



Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Steuerungs- und Regelungssysteme
Dr. Armin Teltschik



Elektrotechnisches Grundlagenpraktikum

Wechselspannung Gleichrichterschaltungen Linearregler

von

Dr.-Ing. A. Teltschik

5 Versuchsdurchführung

Bild 5.1 zeigt die Frontplatte der Messbox. Links der Transformator, gefolgt vom Brückengleichrichter, 2 Glättungskondensatoren, Linearregler und Lastwiderständen. Die Sekundärseite des Transformators ist über eine automatisch rücksetzende Thermosicherung gegen Überlast abgesichert.



Nach dem Einschalten am Hauptschalter leuchtet die Betriebs-LED grün. Ist die Betriebs-LED erloschen haben Sie eine Überlastung verursacht. **Entfernen Sie alle Anschlüsse von der Buchse A~ und warten Sie - auch wenn die LED sofort wieder leuchtet - mindestens 30s bis Sie fortfahren.** Sie ermöglichen dadurch die Abkühlung der Thermosicherung.

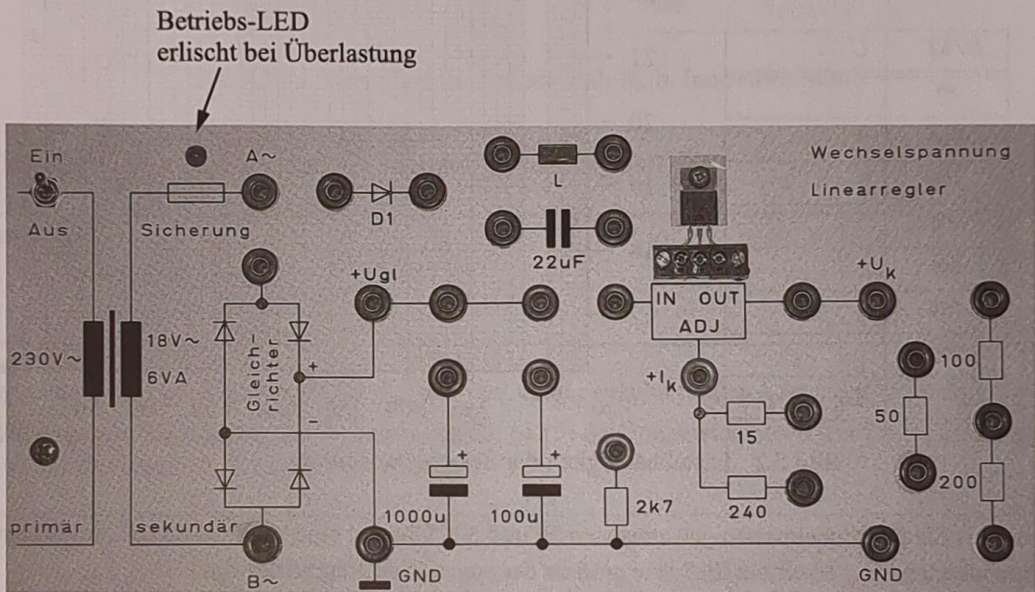


Bild 5.1 Frontplatte des Versuchsaufbaus

5.1 Messungen am Transformator

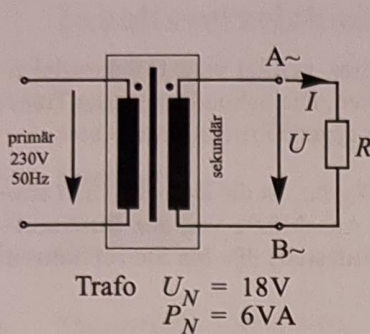
In diesem Aufgabenteil untersuchen Sie das Verhalten des Transformators als Wechselspannungsquelle mit unterschiedlicher Belastung (resistiv, induktiv, kapazitiv).

5.1.1 Aufgabe 1: Leerlaufspannung und Innenwiderstand

Untersuchen Sie nachfolgend das Verhalten der Sekundärspannung in Abhängigkeit der Belastung für folgende Lastwiderstände: $R = \{\infty, 300, 250, 200, 150, 100, 66.6, 50\} \Omega$.

Messen Sie den Effektivwert U mit dem Multimeter (Modus $\sim V$) und erstellen Sie das $U = f(R)$ Diagramm.

