



GRUNDPRAKTIKUM

---

## E5: Gleichrichterschaltungen

---

*Autor:*

■■■■■■■■■■

*Partner:*

■■■■■■■■■■

Versuchsdatum: ■■■■■■■■■■

Versuchsplatz: ■■■■■■■■■■

Abgabedatum: ■■■■■■■■■■

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Physikalische Grundlagen und Aufgabenstellung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Bestimmung der Eingangsspannung</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Strom-Spannungs-Kennlinien von Gleichrichterschaltungen</b>	<b>3</b>
3.1	Schaltungen ohne Kondensator . . . . .	3
3.2	Schaltungen mit Kondensator . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Spannungsverläufe in Gleichrichterschaltungen</b>	<b>6</b>
4.1	Einwegschaltungen . . . . .	6
4.2	Zweiwegschaltungen . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Bestimmung der Ausgangsspannung</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Fehleranalyse und kritische Ergebniseinschätzung</b>	<b>11</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>12</b>

# 1 Physikalische Grundlagen und Aufgabenstellung

Der Versuch E5: Gleichrichterschaltungen erlaubt es, die grundlegende Funktionsweise von Gleichrichtern zu verstehen, einem elektronischen Bauteil mit sehr breitem Anwendungsspektrum. Gleichzeitig regt die Anordnung des Experiments dazu an, die Funktionsweise von Spannungs- und Strommessgeräten näher zu untersuchen, sowie die Vor- und Nachteile unterschiedlich realisierter Gleichrichterschaltungen abzuwägen.

Eine detaillierte Darstellung der physikalischen Grundlagen und der Aufgabenstellungen in diesem Versuch befinden sich in [2, S. 22-27]. Der Versuch wurde, soweit nicht anders notiert, gemäß der Anleitung durchgeführt, die im Skript enthaltenen Informationen sollen deshalb hier nicht wiederholt werden.

## 2 Bestimmung der Eingangsspannung

Zuerst wurde die Eingangsspannung  $U_{eff}^{ein}$  gemessen. Eine Überprüfung ergab, dass die ober- und unterhalb des Mittelabgriff anliegende Spannung  $U^{(o)}$  bzw.  $U^{(u)}$  leicht variiert, der Mittelabgriff am Transformator also nicht völlig fehlerfrei ist. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten wurde deswegen im weiteren Verlauf ausschließlich der obere Abgriff zur Realisierung des Einweggleichrichters verwendet.

Einzige Fehlerquelle in dieser Messung war das Voltmeter. Im verwendeten Messbereich von 10 V liegt der systematische Fehler von 2,5% des Messbereichswerts (MBE) bei 0,25 V, die Ablesegenauigkeit wurde auf einen halben Skalenteil, d.h. 0,1 V geschätzt. Eine pythagoräische Addition der unkorrelierten Fehler liefert  $u_{U_E} = 0,3 \text{ V}$ .

Hier lag am Voltmeter Wechselspannung an, aus dem am Gerät abgelesenen Wert muss also die Scheitelspannung mit  $U_m = \sqrt{2} \cdot U_{eff}$  errechnet werden, entsprechend wird auch der Fehler  $u_{U_m}$  angepasst.

$$U_{eff}^{(o)} = (7,2 \pm 0,3) \text{ V} \Rightarrow U_m^{(o)} = (10,2 \pm 0,4) \text{ V}$$

$$U_{eff}^{(u)} = (7,3 \pm 0,3) \text{ V} \Rightarrow U_m^{(u)} = (10,3 \pm 0,4) \text{ V}$$

Da sich die Unsicherheitsbereiche überlappen kann aus den Einzelwerten vom oberen und unteren Abgriff schließlich noch nach Formeln (55) bis (57) in [1, S. 47] ein gewichtetes Mittel gebildet werden. Der Scheitelwert der Eingangsspannung lautet also:

$$U_m^{ein} = (10,3 \pm 0,4) \text{ V}$$

### 3 Strom-Spannungs-Kennlinien von Gleichrichterschaltungen

Gemäß der Versuchsbeschreibung wurden die Kennlinien der Einweg- und Zweiweggleichrichterschaltungen einmal mit und einmal ohne Glättungskondensator mit  $C = 10 \text{ nF}$  aufgenommen.

