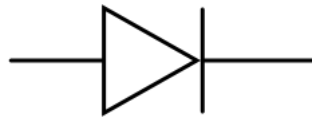




**BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL**

**EP-b: EP2  
Die Diode**  
8. März 2021

**Alexander Adam   Friedrich Jahns**  
1946255                      1960002



## Zielsetzung des Versuchs

In dieser Versuchsreihe werden die Grundlegenden Eigenschaften und Anwendungen von Halbleiterdioden untersucht. Zuerst wird das charakteristische Verhalten von einer gewöhnlichen und einer Zener-Diode untersucht. Basierend auf diesen Messungen werden die entsprechenden Kennlinien erstellt.

Das gewonnene Wissen wird dann verwendet, um eine Anzahl von Schaltungen zu bauen, mit dem Ziel, Wechselspannung bestmöglich in Gleichspannung umzuwandeln. Unter anderem werden Kondensatoren zur Filterung und eine Zenerdiode zur Stabilisierung verwendet.

## Geräte

- Zwei Digitale Multimeter zur Strom- und Spannungsmessung ( $10\text{M}\Omega$  Innenwiderstand)
- Ein digitales Oszilloskop
- Vier gewöhnliche Dioden (1N4007)
- Eine Zenerdiode (ZPY 5.1V)
- Diverse Widerstände ( $47/100/200/470\Omega$ ), Kabel/Verbindungsbugel, Kondensatoren ( $0.1\mu\text{F}$ - $1000\mu\text{F}$ )
- Gleichstromquelle mit 10V DC
- Wechselspannungsquelle mit 12V (Nominalspannung)
- Zwei Stellwiderstände bzw. Spannungsteiler
- Steckbrett

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Eigenschaften verschiedener Dioden</b>                  | <b>4</b>  |
| 1.1      | Aufbau der Schaltung . . . . .                             | 4         |
| 1.2      | Messung der gewöhnlichen Gleichrichterdiode . . . . .      | 5         |
| 1.3      | Messung der Zenerdiode . . . . .                           | 7         |
| <b>2</b> | <b>Einweggleichrichtung</b>                                | <b>9</b>  |
| 2.1      | Aufbau der Schaltung . . . . .                             | 9         |
| 2.2      | Messung am Oszilloskop . . . . .                           | 10        |
| <b>3</b> | <b>Einweggleichrichtung mit Kondensator</b>                | <b>11</b> |
| 3.1      | Messung am Oszilloskop . . . . .                           | 12        |
| 3.2      | Vergleich der Messwerte und erwarteten Werte . . . . .     | 13        |
| <b>4</b> | <b>Brückengleichrichter</b>                                | <b>14</b> |
| 4.1      | Aufbau der Schaltung . . . . .                             | 15        |
| 4.2      | Vergleich mit vorherigen Gleichrichtungsmethoden . . . . . | 15        |
| <b>5</b> | <b>Spannungsstabilisierung mit Zenerdiode</b>              | <b>16</b> |
| 5.1      | Aufbau der Schaltung . . . . .                             | 16        |
| 5.2      | Beurteilung des Spannungsstabilisator . . . . .            | 17        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung</b>                                     | <b>18</b> |
| <b>7</b> | <b>Anhang mit Daten</b>                                    | <b>19</b> |

# 1 Eigenschaften verschiedener Dioden

Im ersten Teil des Versuches wird die Kennlinie zweier Dioden ermittelt. Sie beschreibt den Strom, welcher durch eine Diode fließen kann, in Abhängigkeit der anliegenden Spannung und ihrer Polarität. Die nachfolgende Formel drückt diesen Zusammenhang durch die Spannung  $U$ , die Temperatur  $T$ , die Konstanten  $e$  und  $k_b$ , sowie die Materialkonstante  $I_0$  aus:

$$I = I_0 \cdot \left( \exp \left( \frac{eU}{k_b T} \right) - 1 \right) \quad (1)$$

## 1.1 Aufbau der Schaltung

Zur Vermessung der Kennlinie von Dioden wird ein Schaltkreis aufgebaut welcher erlaubt, die Spannung, welche an der Diode anliegt zu variieren und den fließenden Strom zu messen. Die Variation der Spannung wird erreicht durch einen Spannungsteiler bzw. ein Potentiometer.

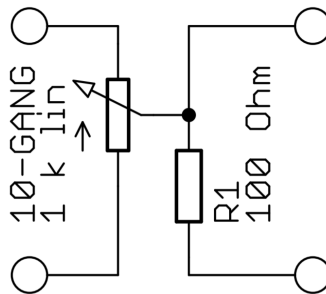


Abbildung 1: verwendeter Spannungsteiler mit Widerstand

Vor dem Strommessgerät wird außerdem noch ein  $100\Omega$  Widerstand benötigt zur Begrenzung des Stromes. In dem verwendeten Spannungswandler wird somit der Ausgang gewählt, welcher bereits einen  $100\Omega$  Strombegrenzungswiderstand beinhaltet. Es ergibt sich somit folgender Schaltkreis zur Bestimmung der Kennlinie:

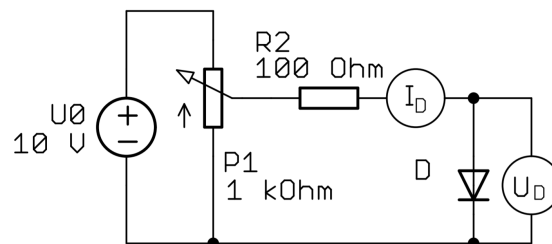


Abbildung 2: Schaltplan zur Bestimmung der Kennlinie

Zu Beachten ist, dass bei kleinen Strömen der Strom, welcher über den  $10\text{M}\Omega$  Widerstand des DVM fließt, die Messung verzerren kann. Außerdem ist es Möglich, dass bei der Messung des Sperrstromes das Amperemeter keinen Stromfluss anzeigt da dieser zu gering ist. Für diesen Fall hat uns Herr Kind folgenden Trick gezeigt:

Zuerst wird während der Messung, wie auch bei der Messung von zu kleinen Strömen, dass

Voltmeter abgeklemmt. Es wird dann ein kleiner Kondensator ( $0.1\ \mu\text{F}$ ) parallel zur Diode geschaltet, um Fluktuation und Leckströme auszudämpfen. Zur Messung des Stromes wird dann das Amperemeter umgeschaltet in ein Voltmeter und mit dem Wissen des Innenwiderstand von  $10\ \text{M}\Omega$  als auch dem Ohmschen Gesetz kann der Strom durch die gemessene Spannung errechnet werden. Das Voltmeter parallel Voltmeter kann vor der Strommessung angeschlossen werden zur Bestimmung der Spannung

