

Gleichrichterschaltungen



ABSTRACT. In diesem Experiment wurden verschiedene Gleichrichter untersucht. Zum Einsatz kamen genauer ein Einweg- und ein Zweiweggleichrichter, deren Verhalten jeweils mit und ohne Glättungskondensator beobachtet wurde. Durch Variation der Last konnte die Strom-Spannungs-Kennlinie aufgenommen werden, zudem wurden am Oszilloskop die Spannungsverläufe dargestellt. Schlussendlich konnten Werte für die Scheitelspannung berechnet werden.

Messwerte und Unsicherheiten sind im Anhang zu finden. Die Propagation von Messunsicherheiten wurde stets gemäß der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung berechnet.

I. PHYSIKALISCHER HINTERGRUND

In einem Gleichrichter wird Wechsel- in Gleichspannung umgewandelt. Realisiert wird das dadurch, dass der Widerstand des Bauteils abhängig von der Spannungspolarität ist, wodurch es eine Durchlass- und eine Sperrrichtung gibt.

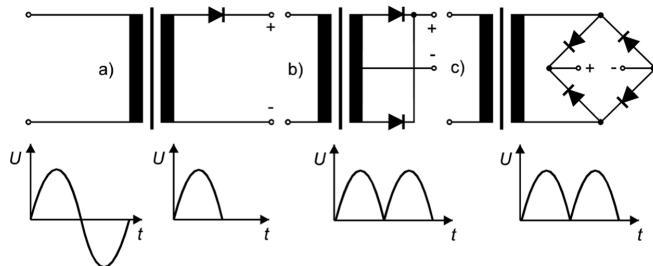


Abb. 1: Verschiedene Typen von Gleichrichterschaltungen auf Diodenbasis. Darunter der jeweilige Spannungsverlauf.

Meist wird die entsprechende Schaltung mit Dioden realisiert. Abhängig davon, ob nur eine der beiden Halbwellen oder beide ausgenutzt werden, spricht man von Einweg- bzw. Zweiweggleichrichtung. In Abb. 1 sind verschiedene Möglichkeiten für Gleichrichterschaltungen dargestellt. Bei b) und c) handelt es sich um Zweiweggleichrichtung, bei a) um Einweggleichrichtung.

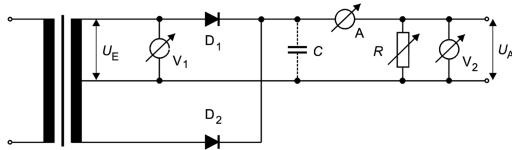


Abb. 2: Schaltplan der Versuchsanordnung [1]

Relevant für den Versuch ist die in Abb. 2 dargestellte Anordnung. Geht man von einer Eingangsspannung der Form $U_E = U_m \sin(\omega t)$ aus und bezeichnet mit R_D den Innenwiderstand der Diode, so fällt über dem Widerstand R die folgende Spannung U_A ab:

$$U_A(t) = I(t) \cdot R = \frac{U_m R}{R + R_D} |\sin \omega t| \quad (1)$$

Für die Messung der Spannungen werden sogenannte Drehspulinstrumente verwendet. Diese messen bei Eichung auf Gleichspannung den zeitlichen Mittelwert der anliegenden Spannung, bei Eichung auf Wechselspannung den Effektivwert derselben. Im Leerlauf, d.h. bei vernachlässigbarem Stromfluss, werden dann ohne Glättungskondensator folgende Werte gemessen:

$$\bar{U}_{A,\text{leer}} = \frac{2U_m}{\pi} \quad U_{A,\text{eff,leer}} = \begin{cases} \frac{U_m}{\sqrt{2}} & \text{Zweiweg} \\ \frac{U_m}{2\sqrt{2}} & \text{Einweg} \end{cases} \quad (2)$$

wobei U_m die Scheitelspannung bezeichnet. Im Falle eines dazugeschalteten Glättungskondensators gilt

$$\bar{U}_{A,\text{leer}} = U_{A,\text{eff,leer}} = U_m \quad (3)$$

II. VERSUCHSAUfBAU UND DURCHFÜHRUNG

Wie in Abb. 2 zu erkennen, wird der Versuch mit folgender Schaltung realisiert: Für die Gleichrichtung sind an die Anschlüsse des Transformators jeweils eine Diode D_1, D_2 geschaltet. Zwischen dem oberen Anschluss und der Mittelanzapfung sind Kondensator C und variabler Lastwiderstand R parallel geschaltet. Es wird die Spannung U_E vor Gleichrichtung mit dem Voltmeter V_1 und die Spannung U_A über dem Widerstand mit dem Voltmeter V_2 gemessen. Zudem wird mit dem Ampermeter A der Strom gemessen, der durch den Widerstand fließt.