#### 3.1 Schaltungen ohne Kondensator

Im Fall der Zweiwegschaltung ohne Kondensator ergibt sich nach Gleichung (5.6) in [2, S. 24] bzw. dem Ohmschen Gesetz ein linearer Zusammenhang zwischen dem Strom  $I$  und der gemessenen Ausgangsspannung  $U_A$  (analoge Gleichungen lassen sich auch für die Einwegschaltung aufstellen). Eine lineare Regression ergibt einen erwarteten Ordinatenabschnitt: dieser ist proportional zum Maximalwert der zeitlich gemittelten Spannung. Durch die Regression wird es also prinzipiell möglich, die Leerlaufspannung der Gleichrichterschaltung selbst dann zu bestimmen, wenn die Schaltung nicht - wie im nächsten Abschnitt - zur Messung gänzlich ohne Lastwiderstand betrieben werden kann.

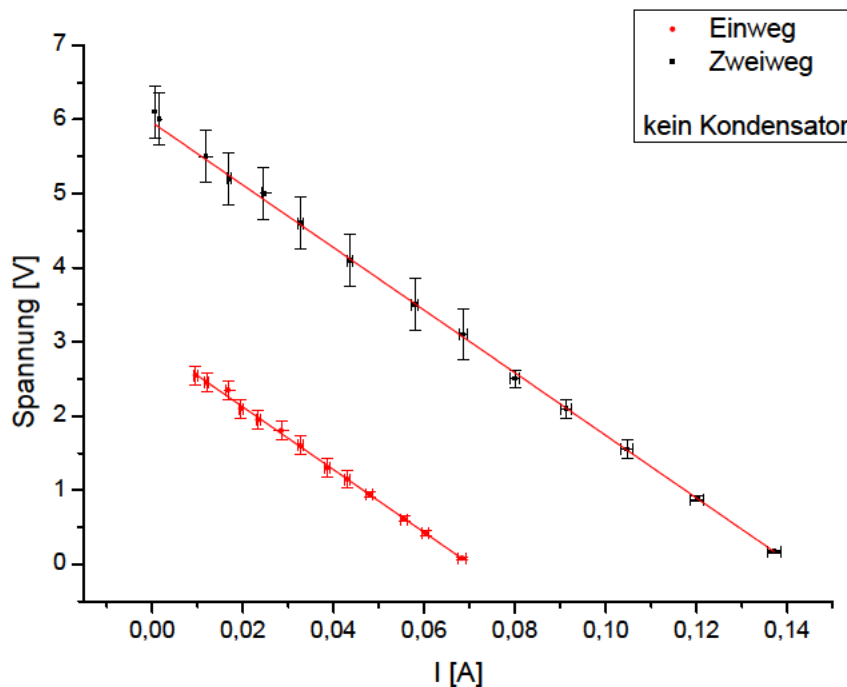


Abbildung 1: Lineare Regressionen der Kennlinien ohne Kondensator

Um die lineare Regression durchzuführen wurden zunächst die Fehler  $u_I$  und  $u_U$  berechnet. Mögliche Fehlerquellen waren hier sowohl das Volt- als auch das Ampèremeter. Für das Voltmeter wurde die Unsicherheit wie oben beschrieben bestimmt, wobei

die MBE zwischen 0,3V und 10V lagen, mit Skalenteilen zwischen 0,02 V und 0,2 V. Folglich schwanken also sowohl der systematische Fehler als auch der statistische Fehler der Messwerte signifikant (siehe Tabellen im Anhang) und eine Gewichtung der y-Werte in der linearen Regression mit dem durch pythagoräische Addition ermittelten Gesamtfehler wird notwendig.

Das verwendete Ampèremeter war ein Digitalmessgerät mit einer angegebenen Unsicherheit von 1 % vom MBE plus 1dgt im verwendeten Betriebsmodus *Gleichspannung* und für Spannungen zwischen 0 und 200 mA. Der angezeigte Wert für den Strom  $I$  schwankte allerdings stark. Es wurde deswegen als Messwert der Mittelwert vermerkt, und die Schwankungen wie folgt abgeschätzt: für Ströme bis 2 mA wird eine zusätzliche statistische Unsicherheit von 4dgt angenommen, bis 20 mA zusätzlich 2dgt und bis 200 mA zusätzlich 1dgt. Damit lag die statistische Unsicherheit der Strommessungen zwischen 0,2 mA und 0,3 mA, und der systematische Fehler zwischen 0,7 mA und 1,4 mA (siehe Tabellen im Anhang). Die Gesamtunsicherheiten, errechnet durch pythagoräische Addition, sind trotz der konservativen Abschätzung klein im Vergleich zu den Messwerten, bei der Regression wurden die x-Werte deshalb als fehlerfrei angenommen.