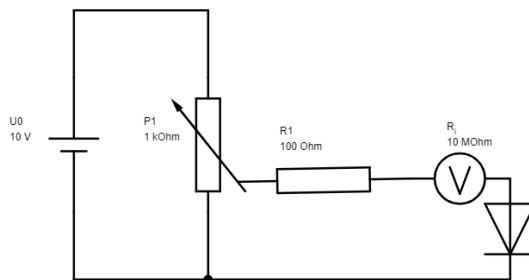


Abbildung 3: Schaltplan zur Bestimmung der negativen Kennlinie

## 1.2 Messung der gewöhnlichen Gleichrichterdiode

Für die Vermessung der gewöhnlichen Gleichrichterdiode (1N4007) ergaben sich in Durchlassrichtung folgende Messdaten:

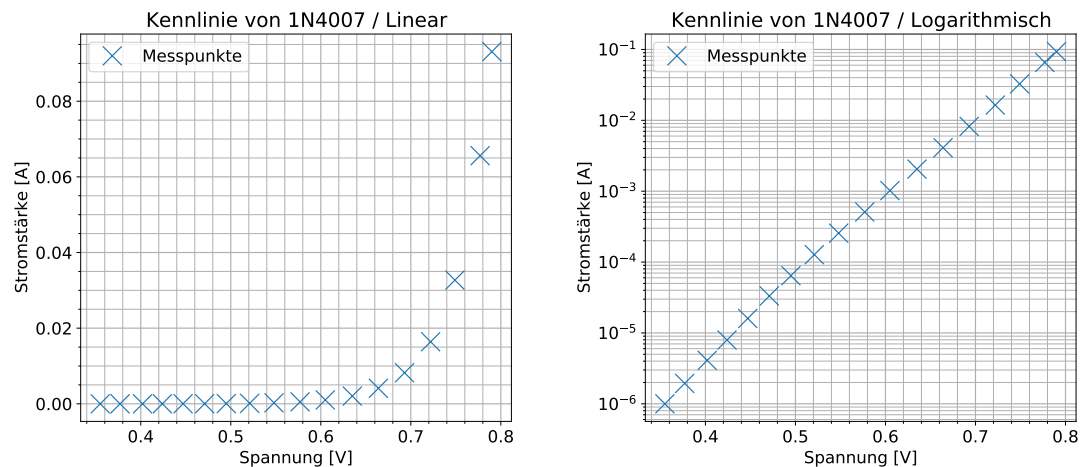


Abbildung 4: Kennlinie der gewöhnlichen Gleichrichterdiode

Es ist ein klarer Anstieg des Stromes zwischen  $0.7\ \text{V}$  und  $0.8\ \text{V}$  erkennbar. Dies zeigt dass ab ca.  $0.7\ \text{V}$  die Diode durchlässig wird. Die Schwellenspannung dieser Diode scheint also zwischen  $0.7\ \text{V}$  und  $0.8\ \text{V}$  zu liegen.

Durch die logarithmische Skala wird zudem eine weitere bzw. vollständiger Betrachtung der Messdaten möglich. Der nahezu lineare Verlauf in dem logarithmischen Graphen weist zudem auf einen exponentiellen Zusammenhang der Stromstärke. Die Aufgenommene Kennlinie entspricht somit der Theorie (siehe: (1)).

Der negative Teil der Kennlinie verhält sich linear, wie im folgenden Graphen zu sehen ist:

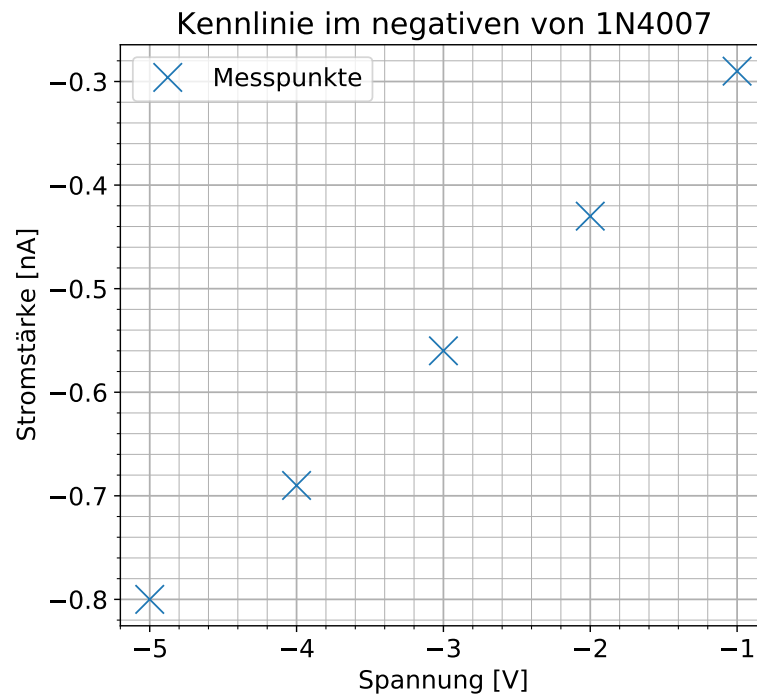


Abbildung 5: Negativer Teil der Kennlinie des gewöhnlichen Gleichrichterdiode

Dies ist ebenfalls zu erwarten, da der Leckstrom, welcher der Driftstrom und ein Resultat des E-Feldes ist, linear mit der Sperrspannung zu nimmt.

