven. Nutzen Sie zur Bestimmung der Phasenverschiebung aus der Nulldurchgangszeit die Tatsache, **dass sich eine komplette Periode der Sinusschwingung auf den Phasenbereich 0-360° abbildet.**

Tragen Sie Ihre Messwerte in Tabelle 5.6 auf Seite 22 ein.

5. Kapitel: Versuchsteil

Bestimmen Sie nun die Phasenverschiebungen aus Ihren Messwerten und tragen Sie diese in Tabelle 5.7 "Phase in Grad" jeweils in die Zeile A ein.

Nulldurchgangszeit von :	$T_{VC1} = 1,0902 \text{ ms}$	$T_{VC2} = 1,1197 \text{ ms}$	$T_{VC3} = 1,1553 \text{ ms}$
Nulldurchgangszeit t_{V1} (identisch für alle 3 Fälle)	$t_{V1} = 1,0803 \text{ ms}$		
Differenz $t_{V1} - t_{VC...}$	$-9,9 \mu\text{s}$	$-39,4 \mu\text{s}$	$-75 \mu\text{s}$

9972,3°

Tabelle 5.6 Nulldurchgangszeiten korrespondierender Perioden

Bestimmen Sie weiterhin über die Cursorfunktion die Spannungsamplituden und berechnen Sie daraus die Verstärkung in dB. Tragen Sie Ihre Ergebnisse in Tabelle 5.7 jeweils in die Zeile B ein.

	TP1	TP2	TP3
Grenzfrequenz in Hz (aus Bodeplot)	15,856 kHz	3,37 kHz	0,722 kHz
Phase in Grad bei 2.777 kHz $\Delta\phi_{VCi} = \phi_{V1} - \phi_{VCi} \big _{i=1,2,3}$	-9,897°	-39,389°	-74,979°
	-9,908°	-39,37°	-75,39°
Verstärkung in dB bei 2.777 kHz $v_i = 20 \cdot \log \left(\frac{\hat{u}_{VCi}}{\hat{u}_{V1}} \right) \big _{i=1,2,3}$	-0,134 dB	-2,24 dB	-11,83 dB
	-0,613 dB	-2,24 dB	-11,97 dB

Tabelle 5.7 Verstärkung und Phase aus Diagrammen gemessen

Wie verändert sich qualitativ die Verstärkung und die Phasenverschiebung in Abhängigkeit der Grenzfrequenz? Weshalb ist die Frequenz 2.777 kHz besonders günstig für diese Aufgabe?

Antwort:

$f_g \uparrow \rightarrow \Delta\phi_{VCi} \uparrow \text{ \& } v_i \downarrow$

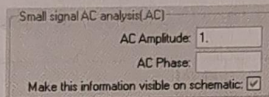
Mit 2,777 kHz entspricht $1 \mu\text{s}$ ungefähr 1°

5.5 Aufgabe 5: AC-Transientenanalyse und AC-Analyse

Sie haben die Verstärkung und Phase der Tiefpässe nun für eine Frequenz (2.777kHz) aus der Zeitbereichsanalyse bestimmt. Für die Bestimmung von Verstärkungs- und Phasenverläufen über einen größeren Frequenzbereich bietet LTSpice eine eigene Analyse - die **AC-Analyse** an.

Erstellen Sie eine AC-Analyse der Tiefpassschaltung von 1Hz bis 1MHz. Hierzu müssen Sie Ihren Schaltplan wie folgt modifizieren:

- Ändern Sie die Spice Directive (Rechtsklick) in die AC-Analysis ab.
Type of Sweep: Decade,
Number of Points per Decade: 20,
Start Frequency: 1,
Stop Frequency: 1000k
(s. auch Bild 4.9 auf Seite 11)
Die Spice Directive im Schaltplan lautet nun: `.ac dec 20 1 1000k`
- Ändern Sie das Parametermenü der Spannungsquelle wie folgt.
Functions: SINE,
alle Werte von DC offset[V] bis Ncycles löschen
Small Signal AC Analysis(.AC):



Erstellen Sie dann einen Bode-Plot mit allen vier Spannungen und drucken Sie diesen aus (Papierformat auf Querformat stellen).

Wie groß sind die Verstärkung in dB sowie der Phasenwinkel in ° bei der Grenzfrequenz?

Antwort:

$$v = -34 \text{ dB}$$

$$\Delta\varphi_{fg} = -45^\circ$$

Messen Sie nun die Grenzfrequenzen mit der Cursorfunktion aus den Bodeplots und tragen Sie Ihr Ergebnis in Tabelle 5.7 auf Seite 22 ein.

Überprüfen Sie ihre Messergebnisse aus dem Zeitbereich in Tabelle 5.7 auf Seite 22, indem Sie **mit der Cursorfunktion die Phase und Verstärkung** für die einzelnen Tiefpässe bestimmen. Tragen Sie ihre Messergebnisse in Tabelle 5.7 jeweils in die **Zeilen C und D** ein.

Vergleichen Sie Ihre beiden Ausdrücke und kennzeichnen Sie im Bode-Plot die Stelle, für die Sie den Zeitbereichsausdruck (1. Aufgabenteil) erstellt haben.

Machen Sie sich anhand der beiden Ausdrücke klar, wie sich die Kurvenverläufe im Zeitbereich ändern, wenn Sie die Frequenz der Sinusquelle ändern.

Beenden Sie das Programm und löschen Sie alle von ihnen gespeicherten Dateien auf dem Desktop im Ordner LTSpice und melden Sie sich am Rechner ab (nicht herunterfahren).