Die Regressionen wurden mit Hilfe von *OriginPro 8.6* und dem angenommenen funktionalen Zusammenhang  $y = a + b \cdot x$  durchgeführt. Die Gewichtung fand mit der Methode *Instrumental* statt, die genauen Regressionsergebnisse lauten wie folgt:

Tabelle 1: Regressionsergebnisse der Schaltungen ohne Kondensator

Einweg				
Adj. R-Square	0,99956			
		Value	Standard Error	
U [V]	Intercept	2,97035	0,01613	
U [V]	Slope	-42,32505	0,25519	
Zweiweg				
Adj. R-Square	0,99961			
		Value	Standard Error	
U [V]	Intercept	5,95988	0,03084	
U [V]	Slope	-42,20858	0,23045	

Wie zu erwarten ist der Ordinatenabschnitt für die Zweiwegschaltung mit  $b_Z = 2/\pi U_m = (6,0 \pm 0,1) V$  etwa doppelt so groß wie der Abschnitt in der Einwegschaltung  $b_E = 1/\pi U_m = (3,0 \pm 0,1) V$ . In der Zweiwegschaltung werden beide Spannungsbäuche der sinusförmigen Eingangsspannung genutzt, während die (kostengünstigere) Einwegschaltung nur einen Spannungsbauch verwertet, effektiv also nur mit der halben Spannung arbeiten kann. Von beiden Werten kann ein gewichtetes Mittel gebildet werden, die lineare Regression erlaubt es also, den Scheitelwert der Ausgangsspannung zu bestimmen, unter Beachtung der Betriebsart des Voltmeters und der damit gegebenen Umrechnung von zeitlichen Mittel- auf Scheitelwerte:

$$U_m^{reg} = (9,3 \pm 0,1) \text{ V}$$

### 3.2 Schaltungen mit Kondensator

Sobald ein Glättungskondensator in die Schaltung eingeführt wird, verschwindet der lineare Verlauf der Strom-Spannungs-Abhängigkeit der Schaltung, und die entstehende Kurve wird komplizierter, wie Abbildung 2 zeigt. Deswegen sollen die dabei auftretenden Vorgänge hier nur qualitativ diskutiert werden.

Im Bereich eines fast verschwindenden Laststromes  $I$  lädt sich der Kondensator in beiden Schaltungstypen auf den Wert der Eingangsspannung auf, da quasi keine Ladungen von ihm abgezogen werden. Beide Graphen starten also etwa bei  $U^{ein}$  für sehr geringe Lastströme. Wenn  $I$  ansteigt wird der Kondensator gleichzeitig ge- und entladen, und ein Glättungseffekt tritt auf, der unten bei der Diskussion der Spannungsverläufe noch näher diskutiert werden soll. Wenn der Laststrom eine gewisse Stärke erreicht hat verschwindet die Wirkung des Kondensators: er entlädt sich deutlich schneller, als geladen werden kann, und die Schaltung verhält sich, als wäre kein Kondensator installiert. Die Kennlinie nähert sich dem aus Abbildung 1 bekannten Bild an und wird also linear für große Ströme.

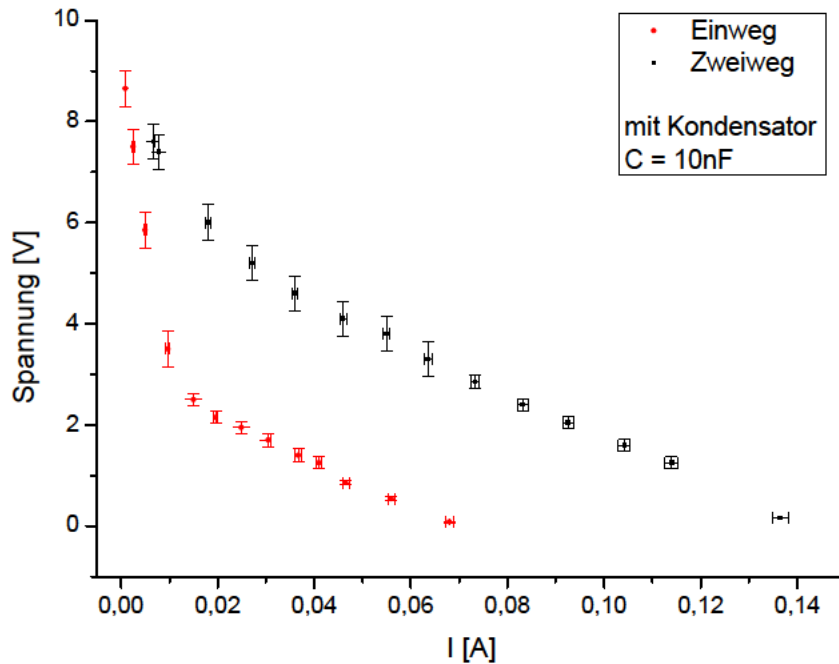


Abbildung 2: Schaltungskennlinien mit  $C = 10 \text{ nF}$

## 4 Spannungsverläufe in Gleichrichterschaltungen

Auf dem Oszilloskop konnte ein qualitativer Eindruck des zeitlichen Verlaufes der Spannung in den Gleichrichterschaltungen gewonnen werden. Dabei hängt die genaue Form der Kurve davon ab, ob ein Glättungskondensator verwendet wurde, und ob die Schaltung unter Last lief.