Im nachfolgenden sind sowohl der Negativ als auch der Positive teil der Kennlinie zusammen aufgeführt:

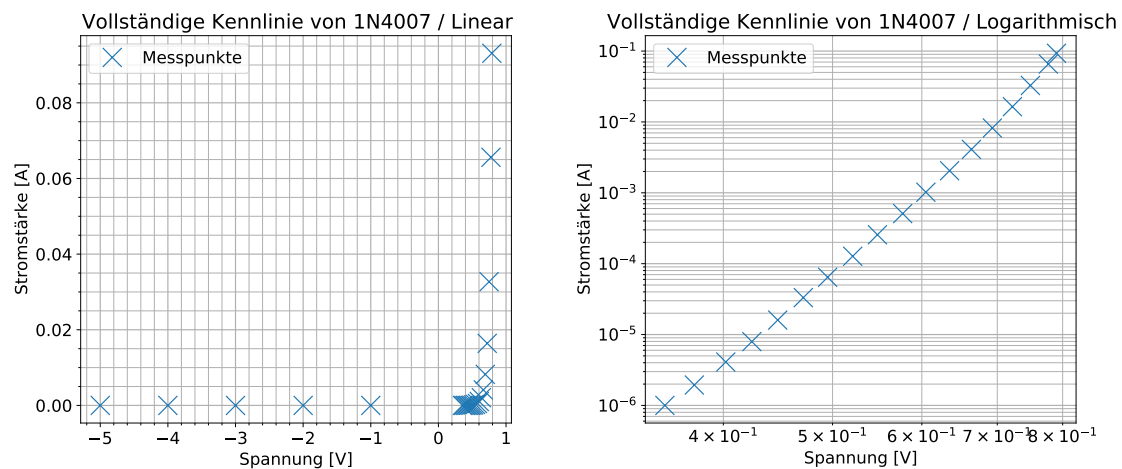


Abbildung 6: Vollständige Kennlinie der gewöhnlichen Gleichrichterdiode

Es resultiert somit in einer vollständigen Kennlinie wobei auch hier das exponentielle Wachstum deutlich erkennbar ist. Das Verhalten der Diode, für Raumtemperatur, konnte somit gänzlich für verschieden anliegende Spannungen charakterisiert werden.

### 1.3 Messung der Zenerdiode

Für die Vermessung der Zenerdiode (ZPY 5,1) ergaben sich ähnliche Messdaten, unter Berücksichtigung eines verschobenen Messbereich, wie bei der gewöhnlichen Gleichrichterdiode:

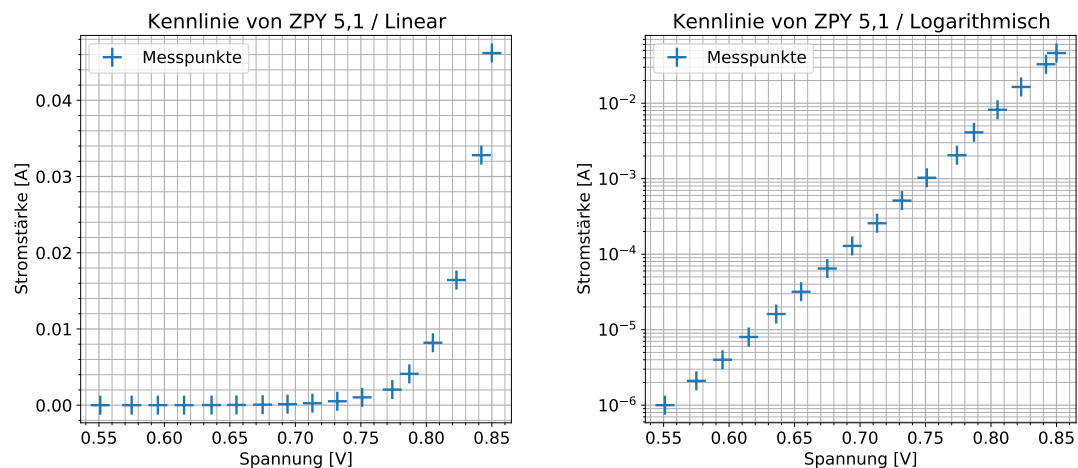


Abbildung 7: Kennlinie der Zenerdiode

Der Anstieg erfolgt bei der Zenerdiode im Bereich von 0.8 V und 0.85 V welches somit der Bereich ihrer Schwellenspannung ist.

Der nahezu lineare Verlauf in dem logarithmischen Graphen ähnelt dem der Gleichrichterdiode sehr. In Durchlassrichtung unterschieden sich die Dioden somit qualitativ kaum.

In die Sperrichtung weisen sie jedoch deutliche Unterschiede auf wie im Graphen zu sehen ist:

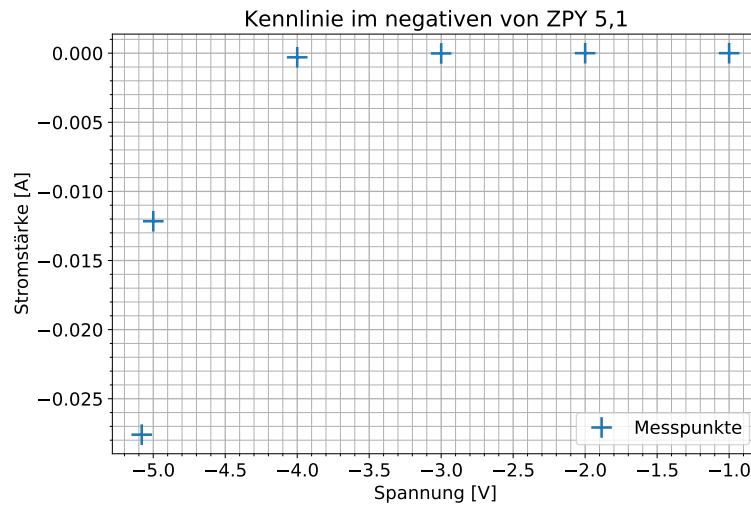


Abbildung 8: Negativer Teil der Kennlinie des Zenerdiode

Die Zenerdiode lässt ab ca. 5 V einen deutlich messbaren Strom fließen. Dies ist unterschiedlich zur Gleichrichterdiode jedoch ebenfalls erwartet da bei der Zenerdiode eben dieser Effekt erwünscht ist.



Im nachfolgenden sind sowohl der negative als auch der positive Teil der Kennlinie zusammen aufgeführt:

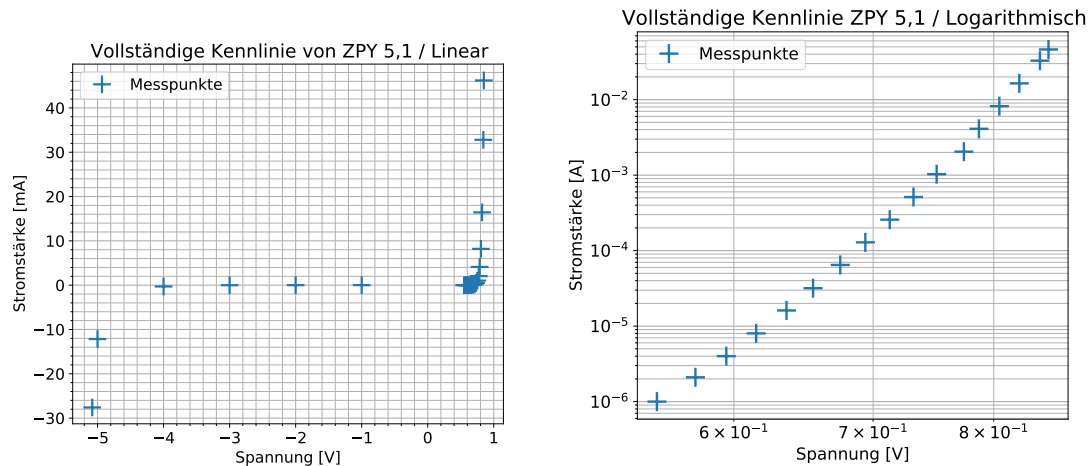


Abbildung 9: Vollständige Kennlinie der Zenerdiode

Es zeigt sich somit nach vergleichen der Kennlinien der gewöhnlichen Diode und Zenerdiode, dass sich diese in die Durchlassrichtung qualitativ nicht unterscheiden. Erst durch betrachten der Sperrrichtung zeigt sich ein qualitativer Unterschied aufgrund des Zener Effekt, welcher sich, in der Zenerdiode, durch ein exponentielles Zunehmen des Sperrstromes ab ca. 5V

## 2 Einweggleichrichtung

Es soll nun der Einfluss einer Diode auf einen Wechselstromkreis vermessen werden.

### 2.1 Aufbau der Schaltung

Dafür wird nun eine einfache Reihenschaltung mit einem Wechselspannungsnetzteil, einer einfachen Diode und einem Widerstand als Verbraucher verwendet. Ein Oszilloskop wird verwendet um den Unterschied im Spannungsverlauf zwischen der Spannung des Netzteils und nach der Diode Resultierenden Spannung aufzuzeichnen. Zu diesem Zweck wird es mit seinem ersten Eingang (channel1) parallel zum Netzteil und mit seinem zweiten Eingang (channel2) parallel zum Widerstand RL geschaltet. Somit lassen sich die Kurven bezüglich ihrer Spannungskurven vergleichen. Der folgende Schaltplan beschreibt diesen Aufbau:

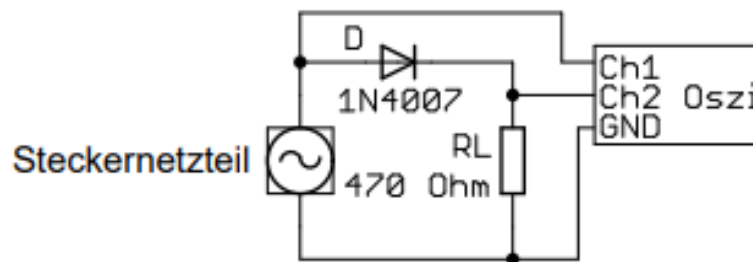


Abbildung 10: Schaltplan der Einweggleichrichtung

## 2.2 Messung am Oszilloskop

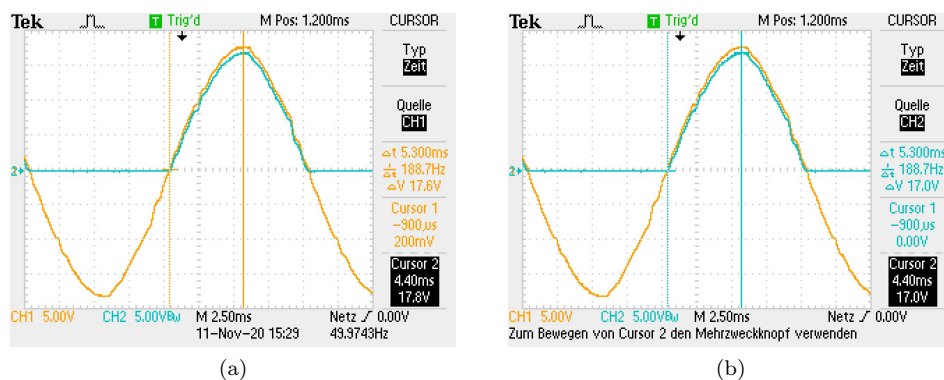


Abbildung 11

Abbildung 11(a) gibt die Werte der kurve des Netzteils mit einer Frequenz von etwa 50Hz und einer Maximalspannung von 17,8V an. Abbildung 11(b) gibt die gleichen Werte für die Spannungskurve hinter der Diode an, wobei sich für die Spannung mit 17,0V ein kleinerer Wert als bei 11(a) ergibt.

Sowohl 11(a) als auch 11(b) erlauben Interpretation der beiden übereinander gelegten kurven. So wird aus diesen ersichtlich, dass es im Vergleich zur Kurve des Netzteils in der Kurve des Schaltkreises mit Diode keinen Negativen Ausschlag sondern lediglich eine Nulllinie gibt. Dies entspricht der Erwartung da aufgrund der Eigenschaften der Verwendeten Diode (siehe Abbildung10 ) lediglich Positive Spannungen diese Passieren können. Folglich begrenzt die Diode die Spannung des Netzteils im Schaltkreis auf ihren Positiven Anteil. Die zusätzlich auftretende Differenz der maximalen Spannung der beiden Kurven lässt sich auf die Schwellenspannung der Diode zurückführen welche sich so aus der Differenz der beiden Maxima ermitteln lässt:

$$U_{Schwell} = U_a - U_b = 17,8V \pm 0,05V - 17,0V \pm 0,05V = 0,8V \pm 0,05V$$

### 3 Einweggleichrichtung mit Kondensator

Zur Verbesserung Einweggleichrichtung kann ein Kondensator verwendet werden. Wie dieser verwendet wird und sein Effekt wird im folgenden erläutert.

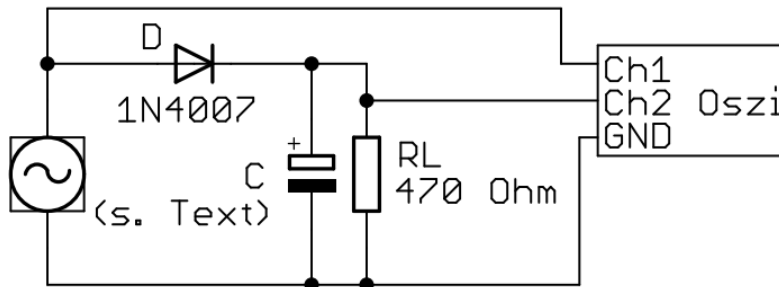


Abbildung 12

Die Schaltung des Einweggleichrichters mit Kondensator gleicht der Schaltung wie in 2.1 beschrieben und in Abb.10 dargestellt bis auf einen zusätzlichen Kondensator welcher zum bereits vorhandenen Widerstand  $R_L$  parallel geschaltet ist. Dabei ist bei Elektrolytkondensatoren vor deren Einbau auf deren Polung zu achten um eine Beschädigung des Kondensators zu vermeiden.