5. Kapitel: Versuchsdurchführung



R/Ω	U/V
50	17,5
66.6	18,83
100	20,18
150	21,18
200	21,74
250	22,07
300	22,28
∞	$U_0 = 23,5$

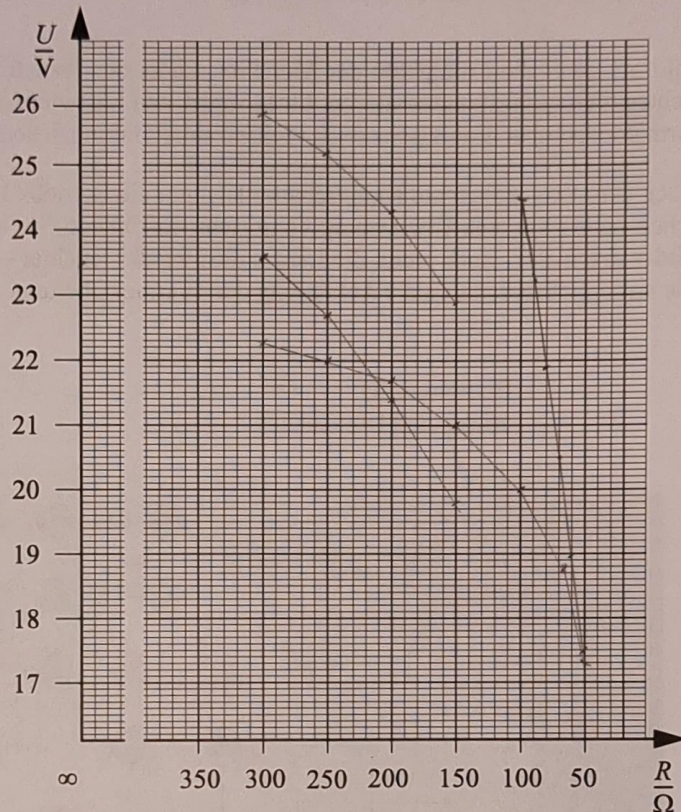


Bild 5.2 Lastabhängigkeit der Sekundärspannung

Verbinden Sie die Einzelmessungen zwischen 50 und 300 Ohm zu einer stetigen Kennlinie. Welchen Nennwiderstand R_N ermitteln Sie? Wie groß ist der zugehörige Nennstrom I_N .

Lösung:

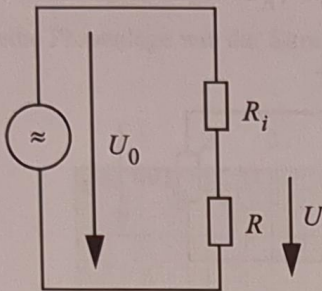
$$R_N = 55,5$$

$$I_N = 0,327 A$$

Bild 5.3 auf Seite 17 zeigt ein vereinfachtes Ersatzbild des Trafos mit Innenwiderstand und Quelle. Bestimmen Sie $R_i = f(U, U_0, R)$ analytisch und berechnen Sie R_i für die in der Tabelle (Bild 5.3b) gegebenen Werte.

Lösung:

$$U_0 = U + I \cdot R_i = U + \frac{U}{R} R_i \Rightarrow (U_0 - U) R \frac{1}{U} = R_i = R \left(\frac{U_0}{U} - 1 \right)$$



a.

b.

R/Ω	R_i/Ω
50	17,143
66.6	16,517
100	16,452
150	16,437
200	16,191
250	16,198
300	16,427

Bild 5.3 a. Vereinfachtes Trafoersatzbild, b. Innenwiderstand

Wie ändert sich der Innenwiderstand in Abhängigkeit der Last?

Antwort: Erst sinkt er mit steigender Last und ~~dann~~ steigt dann wieder

Berechnen Sie nun den Nennstrom I_N und den daraus resultierenden Lastwiderstand R_N aus den Trafoangaben. Bestimmen Sie weiterhin aus Gl. (4.15) den Innenwiderstand des Trafos und vergleichen Sie das Ergebnis mit ihren Messwerten.

Lösung:

$$U_N = 18V$$

$$P_N = 6VA$$

$$I_N = \frac{7}{3}A$$

$$R_N = 54\Omega$$

$$R_i = (0,7 + 1,1 \cdot \sqrt{\frac{P_N}{7W}}) / R_N)^{-1}$$

$$= 15,908\Omega$$

$$I_N = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$R_N = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$R_i = \underline{\hspace{2cm}}$$

5.1.2 Aufgabe 2: Das C-R-Glied am Transformator

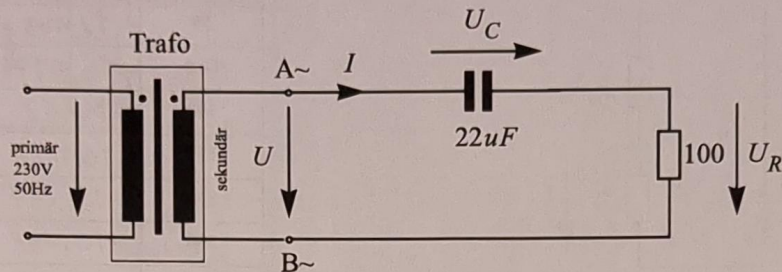


Bild 5.4 C-R Glied

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 5.4 auf. Messen Sie mit dem Multimeter die Spannungs-Effektivwerte U_R , U_C und U und berechnen Sie daraus I sowie die Schein-, Wirk- und Blindleistung, die im C-R-Glied umgesetzt wird.

Lösung:

$$U_R = \underline{12,88}$$

$$U_C = \underline{18,73}$$

$$U = \underline{22,75}$$

$$I = \frac{U_R}{100\Omega} = 0,1288 \text{ A}$$

$$P = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$S = U \cdot I = 2,9302 \text{ W}$$

$$P = U_R \cdot I = \frac{U_R^2}{I} = 1,658944 \text{ W}$$

$$S = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \underline{2,567219 \text{ W}}$$

$$= 2,57 \text{ W}$$

$$Q = \underline{\hspace{2cm}}$$

Die drei Spannungen U_C , U_R und U bilden eine geschlossene Spannungsmasche. Weshalb ist die Summe von U_C und U_R dennoch größer als U ?

Antwort: Da U_C , U_R und U Effektivspannungen mit Phasenversatz sind. U_C und U_R erreichen ihr Maximum nicht gleichzeitig.

Das C-R-Glied kann als komplexe Impedanz $Z = R - j\frac{1}{\omega C}$ betrachtet werden. Im Folgenden werden Sie auf drei verschiedene Arten die Phasenverschiebung $\varphi_Z = \varphi_u - \varphi_i$ bestimmen.

1. Bestimmen Sie die Phasenverschiebung $\varphi_Z = \varphi_u - \varphi_i$ aus dem Zeigerdiagramm (Bild 5.5) der gemessenen Spannungen U_R , U_C , und U . Überlegen Sie sich dazu, welche der drei Spannungen dieselbe Phasenlage wie der Strom I hat.