### 4.1 Einwegschaltungen

Die Abbildung 3 zeigt die drei Spannungsverläufe in der Einwegschaltung. Der rote Verlauf zeigt die Schaltung ohne Belastung und ohne Glättungskondensator. Die Einweggleichrichterschaltung schneidet hier lediglich den negativen Bauch der anliegenden Sinusspannung ab, die Ausgangsspannung ähnelt also der Eingangsspannung, zeigt aber nur die positiven Spannungsbäuche.

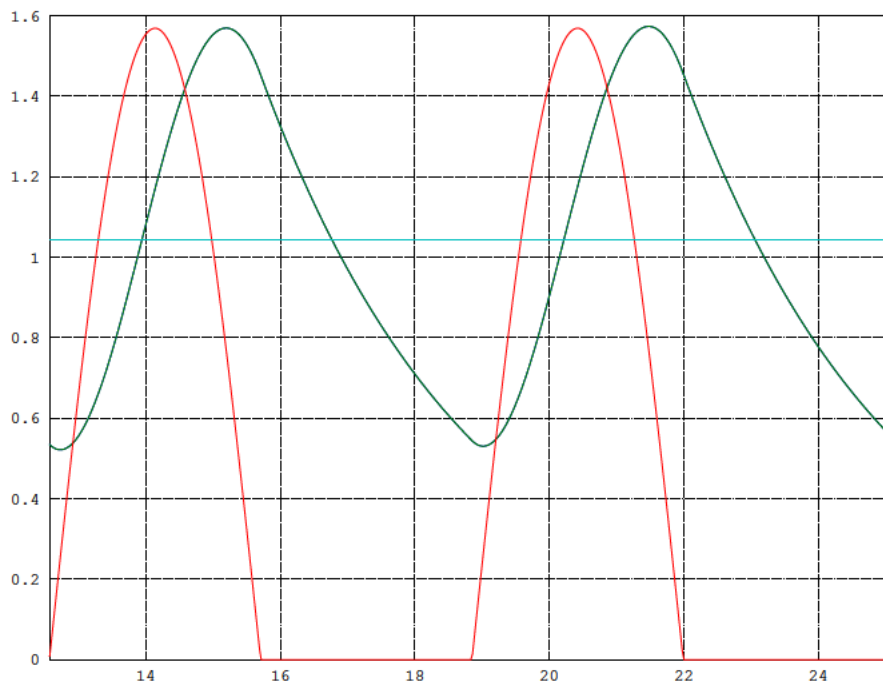


Abbildung 3: Zeitlicher Spannungsverlauf, Einwegschaltung

Die zweite, türkise Kurve zeigt eine Schaltung, in die ein zusätzlicher Kondensator eingebaut wurde. Der Kondensator lädt sich einmalig auf (hier nicht dargestellt) und bleibt dann geladen, da kein Lastwiderstand geschaltet ist. Die gemessene Ausgangsspannung entspricht jetzt konstant dem Scheitelwert der Eingangsspannung, zumindest solange der Innenwiderstand des Messgerätes sehr groß gegen den Schaltungswiderstand ist. Dieser Fall lag während des Versuchs vor, denn der Innenwiderstand des Voltmeters ist mit  $\approx 30 \text{ k}\Omega$  im DC-Betrieb deutlich höher als der Widerstand der Schaltung, selbst wenn die Schutzwiderstände vor den Dioden von  $\approx 38 \text{ }\Omega$  eingerechnet werden.

Schaltet man jetzt eine Last zu (blaue Kurve), tritt der Glättungseffekt des Kondensators zu Tage. Zuerst fällt auf, dass die Ausgangsspannung zeitlich verzögert ansteigt, in dieser Phase wird der Kondensator aufgeladen und nur ein Teil der Eingangsspannung liegt am Ausgang an. Nun wird der Glättungseffekt sichtbar: selbst wenn die Eingangsspannung negativ ist, also von der Diode nicht durchgelassen wird (in der Schaltung ohne Kondensator wäre die Ausgangsspannung jetzt Null), verschwindet die Ausgangsspannung nicht, denn sie wird durch den sich entladenden Kondensator gespeist. Der so entladene Kondensator muss während der nächsten Periode wieder aufgeladen werden, usw.