### 3.1 Messung am Oszilloskop

Folgende Oszilloskop Bilder wurden in der zuvor beschriebenen Schaltung aufgenommen

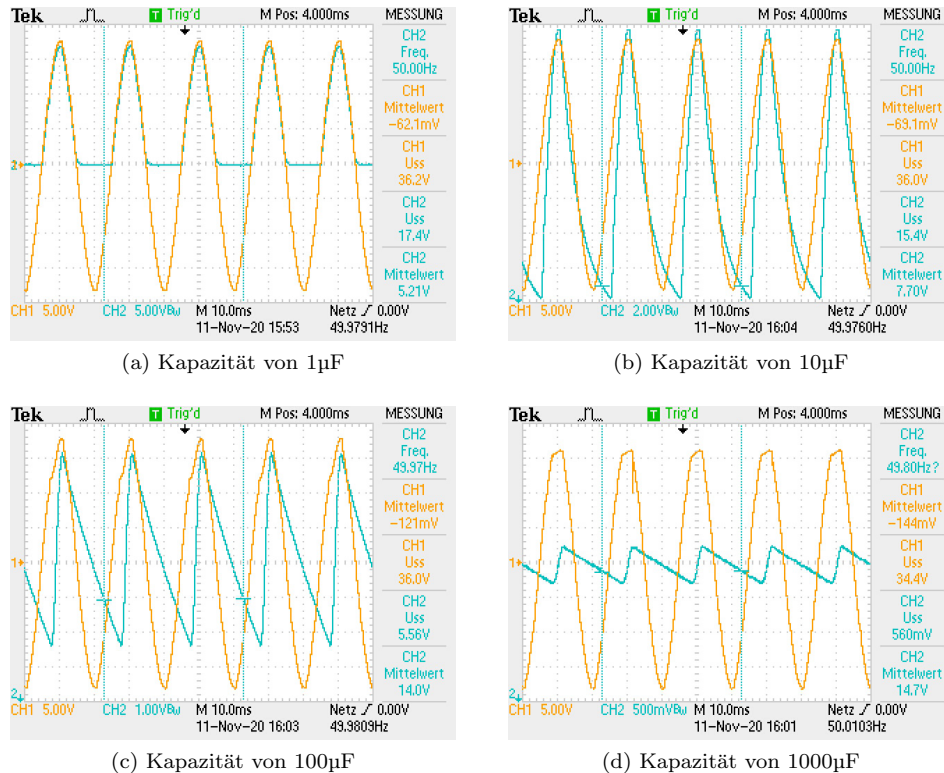


Abbildung 13: Oszilloskopaufnahmen des Spannungsverlauf mit entsprechender Skalierung

Aus den Kurven des Oszilloskops lässt sich nun (insbesondere im Vergleich zu den Kurven des Letzten Versuchsteils 2 ohne Kondensator) der Einfluss verschiedener Kondensatoren mit unterschiedlicher Kapazität beobachten und vergleichen.

So wird ersichtlich, dass sich mit zunehmender Kapazität die Kurve des Schaltkreises immer mehr einer Konstanten Gleichspannung annähert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die verwendeten Kondensatoren sich in der Phase der hohen Spannung aufladen und mit abnehmender Spannung beginnen sich zu entladen und so den Spannungsabfall auszugleichen. Kondensatoren mit höherer Kapazität sind in der Lage mehr Energie zu speichern und so den Spannungsabfall länger auszugleichen. Diese Eigenschaft wird charakterisiert durch die Maximale Spannungsdifferenz welche Brummspannung genannt wird. Eine weitere Konsequenz höherer Kapazität ist, dass die Mittlere Spannung steigt da mit zunehmender Kapazität die Spannung auf einem immer konstanteren hohem Niveau gehalten wird.

### 3.2 Vergleich der Messwerte und erwarteten Werte

Die jeweilige Brumm- und Durchschnittsspannung, bezüglich eines Kondensators, kann ebenfalls theoretisch berechnet werden. Dies geschieht indem die Maximale Spannung ermittelt wird und nach der Gleichung:

$$U(t) = U_0 \exp\left(\frac{-t}{RC}\right) \quad C: 1\text{-}1000\mu\text{F}; R: 470\Omega; \Delta t: 20\text{ms}$$

die Minimale Spannung des Kondensators berechnet wird. Durch Bilden des arithmetischen Mittels lässt sich die mittlere Spannung approximieren und durch Bilden der Differenz die Brummspannung berechnen. Im folgenden Diagramm sind die gemessenen Werte, mitsamt den theoretisch Erwarteten, aufgetragen. Es ist anzumerken, dass die Verbindungslinie keine Interpolation der Werte darstellt sondern lediglich zur Verfolgung der Entwicklung präsent ist.

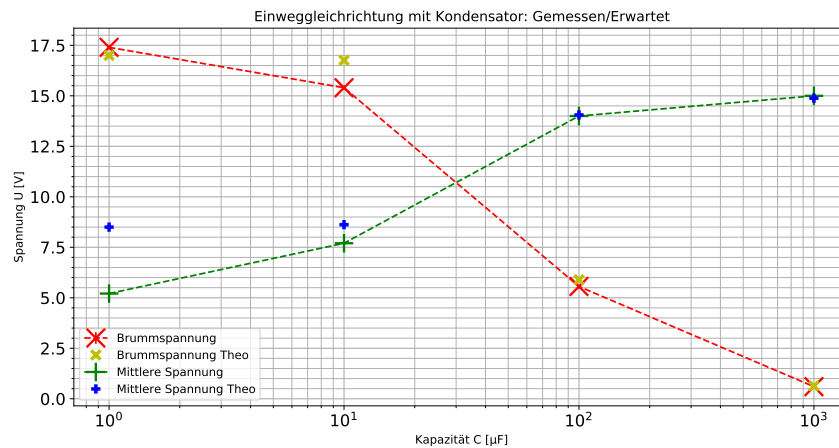


Abbildung 14: Vergleich der Messpunkte und Theoretische Werte von der Einweggleichrichtung mit Kondensator

Es zeigt sich, dass die gemessenen Werte durch die vorhergesagten Werte ab 100µF gut approximiert werden können. Die Ungenauigkeit für geringere Kapazitäten stammt vermutlich durch die Abschätzung der Exponentialfunktion als lineare Funktion. Dies bestätigt sich durch betrachten der entsprechenden Oszilloskopbilder, da dort ein klarer exponentieller Abfall erkennbar ist.