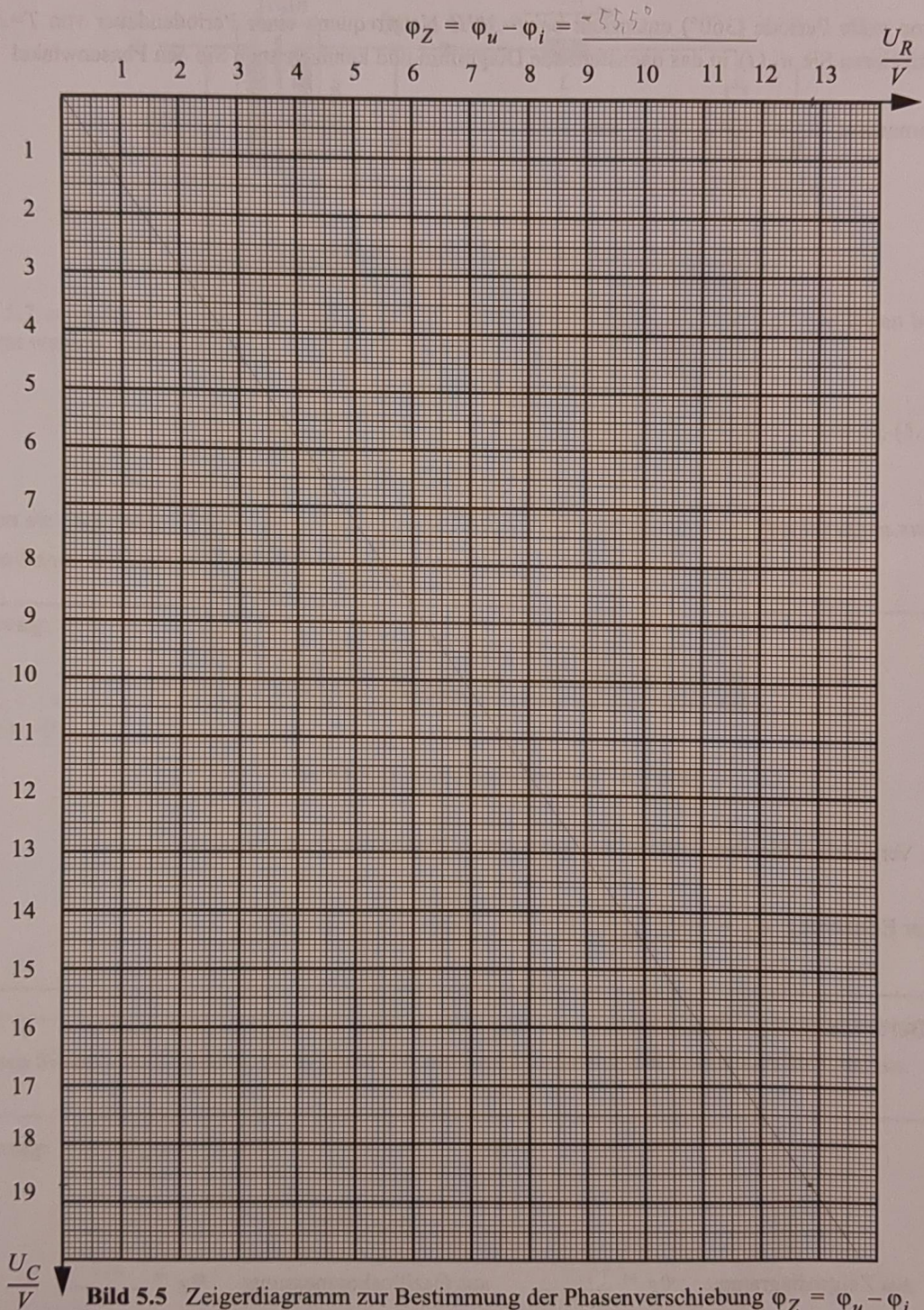


Bild 5.5 Zeigerdiagramm zur Bestimmung der Phasenverschiebung $\varphi_Z = \varphi_u - \varphi_i$

5. Kapitel: Versuchsdurchführung

2. Messen Sie nun die Phasenverschiebung $\varphi_Z = \varphi_u - \varphi_i$ aus, in dem Sie $u_R(t)$ und $u(t)$ im Zweikanalbetrieb auf dem Oszilloskop darstellen. Verwenden Sie den **Cursor Measure - Time** Modus um die Phasenverschiebung aus der Zeitverschiebung Δt der beiden Signale zu bestimmen.

Eine volle Periode (360°) entspricht bei $f=50\text{Hz}$ Netzfrequenz einer Periodendauer von $T=20\text{ms}$. Skizzieren Sie $u_R(t)$ in das nachstehende Diagramm und kennzeichnen Sie den Phasenwinkel