## 4.2 Zweiwegschaltungen

Betrachtet wird nun die Zweiwegschaltung in Abbildung 4. Ohne Last und ohne Kondensator (rote Kurve) zeigt sich, dass die Schaltung beide Bäuche der am Eingang anliegenden Sinusspannung verwerten kann: es entsteht eine Ausgangsspannung, die dem Betrag einer Sinusfunktion ähnelt, also permanent positiv ist. Im Vergleich mit Abbildung 3 wird der große Vorteil der Zweiwegschaltung deutlich: die volle Eingangsspannung kann genutzt werden.

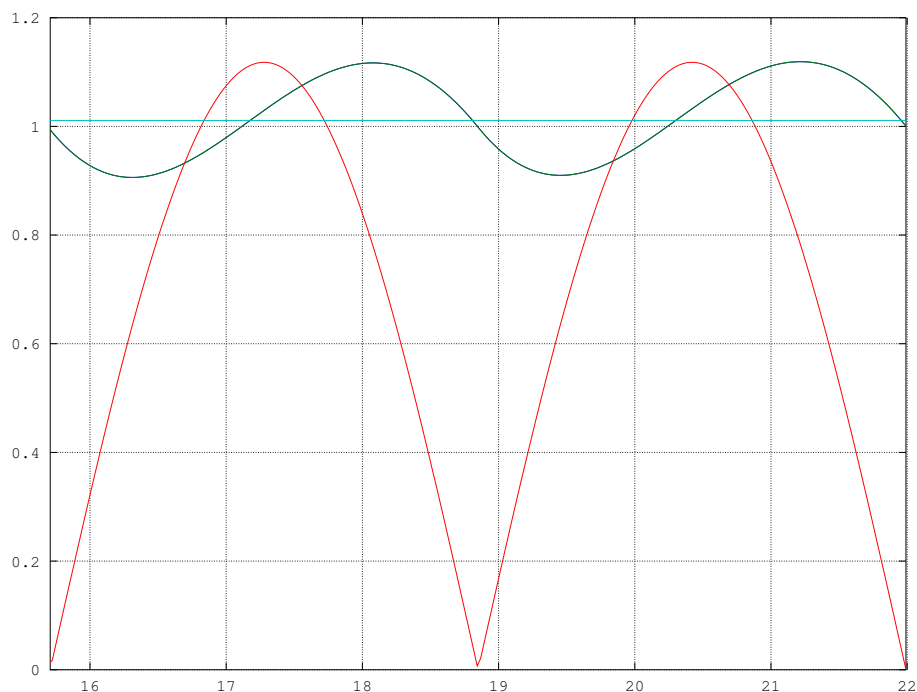


Abbildung 4: Zeitlicher Spannungsverlauf, Zweiwegschaltung

Wird ein Kondensator in die Schaltung eingefügt, verändert sich das Bild wie schon in der Einwegschaltung. Dies wird durch die türkise Kurve symbolisiert.

Die dritte, blaue Kurve, zeigt wiederum den Fall der Schaltung mit Kondensator und Lastwiderstand: qualitativ gleicht die Kurve der oben beschriebenen. Da



in dieser Schaltung beide Spannungsbäuche der Eingangsspannung genutzt werden können, gibt es auch doppelt so viele Lade- und Entladevorgänge pro Periode. Anschaulich wird deutlich, dass die Glättung hier noch besser funktioniert, da die Restschwankung der Ausgangsspannung deutlich kleiner ist als noch in der Einwegschaltung.

## 5 Bestimmung der Ausgangsspannung

Die oben diskutierten unterschiedlichen Konfigurationen des Systems erlauben es, den Scheitelwert der Ausgangsspannung hinter dem Gleichrichter auf verschiedene Arten zu bestimmen. Dabei muss jeweils die Betriebsart des Spannungsmessgerätes sowie die verwendete Gleichrichterschaltung (Einweg- bzw. Zweiweggleichrichter) beachtet werden. Die Messungen wurden ohne Belastungswiderstand, und wechselnd mit und ohne Glättungskondensator durchgeführt.