Die abgebildete Schaltung ist im Zweiwegbetrieb aufgebaut. Durch Abtrennen der Diode D_2 wird ein Einwegbe-

trieb erreicht. Zudem kann der Kondensator wahlweise entfernt werden. Für eine Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Spannung ist es möglich, V2 durch ein Oszilloskop zu ersetzen.

Im ersten Versuchsteil werden vier Messreihen aufgenommen: Für Zweiweg- und Einweggleichrichtung mit und ohne Kondensator wird jeweils der zeitl. Mittelwert der Spannung U_A in Abhängigkeit des Stroms aufgezeichnet. Dazu wird der Widerstand R im Bereich von $100 \text{ k}\Omega \dots 1 \Omega$ variiert, wobei mit maximalem Widerstand (Leerlaufbetrieb, d.h. minimaler Strom) begonnen und bei minimalem Widerstand (d.h. minimale Spannung) geendet wird.

Für den zweiten Versuchsteil wird das Voltmeter V1 durch ein Oszilloskop ersetzt und für Zweiweg- und Einweggleichrichtung jeweils ohne Belastung (d.h. R maximal) und ohne Kondensator, ohne Belastung und mit Kondensator sowie mit Kondensator bei mittlerer Belastung (R angepasst, sodass der Entladungsvorgang des Kondensators sichtbar ist) der Spannungsverlauf aufgenommen.

Für den dritten Versuchsteil wird wieder das Voltmeter V1 verwendet und für Zweiweg- und Einweggleichrichtung jeweils die Spannung U_A im Gleichspannungsmodus (Mittelwert) und im Wechselspannungsmodus (Effektivwert) gemessen.

III. AUSWERTUNG

1. Versuchsteil 1

In Abb. 3 sind die vier Messreihen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die beiden Kennlinien ohne Glättungskondensator dem Modell eines linearen Zusammenhangs zwischen Strom und Spannung gemäß (1) genügen. Es wurde jeweils eine entsprechende lineare Regression durchgeführt, deren Ergebnisse im Diagramm verzeichnet sind. Der r^2 -Wert liegt dabei jeweils sehr nahe an 1, somit ist die Regression als sinnvoll zu bewerten und das Modell als bestätigt. Aus den Fitparametern lassen sich folgende Werte bestimmen:

Tab. 1: Aus linearer Regression bestimmte Werte ohne Glättungskondensator

Art d. Gleichchr.	$U_{A,\text{leer}}$ in V	R in Ω	I_{\max} in mA
Einweg	$2,638 \pm 0,027$	$42,0 \pm 0,5$	$62,8 \pm 0,9$
Zweiweg	$5,26 \pm 0,07$	$41,6 \pm 0,6$	$126,4 \pm 2,4$

Der Achsenabschnitt der Kennlinie ist die Leerlaufspannung, der Betrag des Steigungsparameters ist der Widerstand R . Als Nullstelle lässt sich außerdem der Kurzschlusstrom berechnen. Wie zu erwarten, liegt die Leerlaufspannung bei Zweiweggleichrichtung etwa doppelt so hoch wie bei Einweggleichrichtung. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei Einweggleichrichtung nur jede zweite Halbperiode zum zeitlichen Mittelwert beiträgt. Die Werte für den Widerstand sind miteinander konsistent.