gemessen: $\Delta t = \underline{3,35\text{ms}}$ ms

$$\varphi_Z = \underline{60,3^\circ}$$

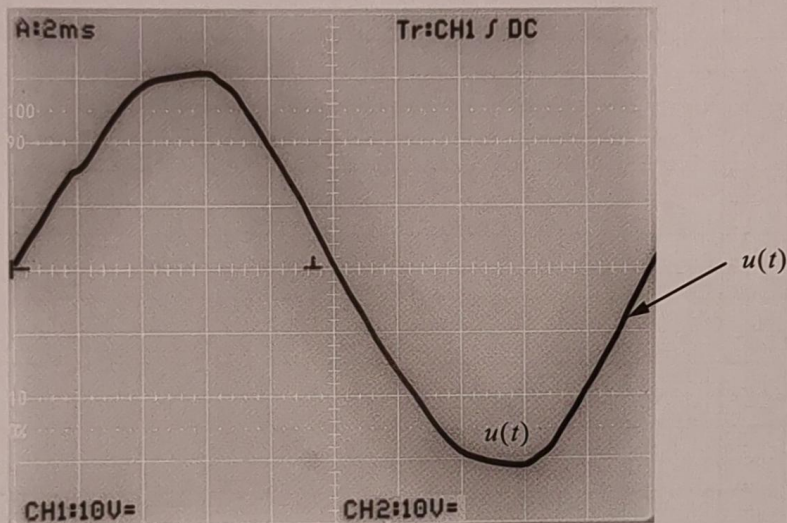


Bild 5.6 Phasenverschiebung C-R Glied

3. Vergleichen Sie abschließend Ihre gemessenen Phasen mit der Berechnung.

Zur Erinnerung: $\varphi_Z = \text{atan}\left(\frac{\text{Im}\{Z\}}{\text{Re}\{Z\}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\omega C}\right) = \tan^{-1}\left(-\frac{1}{\omega RC}\right) =$

Berechnung: $= \tan^{-1}\left(-\frac{1}{0,11}\right) = \tan^{-1}(-9,09) = -1,107 \text{ rad} = -55,735^\circ$

aus Zeigerdiagramm: $\varphi_Z = \underline{-55,5^\circ}$ aus Oszilloskopmessung: $\varphi_Z = \underline{60,3}$

5.1.3 Aufgabe 3: Das L-R Glied am Transformator

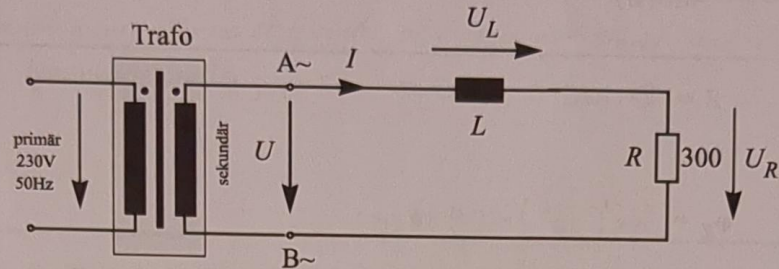


Bild 5.7 L-R Glied

Bild 5.7 zeigt den Transformator mit L-R-Glied beschaltet. L ist unbekannt und soll von Ihnen bestimmt werden. Zeigen Sie, dass

$$L = \frac{R}{\omega} \cdot \sqrt{\left(\frac{U}{U_R}\right)^2 - 1} \quad \text{Gl. (5.1)}$$

Gehen sie dabei vom Ansatz: $U^2 = U_R^2 + U_L^2$ aus und verwenden Sie die Bauteilbeziehungen zwischen Strom und Spannung:

Lösung:

$$U_L = I \omega L \Rightarrow U^2 = U_R^2 + I^2 \omega^2 L^2 = U_R^2 + \frac{U_R^2}{R^2} \omega^2 L^2 \Leftrightarrow \left(\frac{U^2 - U_R^2}{U_R^2} \right) \frac{R^2}{\omega^2} = L^2 \Rightarrow L = \frac{R}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U}{U_R}\right)^2 - 1}$$

$U_R = I R$
 $\Rightarrow I = \frac{U_R}{R}$

Messen Sie nun die Effektivwerte U_R und U mit dem Multimeter und bestimmen Sie L daraus.

Lösung:

$$U_R = 11,83$$

$$U = 23,05 \text{ V}$$

$$L = 7,5968 \text{ mH}$$

5. Kapitel: Versuchsdurchführung

Mit der Kenntnis der Induktivität können Sie nun die Impedanz Z des L-R Gliedes und daraus die Phase $\varphi_Z = \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}\{Z\}}{\operatorname{Re}\{Z\}}\right)$ berechnen.

Lösung: $Z = R + i\omega L = 300\Omega + 501j\Omega$

$$\varphi_Z = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) = 59,1420^\circ$$

Überprüfen Sie nun Ihre Berechnung durch Messung der Phasenverschiebung $\varphi_Z = \varphi_u - \varphi_i$ mit dem Oszilloskop, indem Sie $u_R(t)$ und $u(t)$ im Zweikanalbetrieb auf dem Oszilloskop darstellen. Verwenden Sie den **Cursor Measure - Time** Modus um die Phasenverschiebung aus der Zeitverschiebung Δt der beiden Signale zu bestimmen.

Eine volle Periode (360°) entspricht bei $f=50\text{Hz}$ Netzfrequenz einer Periodendauer von $T=20\text{ms}$. Skizzieren Sie $u_R(t)$ in das nachstehende Diagramm und kennzeichnen Sie den Phasenwinkel.

gemessen: $\Delta t = 2,55 \text{ ms}$

$$\varphi_Z = 45,9^\circ$$

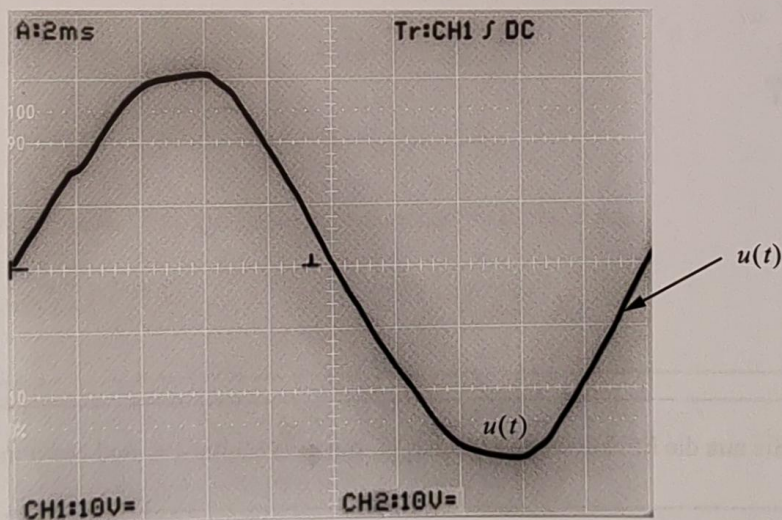


Bild 5.8 Phasenverschiebung L-R Glied

Wie erklären Sie sich den Unterschied zwischen berechneter und gemessener Phase?
Kommt der Fehler von der Berechnung oder von der Messung?