## 4 Brückengleichrichter

Der Brückengleichrichter besteht aus 4 Dioden, welche wie in Abbildung 15 dargestellt angebracht sind. vom Netzteil geht eine Wechselspannung aus.

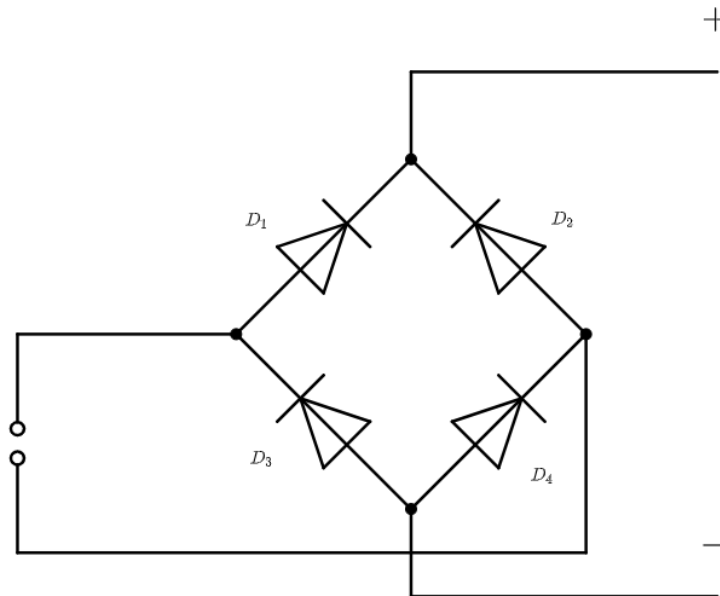


Abbildung 15: Brückengleichrichter

Nun sind zwei Fälle möglich:

- Der positive Pol ist der obere Anschluss des Netzteils in Abbildung 15. Dann fließt der Strom, in technischer Stromrichtung betrachtet, vom Netzteil in den Brückengleichrichter und kann aufgrund der Dioden nur durch  $D_1$  weiter in das mit + markierte Kabel Fließen. Vom mit - markierten Kabel Fließt der rückfließende Strom wieder in den Gleichrichter und dem niedrigerem Potential nachstrebend durch  $D_4$  wieder ins Netzteil.
- Der positive Pol ist der untere Anschluss des Netzteils in Abbildung 15. Der Strom fließt in diesem Fall von der anderen Seite in den Gleichrichter und Kann aufgrund der Dioden nur durch  $D_2$  weiter in das mit + markierte Kabel Fließen. Vom mit - markierten Kabel Fließt der rückfließende Strom wieder in den Gleichrichter und dem niedrigerem Potential nachstrebend durch  $D_3$  wieder ins Netzteil.

Damit liegt sowohl bei einer Positiven als auch bei einer Negativen Spannung durch das Netzteil eine proportionale positive Spannung bei + und - an (abzüglich der Verluste durch die Schwellenspannung der Dioden).

## 4.1 Aufbau der Schaltung

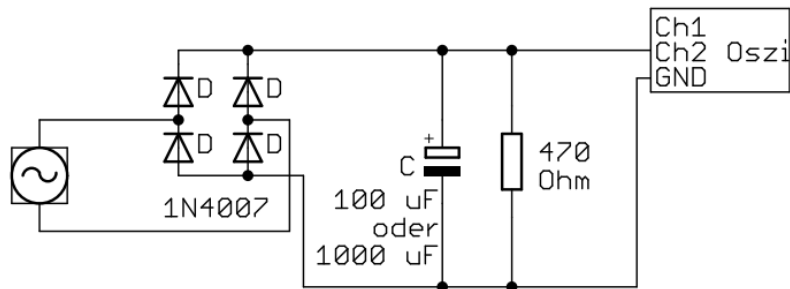


Abbildung 16: Schaltung mit Brückengleichrichter

In der vorliegenden Schaltung wird das Netzteil an einen Brückengleichrichter angeschlossen. Zu diesem werden nun ein Kondensator mit einer Kapazität von  $100\mu F$  oder  $1000\mu F$  und ein  $470\Omega$  Widerstand sowie ein Oszilloskop parallel geschaltet. Dabei muss wie im vorherigen Versuchsteil auch wieder auf die Polung des Kondensators geachtet werden.

## 4.2 Vergleich mit vorherigen Gleichrichtungsmethoden

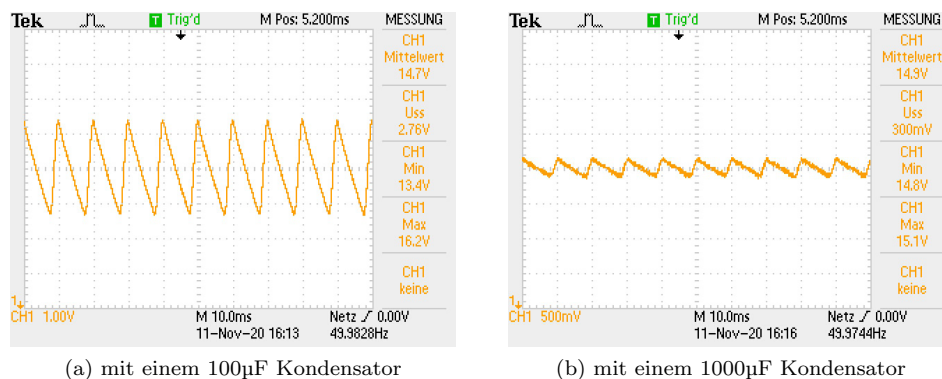


Abbildung 17: Spannungsverlauf des Brückengleichrichter

Im Vergleich zu den Messkurven des Versuchsaufbaus aus 3.1 wird aus Abbildung 17 das durch den Brückengleichrichter nur noch  $\frac{1}{10}$  der Kapazität des Kondensators benötigt wird um den selben spannungs Mittelwert zu erzielen (vgl. Abb.3.1(d) und Abb.17(a)). So lassen sich mit identischen Kondensatoren höhere Gleichspannungen erzielen. Außerdem wird auch die Brummspannung deutlich verringert. Wo ohne den Brückengleichrichter für eine Kapazität von  $100\mu F$  bzw.  $1000\mu F$  eine Brummspannung von  $5,56V$  bzw.  $560mV$  resultierte ergab sich nun für die Schaltung mit Brückengleichrichter nur noch eine Brummspannung von  $2,75V$  bzw.  $300mV$ . Diese Halbierung der Brummspannung lässt sich so auf die Zusätzliche Nutzung des Negativen Potentials der Wechselspannung zurückführen.