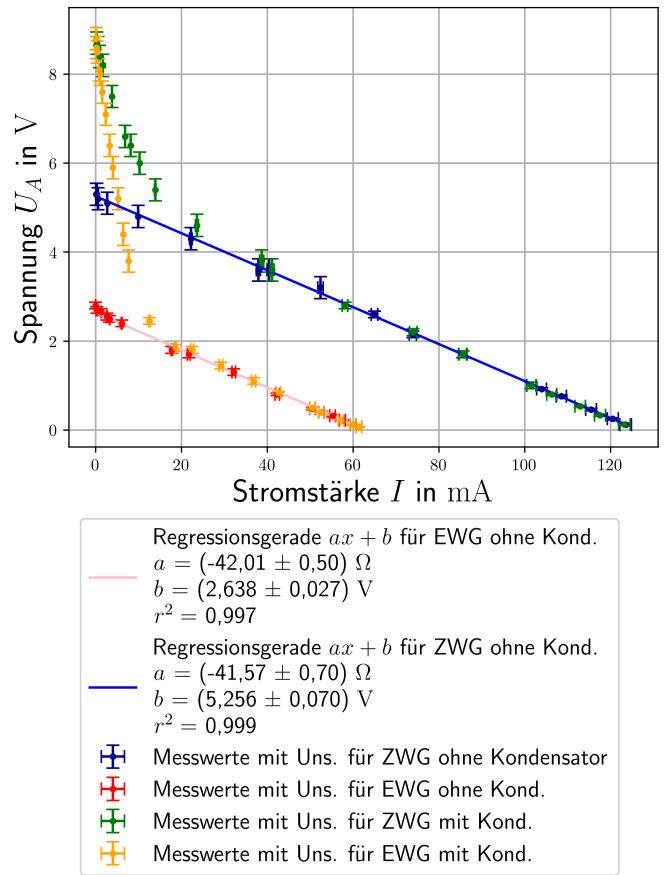


Abb. 3: Strom-Spannungs-Kennlinie für die ersten vier Messreihen. Messwerte für die Spannung U_A in Abhängigkeit des Stroms I mit Unsicherheiten. Für die Verläufe ohne Glättungskondensator zusätzlich Regressionsgerade gemäß (1).

Mit Kondensator ergibt sich ein leicht anderes Bild, im niedrigen Spannungsbereich beobachtet man statt einem linearen Verlauf einen exponentiellen Abfall, im höheren Spannungsbereich bis hin zum Kurzschluss hingegen gleicht sich die Kennlinie der jeweiligen Ungeglätteten an. Der Grund hierfür ist das Auf- und Entladen des Kondensators, dass bei niedrigeren Strömen länger andauert.

2. Versuchsteil 2

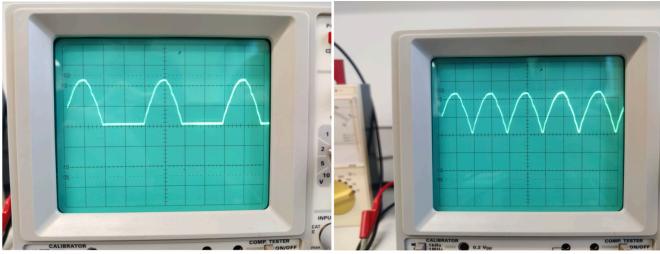


Abb. 4: Zeitl. Verlauf der Spannung am Oszilloskop (Ohne Kondensator, ohne Belastung, links Einweg-, rechts Zweiwegagleichrichtung)

In Abb. 4 ist zu erkennen, dass ohne den Glättungskondensator die Spannung (wie die Quellspannung) sinusförmig verläuft, wobei bei Einwegagleichrichtung jede zweite Halbperiode wegfällt, da durch die einzelne Diode nur in eine Richtung Strom fließen kann. Bei der Zweiwegagleichrichtung werden alle Halbperioden verwertet, und bei jeder zweiten wird das Vorzeichen geändert, sodass entsprechend der Erwartung durchgehend positive Spannung anliegt.

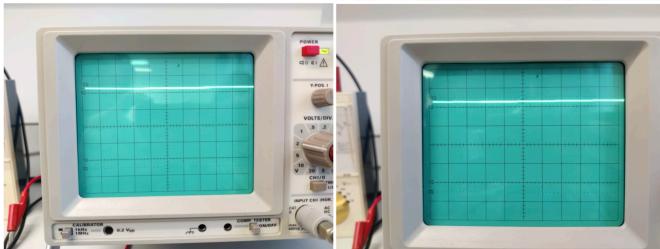


Abb. 5: Zeitl. Verlauf der Spannung am Oszilloskop (Mit Kondensator, ohne Belastung, links Einweg-, rechts Zweiwegagleichrichtung)

Mit angeschlossenem Kondensator, allerdings immernoch ohne Belastung, zeigt sich, wie in Abb. 5 zu sehen, ein annähernd konstanter Spannungsverlauf. Dies entspricht der Erwartung, da es ohne Belastung nicht zum Auf- bzw. Entladen des Kondensators kommt.