Antwort: Die Berechnung vernachlässigt den Innenwiderstand und die Impedanz der Spannungsquelle.

Bestimmen Sie nun die Phase nochmals mit Hilfe des Zeigerdiagramms. Berücksichtigen Sie dabei den ohmschen Innenwiderstand R_L der Spule, den Sie mit dem Multimeter im Ohm-Messbereich an der **unbeschalteten Spule** ausmessen können. Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm für die Effektivwerte der Spannungen. Betrachten Sie dabei die Spule als "technische" Spule, wie im Versuch 1 (Oszilloskopmesstechnik). Den Spannungsabfall U_{R_L} über dem Innenwiderstand R_L können Sie über den Strom I berechnen, den Sie über eine Spannungsmessung an der Last R berechnen können.

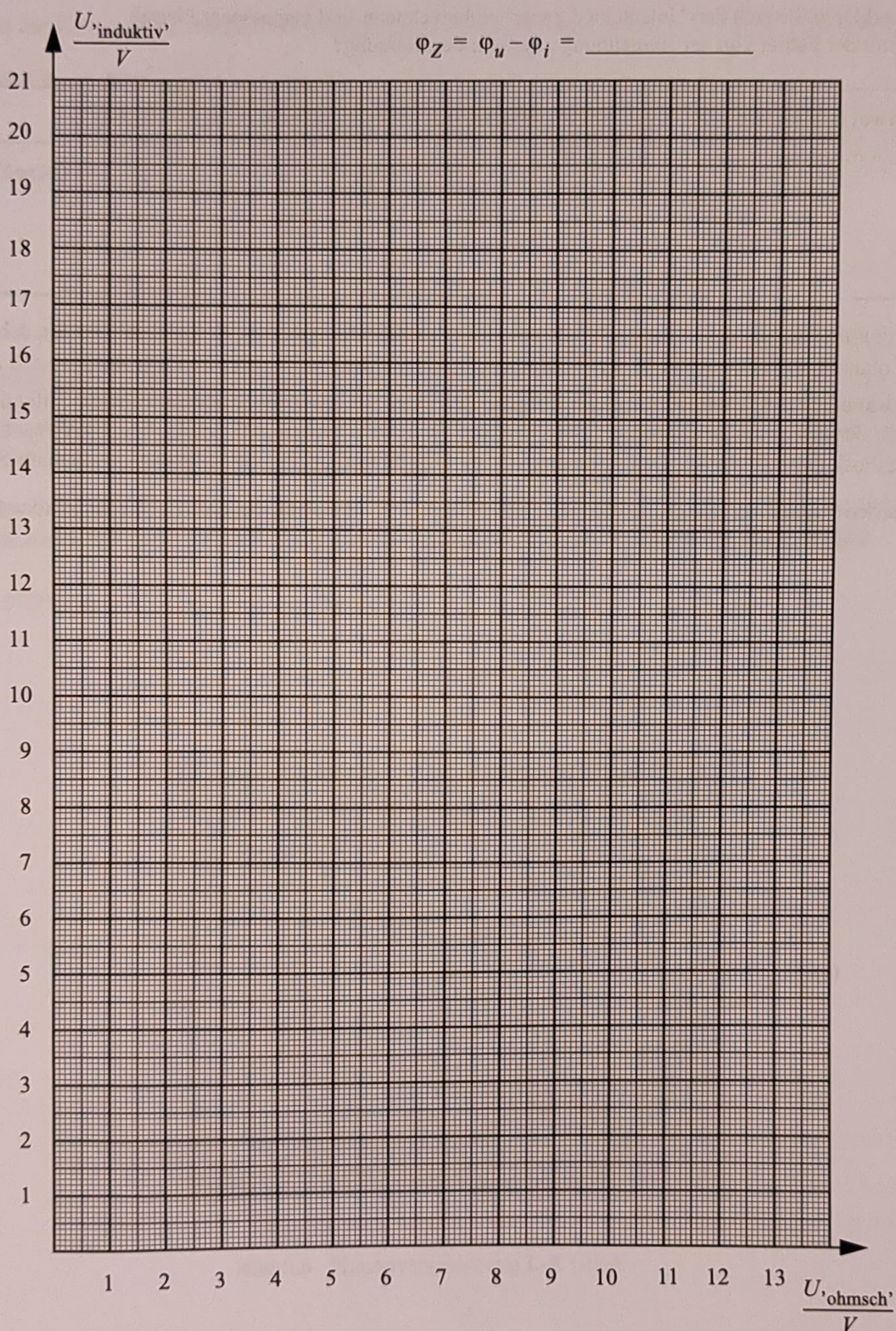


Bild 5.9 Zeigerdiagramm zur Bestimmung der Phasenverschiebung $\varphi_Z = \varphi_u - \varphi_i$

5.2 Gleichrichterschaltungen

5.2.1 Aufgabe 4: Restwelligkeit der Einweggleichrichtung

Bauen Sie die Einweggleichrichterschaltung nach Bild 5.10 B. mit $R = 100\Omega$ auf. Oszilloskopieren Sie im 2-Kanalbetrieb $u(t)$ und $u_R(t)$. Messen Sie weiterhin mit dem Multimeter im DC Bereich ($=V$) die mittlere Gleichspannung $\overline{U}_R$, die am Lastwiderstand R anliegt.