Einzige Fehlerquelle bei diesen Messungen war das Voltmeter, dessen Unsicherheit wie oben beschrieben bestimmt wurde. Dabei ist zu beachten, dass für die Messungen ohne Glättungskondensator die Skala auf 10 V, für die Messungen mit Kondensator aber auf 30 V eingestellt wurde. Die Unsicherheit der Spannungsmessung selbst betrug also  $u_U = 0,3 \text{ V}$  im ersten und  $0,8 \text{ V}$  im zweiten Fall. Um die Unsicherheiten der errechneten Scheitelwerte zu bestimmen mussten diese Fehler dann mit einem bestimmten Faktor multipliziert werden.

Die Ergebnisse der Messungen in verschiedenen Schaltungskonfigurationen sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Der Eintrag in der Spalte *Schaltung* beschreibt den verwendeten Gleichrichter (Einweg- bzw. Zweiwegschaltung) sowie, wo vorhanden, die Kapazität des Glättungskondensators  $C$ . Wenn das Voltmeter im Betriebsmodus *Wechselspannung* betrieben wurde, war der gemessene Wert ein Effektivwert, im Modus *Gleichspannung* wurde hingegen ein Mittelwert abgelesen: die entsprechenden Beziehungen von Messwert und Scheitelwert sind in der so benannten Spalte noch einmal dargestellt und ergeben dann auch den Vorfaktor für die Berechnung von  $u_{U_m}$ :

Tabelle 2: Bestimmung der Scheitelspannung

Schaltung	Messung	$U$ [V]	$u_U$	Beziehung	$U_m$ [V]	$u_{U_m}$
Einweg, ohne C	$\bar{U}$	3,1	0,3	$U_m = \pi \cdot \bar{U}$	9,7	0,8
Einweg, ohne C	$1/2 U_{eff}$	3,3	0,3	$U_m = 2\sqrt{2} \cdot U_{eff}$	9,3	0,8
Zweiweg, ohne C	$\bar{U}$	6,3	0,3	$U_m = 1/2 \pi \cdot \bar{U}$	9,9	0,4
Zweiweg, ohne C	$U_{eff}$	6,7	0,3	$U_m = \sqrt{2} \cdot U_{eff}$	9,5	0,4
Einweg, 4 nF	$\bar{U}$	10,0	0,8	$U_m = \bar{U}$	10,0	0,8
Einweg, 10 nF	$\bar{U}$	10,0	0,8	$U_m = \bar{U}$	10,0	0,8
Zweiweg, 4 nF	$\bar{U}$	10,0	0,8	$U_m = \bar{U}$	10,0	0,8
Zweiweg, 10 nF	$\bar{U}$	10,0	0,8	$U_m = \bar{U}$	10,0	0,8

Die hier gefundenen Werte können nun mit dem eingangs bestimmten  $U_m^{ein} = (10,3 \pm 0,4) \text{ V}$ , das vor der Gleichrichterschaltung abgegriffen wurde, verglichen werden.

Dieser Wert liegt geringfügig höher als die später bestimmten Werte, vermutlich, da die Messung hier noch vor den Dioden und ihren Schutzwiderständen durchgeführt wurde. Von praktischem Interesse ist aber natürlich in erster Linie die nach der Gleichrichterschaltung ausgegebene Spannung. Weiterhin fällt auf, dass die Wahl zwischen den beiden Glättungskondensatoren für die ausgegebene Scheitelspannung in dieser Schaltung keine signifikante Auswirkung hat.