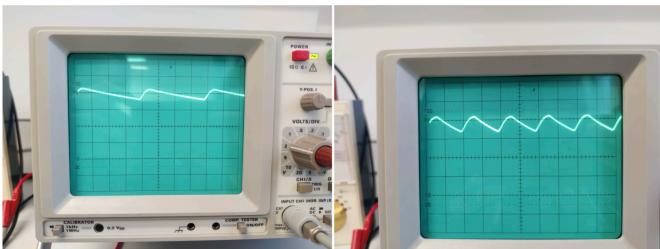


Abb. 6: Zeitl. Verlauf der Spannung am Oszilloskop (Mit Kondensator, mittlere Belastung, links Einweg-, rechts Zweiwegagleichrichtung)

Bei mittlerer Last ist in Abb. 6 zu erkennen, wie das Auf- bzw. Entladen des Kondensators in den Perioden den Spannungsverlauf glättet.

3. Versuchsteil 3

Mit den Werten für die Leerlaufspannung aus Tab. 7 kann je nach Eichung des Messgerätes gemäß (2) die Scheitelspannung berechnet werden. Gleichermaßen kann aus der mit V1 abgegriffenen Quellspannung U_E (Effektivwert) gemäß

$$U_m = \sqrt{2} U_E \quad (4)$$

die Scheitelspannung berechnet werden. Insgesamt führt das auf folgende Ergebnisse:

Tab. 2: Ergebnisse für die Scheitelspannung

Art d. Gleichr.	Art d. Berechnung/ Messung	U_m in V
Einweg	Eichung auf DC	$8,6 \pm 0,3$
	Eichung auf AC	$8,1 \pm 0,4$
Zweiweg	Eichung auf DC	$8,6 \pm 0,3$
	Eichung auf AC	$7,7 \pm 0,3$
Beide	Mittels V1 nach (4)	$9,1 \pm 0,4$

Alle diese Werte wurden für die Schaltung ohne Glättungskondensator aufgenommen. Sie sind innerhalb eines 2σ -Intervalls miteinander konsistent. Dies ist zu erwarten, da die Amplitude der Spannung nicht von der Art der Gleichrichtung abhängt.

Mit Kondensator kann die Scheitelspannung gemäß (3) unmittelbar aus Abb. 3 als Schnittpunkt der Kennlinie mit der y -Achse abgelesen werden. Der Vergleich des ersten Wertes für U_2 in Tab. 4 und Tab. 6 zeigt, dass sich die Scheitelspannungen auch dann bei Einweg- und Zweiwegagleichrichtung innerhalb der Unsicherheiten gleichen:

$$U_{m,\text{Kond.,EWG}} = U_{m,\text{Kond.,ZWG}} = (8,8 \pm 0,25) \text{ V} \quad (5)$$

Dieser Wert liegt, wie zu erwarten, im selben Bereich wie die Werte ohne Glättungskondensator, da dieser lediglich den zeitl. Verlauf der Spannung beeinflussen kann, nicht aber die Amplitude.

IV. DISKUSSION

Die verwendeten Modelle, darunter der lineare Zusammenhang zwischen Strom- und Spannung gemäß (1), mit Abweichung bei Verwendung eines Glättungskondensators, konnten durch die Messreihen aus Versuchsteil 1 bestätigt werden. Die linearen Regressionen ergaben dabei repräsentative Werte für die Kenngrößen des Schaltkreises. Diese Art des Mess- und Auswertungsvorgangs eignet sich für die Untersuchung solcher Gleichrichterschaltungen mit dem Ziel der Bestimmung jener Kenngrößen gut.

In Versuchsteil 2 konnte qualitativ die im Abschnitt I erklärte Funktion des Glättungskondensators sowie der Unterschied der zwei Gleichrichtungsmethoden sehr gut graphisch dargestellt werden.

In Versuchsteil 3 wurden die verschiedenen Eichungen von Drehspulmessgeräten anhand der sich dafür eignenden (weil konstanten) Scheitelspannung miteinander verglichen. Dass dabei konsistente Ergebnisse herauskamen, belegt die richtige Interpretation der jeweiligen Messungen am Voltmeter und dessen korrekte Eichung. Eine solche Messung kann zur Überprüfung letzterer zu Rate gezogen werden, auch wenn eine höhere Minimierung des statistischen Fehlers nötig wäre, um die Eichung exakt zu kontrollieren.

V. ANHANG

1. Unsicherheiten

Die Unsicherheit des gemessenen Stromes am Amperemeter beträgt laut Datenblatt 1% + 1 dig.