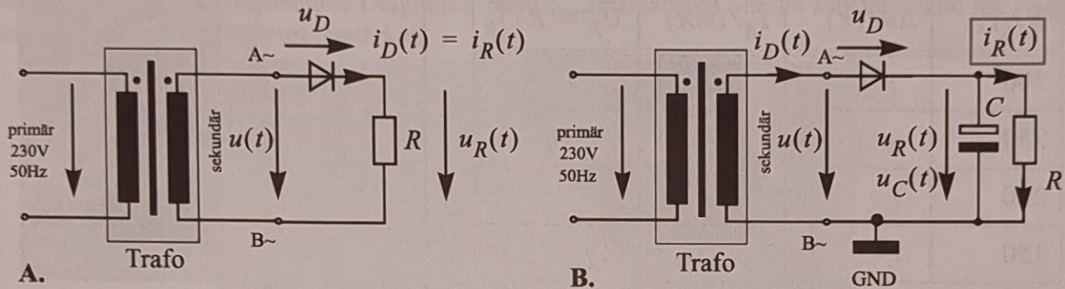


Bild 5.10 Einweggleichrichter ohne (A.) und mit (B.) Glättungskondensator

Welche Restwelligkeit und mittlere Gleichspannung erhalten Sie für

1. $C = 100\mu F$? $\Delta u = 79,8V$ $\overline{U}_R = 15,68V$
2. $C = 1000\mu F$? $\Delta u = 2,47V$ $\overline{U}_R = 17,41V$

Mit welcher Frequenz f schwingt die Restwelligkeit? $f = 50Hz$

Hinweis: Die Restwelligkeit ist eine Wechselgröße. Verwenden Sie eine geeignete Signaleinkopplung am Oszilloskop, um eine möglichst bildschirmfüllende Darstellung zu bekommen. Nur so erhalten Sie mit der **Cursor Measure Funktion** eine ausreichende Genauigkeit zur Bestimmung von Δu . $\Rightarrow AC\text{-Kopplung}$

5.2.2 Aufgabe 5: Dimensionierung des Glättungskondensators

Dimensionieren Sie den Glättungskondensator der Einweggleichrichterschaltung nach Bild 5.10 B. so, dass bei einem mittleren Laststrom $\overline{I}_R = 125mA$ die maximale Restwelligkeit $\Delta u = 1.5V$ beträgt.

Lösung: $\Delta u = 12 \frac{I_R / mA}{C / \mu F} V \Rightarrow C / \mu F = 12 \frac{I_R / mA}{\Delta u / V} = 1000 \mu F$
 $C = \underline{\hspace{2cm}}$

Überprüfen Sie Ihr Ergebnis mit dem Oszilloskop. Messen Sie dazu im 2-Kanalbetrieb $u(t)$ und $u_R(t)$ sowie den Laststrom $\overline{I}_R$ mit dem Multimeter im 10A-Bereich.

5. Kapitel: Versuchsdurchführung

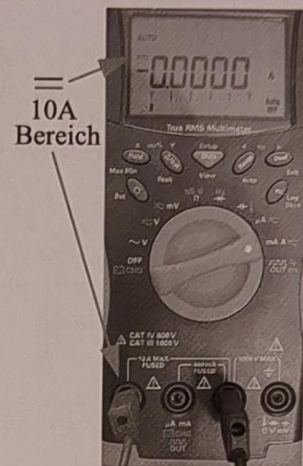


Hinweis: Messen Sie $\bar{I}_R$ zwingend im “+”-Zweig wie in Bild 5.10 B. eingezeichnet, da eine Messung im GND-Zweig durch die geerdeten Oszilloskop-Probes verfälscht wird. Triggern Sie auf $u(t)$, da $u_R(t)$ sehr klein werden kann.

Für welche Lastwiderstände R wird die geforderte Restwelligkeit 1.5V nicht überschritten? Wie beurteilen Sie die Näherungsgleichung zur Dimensionierung von C ?

Lösung:

$R/(\Omega)$	$\Delta u/(V)$	$\bar{I}_R/(mA)$	$\bar{U}_R = R \cdot \bar{I}_R$
300	7,22	78,8	23,64 V
250	7,39	91,2	22,775 V
200	7,6	107	21,4 V
150	7,96	132	19,8 V



Tragen Sie die Spannungswerte $\bar{U}_R$ (Kennlinie) in das Diagramm Bild 5.2 auf Seite 16 ein und vergleichen Sie die beiden Kennlinien.

Weshalb ist $\bar{U}_R$ für $R > 200\Omega$ größer als der Effektivwert U der Trafospannung?

Antwort:

Durch das Laden des Kondensators kann mehr Leistung aufgenommen werden. Die Glättung sorgt für eine durchschnittlich höhere Spannung.