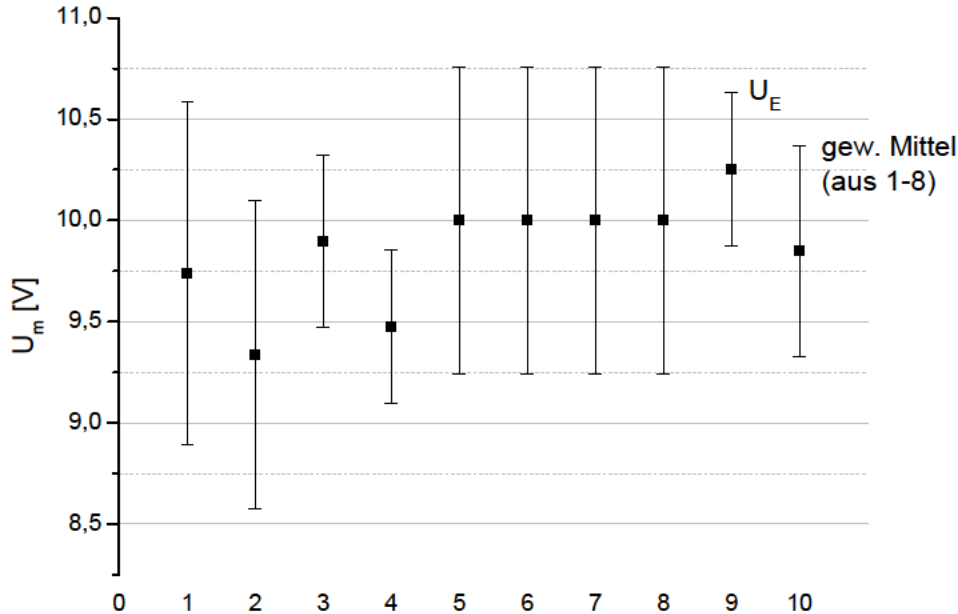


Abbildung 5: Bestimmung des gewichteten Mittelwertes für  $U_m^{aus}$

Alle Werte überlappen sich in ihren Unsicherheiten, somit kann ein gewichteter Mittelwert für  $U_m^{aus}$  aus den so ermittelten Werten (exklusive  $U_m^{ein}$ ) gebildet werden:

$$U_m^{aus} = (9,8 \pm 0,5) \text{ V}$$

## 6 Fehleranalyse und kritische Ergebniseinschätzung

Da der Versuch in erster Linie dazu dient, die Wirkungsweise von Gleichrichterschaltungen qualitativ zu verstehen, fungieren die quantitativen Ergebnisse vor allem als Bestätigung der theoretischen Voraussagen. Dies ist im Rahmen des Experiments gelungen: die erhaltenen Ergebnisse sind in sich konsistent und entsprechen den Erwartungen. Alle Fehlerintervalle überlappen sich, Abweichungen konnten wo nötig physikalisch begründet werden.

Potentielle Fehlerquellen beim Versuchsaufbau waren zuerst die Messgeräte, deren Unsicherheiten oben bereits ausführlich erläutert wurden. Darüber hinaus wurde gemäß der Abbildung 5.2 in [2, S. 24] spannungs- und nicht stromrichtig gemessen, d.h. die Unsicherheit des Laststroms wurde unterschätzt, um eine genauere Bestimmung der Spannungen zu ermöglichen. Eine weitere Fehlerquelle, die eingangs diskutiert wurde, war der Mittelabgriff auf dem Transformator: um problematische Ergebnisse zu vermeiden wurde nur der obere Spannungsabgriff für die Einwegschtaltung genutzt. Im Falle der Zweiwegschtaltung kann die Auswirkung auf das Endergebnis als gering angenommen werden.

## Literatur

- [1] Müller, U. *Einführung in die Messung, Auswertung und Darstellung experimenteller Ergebnisse in der Physik*. 2007.
- [2] Müller, U. *Physikalisches Grundpraktikum. Elektrodynamik und Optik*. 2010.

## A Anhang

Aus Übersichtsgründen sind im Folgenden nur die statistischen Unsicherheiten, nicht aber die systematischen angegeben, da sich diese aus dem angegebenen MBE leicht wie oben beschrieben berechnen lassen.

Tabelle 3: Einwegschaltung ohne Kondensator

$I$ [A]	$MBE$ [A]	$u_I^{stat}$	$u_I$	$U$ [V]	$MBE$ [V]	$u_U^{stat}$	$u_U$
6,8E-02	2,0E-01	2,0E-04	8,8E-04	8,0E-02	3,0E-01	5,0E-03	1,3E-02
6,0E-02	2,0E-01	2,0E-04	8,0E-04	4,2E-01	1,0E+00	1,0E-02	3,5E-02
4,8E-02	2,0E-01	2,0E-04	6,8E-04	9,4E-01	1,0E+00	1,0E-02	3,5E-02
4,3E-02	2,0E-01	2,0E-04	6,3E-04	1,2E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
3,9E-02	2,0E-01	2,0E-04	5,9E-04	1,3E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
2,9E-02	2,0E-01	2,0E-04	4,9E-04	1,8E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
2,3E-02	2,0E-01	2,0E-04	4,3E-04	2,0E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
2,0E-02	2,0E-01	2,0E-04	4,0E-04	2,1E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
1,7E-02	2,0E-02	3,0E-04	4,7E-04	2,4E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
1,2E-02	2,0E-02	3,0E-04	4,2E-04	2,5E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
9,6E-03	2,0E-02	3,0E-04	4,0E-04	2,6E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
3,3E-02	2,0E-01	2,0E-04	5,3E-04	1,6E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
5,6E-02	2,0E-01	2,0E-04	7,6E-04	6,1E-01	1,0E+00	1,0E-02	3,5E-02