## 5 Spannungsstabilisierung mit Zenerdiode

Zur weiteren Spannungsstabilisierung beziehungsweise Verringerung oder gar der Eliminierung der Brumspannung kann eine Zenerdiode parallel zur Last geschaltet werden. Diese generiert, unter Verwendung eines entsprechenden Vorwiderstandes, welcher in Reihe zu der Last geschaltet wird, einen konstanten Potenzialunterschied über sich und somit eine konstante Spannung für die parallele Last.

### 5.1 Aufbau der Schaltung

Es wird die Schaltung aus dem vorherigen Versuch beibehalten und zuerst die entsprechende Zenerdiode und ihr Vorwiderstand, wie in Abbildung 18 dargestellt, eingebaut. Zum Testen der Spannungsregulierung wird sowohl eine variable Last parallel zu der Zenerdiode als auch ein Volt- und ein Amperemeter an den entsprechenden Stellen zur Messung der Spannungsdifferenz für einen entsprechenden Stromfluss hinzugefügt.

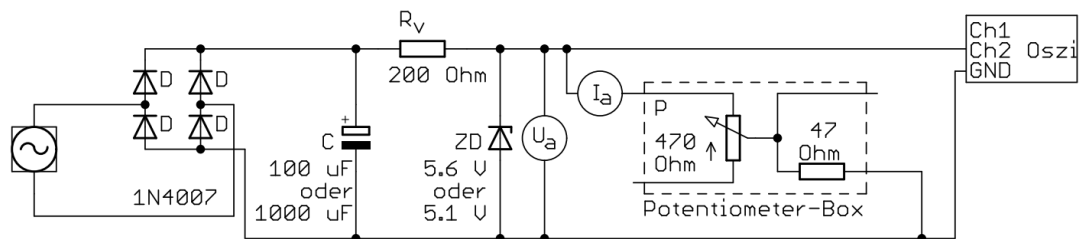


Abbildung 18



## 5.2 Beurteilung des Spannungsstabilisator

Zur qualitativen Bewertung des Spannungsstabilisator wurde die Gleichspannung, unter verschiedenen Lasten, am Oszilloskop betrachtet:

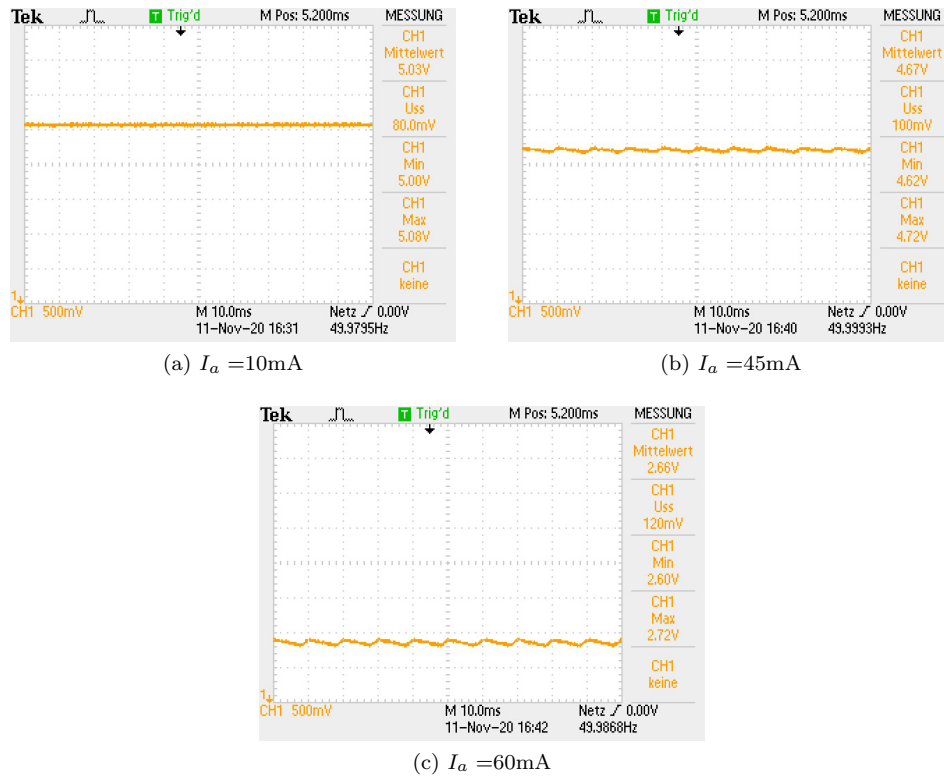


Abbildung 19: Oszilloskopaufnahme bei verschiedenen Ausgangsströmen

Wie zu erkennen ist nimmt die Qualität der Gleichspannung ab, je größer die Last ist. Es ist erkennbar, dass sich die Brummspannung als Resultat einer höheren Last erhöht. Deutlicher ist jedoch dass es einen starken Abfall der regulierten Gleichspannung gibt. Um diesen Abfall quantitativ zu beurteilen wird die Spannungsdifferenz über die Zenerdiode für verschiedene Lasten vermessen.

Das Auftragen dieser Messung resultiert in dem folgenden Graphen:

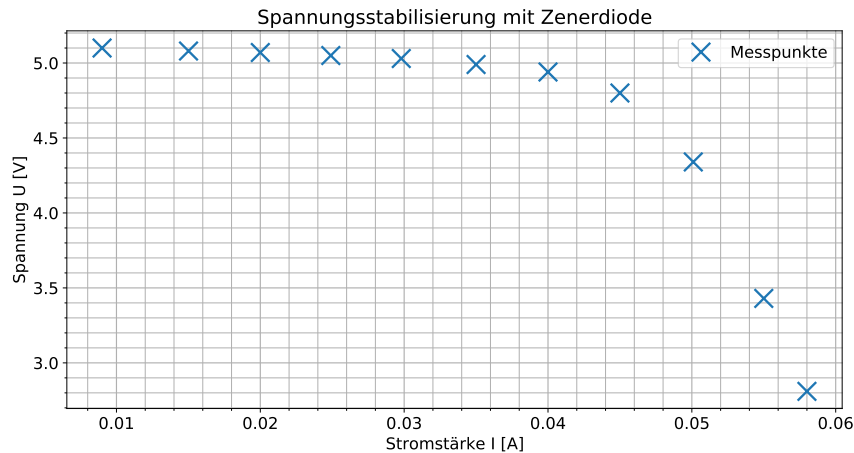


Abbildung 20: Ausgangs(gleich)spannung  $U_a$  aufgetragen gegen Ausgangsstroms  $I_a$

Wie sich erkennen lässt ist die Zenerdiode in der Lage, für eine Last bis zu 40mA, eine Gleichspannung von 5V zu halten mit einer Varianz von unter 10%. Für größere Lasten fällt die Gleichspannung rapide ab.