5.2.3 Aufgabe 6: Brückengleichrichter

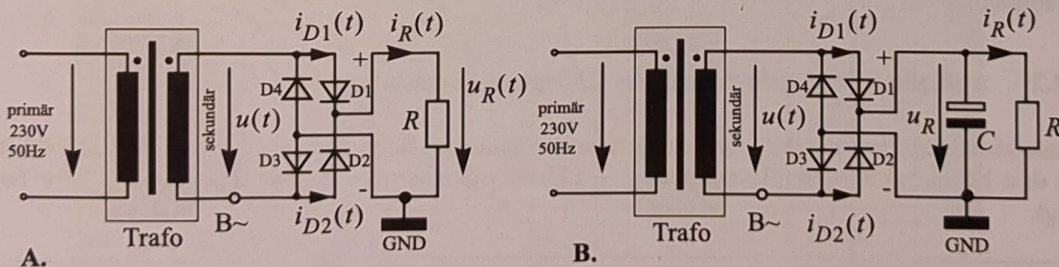


Bild 5.11 Brückengleichrichter ohne (A.) und mit Glättungskondensator (B.)

Warum können Sie bei der Brückengleichrichterschaltung nach Bild 5.11 die Spannungen $u(t)$ und $u_R(t)$ nicht im 2-Kanalbetrieb zusammen oszilloskopieren?

Antwort: Die Brückengleichrichter vertauschen quasi immer wieder die Polung. Die Ground-Kopplung würde eine Richtung des Gleichrichters überbrücken und damit die Schaltung außer Kraft gesetzt.



Hinweis: Stellen Sie das Multimeter wieder um auf Gleichspannungsmessung. B~ und GND dürfen NICHT verbunden sein!

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 5.11 A. $R = 100\Omega$ auf und oszilloskopieren Sie $u_R(t)$. Skizzieren Sie $u_R(t)$ in das vorbereitete Diagramm (Bild 5.12). Beachten Sie die Einstellungen für Triggern, Zeitbasis und Eingangsverstärker:

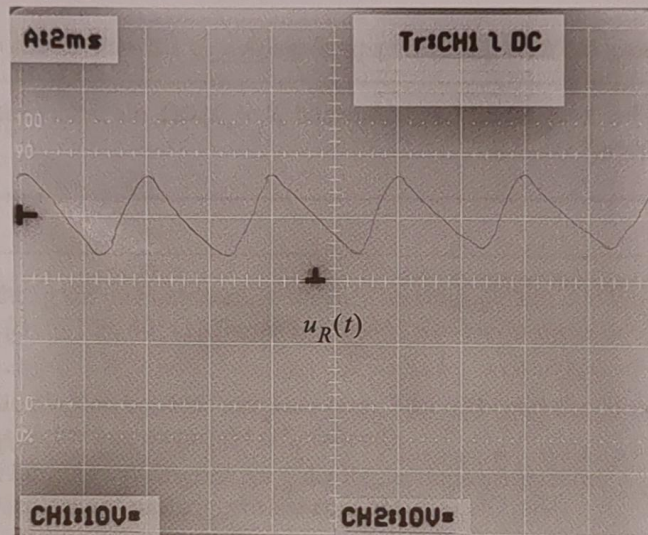


Bild 5.12 Brückengleichrichter ohne Glättungskondensator (Ansicht d. Oszilloskopbildschirms)

Fügen Sie nun abwechselnd den Glättungskondensator $C = 100\mu F$ und $C = 1000\mu F$ hinzu und beobachten Sie den Einfluss auf die Restwelligkeit Δu und die Spannung $\overline{U}_R$. Mit welcher Frequenz f schwingt die Restwelligkeit? Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit denen aus Aufgabe 4.

Antwort:

$$f = 100 \text{ Hz (doppelte Frequenz)}$$

$$C = 100\mu F$$

$$\Delta u = 70,7 \text{ V}$$

$$\overline{U}_R = 20,7$$

$$C = 1000\mu F$$

$$\Delta u = 7,2 \text{ V}$$

$$\overline{U}_R = 20,88$$

Vergleich:

Die Frequenz ist doppelt so hoch und die Restwelligkeit damit etwa halb so groß.

5. Kapitel: Versuchsdurchführung

Vermessen Sie nun die Lastabhängigkeit der Ausgangsspannung $\overline{U_R}$ für die Lastwiderstände $R = \{150, 200, 250, 300\} \Omega$ mit Glättungskondensator $C = 1000 \mu F$. Tragen Sie die Spannungen (Kennlinie) direkt in das Diagramm Bild 5.2 auf Seite 16 ein.

Bestimmen Sie aus den Kennlinien, welche Wirkleistung $P = U^2/R$ für $R = 250 \Omega$ im Widerstand umgesetzt wird:

1. Wechselspannungsbetrieb: $P = \underline{1,918}$
2. Einweggleichrichtung mit $C = 1000 \mu F$: $P = \underline{2,07}$
3. Brückengleichrichtung mit $C = 1000 \mu F$: $P = \underline{2,54}$

Wie erklären Sie sich bei konstantem Lastwiderstand $R = 250 \Omega$ die unterschiedlichen Leistungsaufnahmen aus dem Trafo?

Antwort:

Der Widerstand nimmt bei einer bestimmten Spannung nur eine bestimmte Leistung auf. Der Kondensator nimmt in der kurzen Zeit in der die Spannung hoch ist viel Leistung auf und gibt sie dann an den Widerstand weiter wenn die Ausgangsspannung niedriger ist. So kann der Widerstand bei geglätteter Spannung insgesamt mehr Leistung aufnehmen.

5.3 Der Linearregler LM317

Wie Sie in den vorangegangenen Aufgaben gesehen haben, verbleibt nach der Gleichrichtung und Siebung einer Wechselspannung durch einen Glättungskondensator eine meist ungewünschte Lastabhängigkeit der Ausgangsspannung sowie eine Welligkeit von mehreren 100mV. Beides lässt sich durch den Einsatz eines Linearspannungsreglers reduzieren.