Tabelle 4: Zweiwegschaltung ohne Kondensator

$I$ [A]	$MBE$ [A]	$u_I^{stat}$	$u_I$	$U$ [V]	$MBE$ [V]	$u_U^{stat}$	$u_U$
1,4E-01	2,0E-01	2,0E-04	1,6E-03	1,7E-01	3,0E-01	5,0E-03	1,3E-02
1,2E-01	2,0E-01	2,0E-04	1,4E-03	8,8E-01	1,0E+00	1,0E-02	3,5E-02
1,0E-01	2,0E-01	2,0E-04	1,2E-03	1,6E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
9,1E-02	2,0E-01	2,0E-04	1,1E-03	2,1E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
8,0E-02	2,0E-01	2,0E-04	1,0E-03	2,5E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
6,9E-02	2,0E-01	2,0E-04	8,9E-04	3,1E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
5,8E-02	2,0E-01	2,0E-04	7,8E-04	3,5E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
4,4E-02	2,0E-01	2,0E-04	6,4E-04	4,1E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
3,3E-02	2,0E-01	2,0E-04	5,3E-04	4,6E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
2,5E-02	2,0E-01	2,0E-04	4,5E-04	5,0E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
1,7E-02	2,0E-02	3,0E-04	4,7E-04	5,2E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
1,2E-02	2,0E-02	3,0E-04	4,2E-04	5,5E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
1,6E-03	2,0E-03	5,0E-05	6,6E-05	6,0E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
6,0E-04	2,0E-03	5,0E-05	5,6E-05	6,1E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01

Tabelle 5: Einwegschtaltung mit  $C = 10 \text{ nF}$ 

$I \text{ [A]}$	$MBE \text{ [A]}$	$u_I^{stat}$	$u_I$	$U \text{ [V]}$	$MBE \text{ [V]}$	$u_U^{stat}$	$u_U$
6,8E-02	2,0E-01	2,0E-04	8,8E-04	8,0E-02	3,0E-01	5,0E-03	1,3E-02
5,6E-02	2,0E-01	2,0E-04	7,6E-04	5,4E-01	1,0E+00	1,0E-02	3,5E-02
4,7E-02	2,0E-01	2,0E-04	6,7E-04	8,6E-01	1,0E+00	1,0E-02	3,5E-02
4,1E-02	2,0E-01	2,0E-04	6,1E-04	1,3E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
3,7E-02	2,0E-01	2,0E-04	5,7E-04	1,4E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
3,1E-02	2,0E-01	2,0E-04	5,1E-04	1,7E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
2,5E-02	2,0E-01	2,0E-04	4,5E-04	2,0E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
2,0E-02	2,0E-01	2,0E-04	4,0E-04	2,2E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
1,5E-02	2,0E-02	3,0E-04	4,5E-04	2,5E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
9,7E-03	2,0E-02	3,0E-04	4,0E-04	3,5E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
5,0E-03	2,0E-02	3,0E-04	3,5E-04	5,9E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
2,5E-03	2,0E-02	3,0E-04	3,3E-04	7,5E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
9,0E-04	2,0E-03	5,0E-05	5,9E-05	8,7E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01

Tabelle 6: Zweiwegschtaltung mit  $C = 10 \text{ nF}$ 

$I \text{ [A]}$	$MBE \text{ [A]}$	$u_I^{stat}$	$u_I$	$U \text{ [V]}$	$MBE \text{ [V]}$	$u_U^{stat}$	$u_U$
1,4E-01	2,0E-01	2,0E-04	1,6E-03	1,6E-01	3,0E-01	5,0E-03	1,3E-02
1,1E-01	2,0E-01	2,0E-04	1,3E-03	1,3E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
1,0E-01	2,0E-01	2,0E-04	1,2E-03	1,6E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
9,3E-02	2,0E-01	2,0E-04	1,1E-03	2,1E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
8,3E-02	2,0E-01	2,0E-04	1,0E-03	2,4E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
7,3E-02	2,0E-01	2,0E-04	9,3E-04	2,9E+00	3,0E+00	5,0E-02	1,3E-01
6,4E-02	2,0E-01	2,0E-04	8,4E-04	3,3E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
5,5E-02	2,0E-01	2,0E-04	7,5E-04	3,8E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
4,6E-02	2,0E-01	2,0E-04	6,6E-04	4,1E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
3,6E-02	2,0E-01	2,0E-04	5,6E-04	4,6E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
2,7E-02	2,0E-01	2,0E-04	4,7E-04	5,2E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
1,8E-02	2,0E-02	3,0E-04	4,8E-04	6,0E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
6,7E-03	2,0E-02	3,0E-04	3,7E-04	7,6E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01
7,8E-03	2,0E-02	3,0E-04	3,8E-04	7,4E+00	1,0E+01	1,0E-01	3,5E-01