Die Unsicherheit der gemessenen Spannung am Voltmeter beträgt laut Datenblatt 0,025% des eingestellten Bereichs/Maximalwertes.

2. Messreihen

Tab. 3: Kennlinie Zweiweggleichrichtung ohne Kondensator

U1 (V)	U2 (V)	I (mA)	R (Ohm)	U1 (V)	U2 (V)	I (mA)	R (Ohm)
6,4	5,3	0,158	40000	6,4	2,6	65	40
6,4	5,3	0,178	34000	6,4	2,15	73,9	30
6,4	5,3	0,296	20000	6,4	1,7	85,5	20
6,4	5,2	0,568	10000	6,4	1	101,5	10
6,4	5,1	2,68	2000	6,4	0,92	103,9	9
6,4	4,8	9,92	500	6,4	0,76	108,5	7
6,4	4,3	22,2	200	6,4	0,46	115,4	4
6,4	3,6	37,9	100	6,4	0,25	120,5	2
6,4	3,6	40,4	90	6,4	0,12	123,5	1
6,4	3,2	52,4	60				

Tab. 4: Kennlinie Zweiweggleichrichtung mit Kondensator

U1 (V)	U2 (V)	I (mA)	R (Ohm)	U1 (V)	U2 (V)	I (mA)	R (Ohm)
6,4	8,8	0,119	100000	6,4	3,8	38,7	100
6,4	8,7	0,257	50000	6,4	3,6	41,1	90
6,4	8,6	0,567	20000	6,4	2,8	58,1	50
6,4	8,4	0,884	10000	6,4	2,2	74	30
6,4	8,2	1,68	5000	6,4	1,7	85,6	20
6,4	7,5	3,84	2000	6,4	1	101,6	10
6,4	6,6	6,84	1000	6,4	0,8	106,3	8
6,4	6,4	8,18	800	6,4	0,53	112,9	5
6,4	6	10,23	600	6,4	0,33	117,5	3
6,4	5,4	13,88	400	6,4	0,125	123,2	1
6,4	4,6	23,6	200				

Tab. 5: Kennlinie Einweggleichrichtung ohne Kondensator

U1 (V)	U2 (V)	I (mA)	R (Ohm)	U1 (V)	U2 (V)	I (mA)	R (Ohm)
6,4	2,8	0,037	100000	6,4	1,3	32,2	40
6,4	2,7	0,305	10000	6,4	0,8	42,3	30
6,4	2,65	1,318	2000	6,4	0,48	50,5	10
6,4	2,55	2,64	1000	6,4	0,4	52,6	8
6,4	2,5	3,25	800	6,4	0,32	55,2	6
6,4	2,4	6,06	400	6,4	0,22	57,5	4
6,4	1,8	17,76	100	6,4	0,12	60	2
6,4	1,7	21,7	80	6,4	0,07	61,3	1

Tab. 6: Kennlinie Einweggleichrichtung mit Kondensator

U1 (V)	U2 (V)	I (mA)	R (Ohm)	U1 (V)	U2 (V)	I (mA)	R (Ohm)
6,4	8,8	0,118	100000	6,4	2,45	12,51	200
6,4	8,6	0,205	50000	6,4	1,85	18,59	100
6,4	8,5	0,373	25000	6,4	1,8	22,5	80
6,4	8,1	0,845	10000	6,4	1,45	29,2	50
6,4	8	1,028	8000	6,4	1,1	36,8	30
6,4	7,6	1,548	5000	6,4	0,84	42,6	20
6,4	7,1	2,39	3000	6,4	0,5	50,5	10
6,4	6,4	3,26	2000	6,4	0,4	52,5	8
6,4	5,9	4	1500	6,4	0,22	57,2	4
6,4	5,2	5,23	1000	6,4	0,12	59,9	2
6,4	4,4	6,43	700	6,4	0,07	61,3	1
6,4	3,8	7,7	500				

Tab. 7: Bestimmung der Spannungen im Leerlauf

Art der Gleichrichtung	Eichung des Voltmeters	U in V
Zweiweg	Gleichspannung	5,5
Zweiweg	Wechselspannung	5,7
Einweg	Gleichspannung	2,75
Einweg	Wechselspannung	2,7

QUELLENVERZEICHNIS

- [1] D. Kohlberger *et al.*, "Versuchsanleitung "E5 Gleichrichterschaltungen", *Humboldt-Universität zu Berlin*, 2024.