5.3.1 Aufgabe 7: Geregelte Spannungsquelle

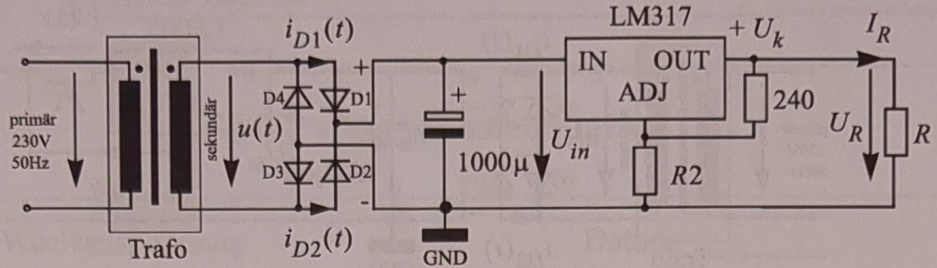


Bild 5.13 Linear geregelte Spannungsquelle

Dimensionieren Sie R_2 so, dass Sie eine Ausgangsspannung $U_R = 15.45\text{V}$ erhalten:

Berechnung:

$$U_R = 1.25\text{V} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{\text{adj}} R_2 = 1.25\text{V} + \frac{1.25\text{V}}{R_1} R_2 + I_{\text{adj}} R_2$$

$$\Rightarrow \frac{U_R - 1.25}{\frac{1.25}{R_1} + I_{\text{adj}}} = R_2 = 2700\Omega$$

$$R_2 = 2,7\text{k}\Omega$$

Bauen Sie die Schaltung auf und untersuchen Sie die Lastabhängigkeit und Welligkeit der Ausgangsspannung für $R = \{300, 100, 40\}\Omega$. Tragen Sie Ihre Messwerte in die Lösungstabelle ein.

Hinweis:

- Schalten Sie die Box bei 40Ω nur *kurz* (max 30s) während der Messung ein, da sonst die Überlastsicherung anspricht (U_R fallend).
- Messen die Eingangs-Welligkeit Δu_{in} der Reglereingangsspannung U_{in} im AC Mode auf CH1 des Oszilloskops und triggern Sie auf CH1
- Messen Sie die Ausgang-Welligkeit Δu von U_R im AC Mode auf CH2
- Zeitbasis: 2ms. Messen Sie zusätzlich U_R mit dem Multimeter

Wie erklären Sie sich das Verhalten bei $R = 40\Omega$?

Was sagt die relative Welligkeit aus?

Lösung:	$R/(\Omega)$	$\Delta u_{in}/(mV)$	$\Delta u/(mV)$	$U_R/(V)$	$I_R = U_R/R$	rel. Welligkeit / (%) $\Delta u / \Delta u_{in} \cdot 100\%$
	300	398	kaus der	15,42	51,4 mA	
	100	926	kaus der	15,42	154,22	
(200 50)=	40	1,660	1,610	14,25	356,25	36,99%

Erklärung R=40 Ohm:

Es wird zu viel Leistung getrieben, so dass der Glättkondensator schnell entladen wird und die Eingangsspannung unter die benötigte Spannung von 15,42V Dipout fällt.

rel. Welligkeit:

5.3.2 Aufgabe 8: Schaltungsvariation des LM317

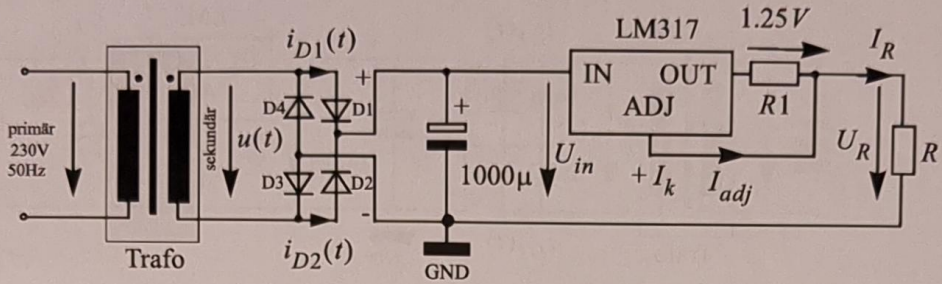


Bild 5.14 Variation einer geregelten Quelle

Bild 5.14 zeigt eine abgewandelte Beschaltung des Linearreglers LM317, die sich die Eigenschaft zu nutze macht, dass der Regler die Spannung zwischen dem OUT und ADJ Anschluss immer auf 1.25V ausregelt. Berechnen Sie den Strom $I_R = f(R1)$.

Um was für einen Schaltungstyp handelt es sich?

Berechnung: $I_R = \frac{1,25V}{R_1} = f(R_1)$

Schaltungstyp: Konstantstromquelle

Dimensionieren Sie R_1 so, dass $I_R = 83mA$. Untersuchen Sie die Lastabhängigkeit der Schaltung für $R = \{100, 200, 350\}\Omega$. Messen Sie dazu den Strom I_R mit dem Multimeter. Wie erklären Sie sich das Verhalten für $R = 350\Omega$.



Zum Schutz vor Überlastung schalten Sie die Box **nur** während der Messung kurz ein!

Lösung:

$R/(\Omega)$	$I_R/(mA)$	$U_R = R \cdot I_R$
100	83,5	8,35 V
200	83,5	16,7 V
350	69,5	24,325 V

$R_1 = 75,06\Omega$

Erklärung:

Um die 83mA über 350Ω + 75Ω fließen zu lassen werden 30,3V benötigt, was mehr ist als am Eingang des LM317 anliegt.