## 6 Zusammenfassung

Die Kennlinien der Dioden konnten erfolgreich verzeichnet werden. Es zeigt sich, dass die Verwendeten im positiven Teil der Kennlinie, qualitativ gleich verhalten und ihre Leitfähigkeit exponentiell mit der anliegenden Spannung zu nimmt. Im negativen Teil treten wiederum Unterschiede auf. Während die gewöhnliche Diode nur einen minimalen Sperrstrom zulässt, leitet die Zenerdiode ab ca. -5V mit steigender Spannung exponentiell mehr Ladungsträger pro Sekunde.

Es war zu verzeichnen, dass mit ansteigender Komplexität die Effektivität, bzw. Qualität des Gleichstromes, der Gleichrichter zu nahm.

Die erste Schaltung (Siehe: Abbildung 10) erzeugt eine Pulsierende Gleichspannung. Durch Parallelschaltung eines Kondensators (Siehe: Abbildung 12), mit ausreichender Kapazität (ca. 100 $\mu$ F bis 1000 $\mu$ F) wird der Puls einer konstanten Gleichspannung angeglichen.

Nach einbauen eines Brückengleichrichter (Siehe: Abbildung 16) konnte zusätzlich zur positiven Halbwelle ebenfalls die negative Halbwelle des Wechselstroms verwendet werden. Durch die Nutzung der gesamten Wechselspannung konnte die Brummspannung etwa um die Hälfte reduziert werden.

Um final die Brummspannung bestmöglich zu verringern kann eine Zenerdiode in Sperrrichtung mit entsprechendem Vorwiderstand zur Schaltung hinzugefügt werden (Siehe: Abbildung 18). Dies resultiert in einer Gleichspannungsquelle welche, bis zu einer gewissen Stromabnahme von ca. 40mA, eine konstante Gleichspannung liefert.

## 7 Anhang mit Daten

Tabelle 1: positive Kennlinienwerte der ZPY 5.1

| Spannung U  | Stromstärke I       |
|-------------|---------------------|
| 0.551±0.005 | 0.0000010±0.0000005 |
| 0.575±0.005 | 0.0000021±0.0000005 |
| 0.595±0.005 | 0.0000040±0.0000005 |
| 0.615±0.005 | 0.0000080±0.0000005 |
| 0.636±0.005 | 0.0000161±0.0000005 |
| 0.655±0.005 | 0.0000318±0.0000050 |
| 0.675±0.005 | 0.0000646±0.0000050 |
| 0.694±0.005 | 0.0001287±0.0000050 |
| 0.713±0.005 | 0.0002570±0.0000500 |
| 0.732±0.005 | 0.0005130±0.0000500 |
| 0.751±0.005 | 0.0010290±0.0000500 |
| 0.774±0.005 | 0.0020460±0.0000500 |
| 0.787±0.005 | 0.0041100±0.0000500 |
| 0.805±0.005 | 0.0081900±0.0000500 |
| 0.823±0.005 | 0.0164200±0.0005000 |
| 0.842±0.005 | 0.0328000±0.0005000 |
| 0.850±0.005 | 0.0462000±0.0005000 |

Tabelle 2: positive Kennlinienwerte der 1N4007

| Spannung U  | Stromstärke I       |
|-------------|---------------------|
| 0.355±0.005 | 0.0000010±0.0000005 |
| 0.377±0.005 | 0.0000019±0.0000005 |
| 0.402±0.005 | 0.0000041±0.0000005 |
| 0.424±0.005 | 0.0000080±0.0000005 |
| 0.447±0.005 | 0.0000160±0.0000005 |
| 0.471±0.005 | 0.0000332±0.0000050 |
| 0.495±0.005 | 0.0000643±0.0000050 |
| 0.521±0.005 | 0.0001273±0.0000050 |
| 0.548±0.005 | 0.0002560±0.0000500 |
| 0.577±0.005 | 0.0005090±0.0000500 |
| 0.605±0.005 | 0.0010200±0.0000500 |
| 0.635±0.005 | 0.0020500±0.0000500 |
| 0.664±0.005 | 0.0041000±0.0000500 |
| 0.693±0.005 | 0.0082100±0.0000500 |
| 0.722±0.005 | 0.0164100±0.0005000 |
| 0.749±0.005 | 0.0327000±0.0005000 |
| 0.777±0.005 | 0.0656000±0.0005000 |
| 0.790±0.005 | 0.0931000±0.0005000 |

Tabelle 3: negative Kennlinienwerte der ZPY 5.1

| Spannung U | Stromstärke I [nA] |
|------------|--------------------|
| -1.00      | -42.00             |
| -2.00      | -370.00            |
| -3.00      | -17800.00          |
| -4.00      | -299000.00         |
| -5.00      | -12160000.00       |
| -5.08      | -27600000.00       |

Tabelle 4: negative Kennlinienwerte der 1N4007

| Spannung U | Stromstärke I [nA] |
|------------|--------------------|
| -5.0       | -0.80              |
| -4.0       | -0.69              |
| -3.0       | -0.56              |
| -2.0       | -0.43              |
| -1.0       | -0.29              |

Tabelle 5: Daten der Spannungsstabilisierung mit Zenerdiode

| Spannung U | Stromstärke I |
|------------|---------------|
| 5.10       | 0.0090        |
| 5.08       | 0.0150        |
| 5.07       | 0.0200        |
| 5.05       | 0.0249        |
| 5.03       | 0.0298        |
| 4.99       | 0.0350        |
| 4.94       | 0.0400        |
| 4.80       | 0.0450        |
| 4.34       | 0.0501        |
| 3.43       | 0.0550        |
| 2.81       | 0.0580        |