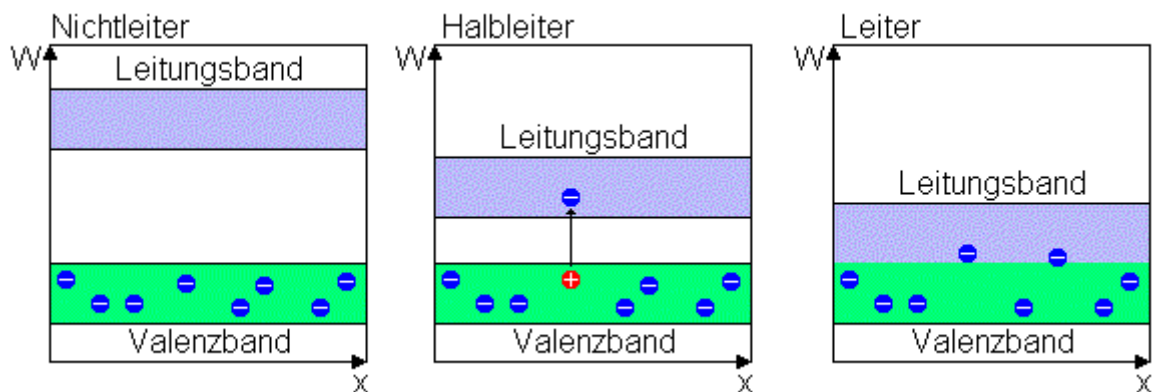


PS 7 - Halbleiter I

1. Der reine Halbleiter

Halbleiter, genauer gesagt ihre Leitfähigkeit, hängt stark von der Temperatur ab. Im Gegensatz zu Metallen, die im Allgemeinen so genannte „Kaltleiter“ (auch „PTC“-Leiter für „positive temperature coefficient“) sind, d.h. dass der elektrische Widerstand exponentiell mit der Temperatur steigt, ist dies bei Halbleitern umgekehrt, ihre Leitfähigkeit steigt mit wachsender Temperatur.

Der Grund dafür liegt im Atombau des Halbleiters. Elektronen können im ganzen Kristall ebenso wie im Atom selbst nur diskrete Energiewerte annehmen. Diese liegen im Festkörper so nahe beieinander, dass man von einem Energieband spricht. Das oberste, von Elektronen fast vollständig besetzte Band heißt Valenzband, das nächst höhere „Leitungsband“. Die Größe des Abstands („verbotene Zone“) zwischen diesen Bändern ist maßgeblich für die elektrische Eigenschaft des Materials.



Bei Energiezufuhr oder höherer Temperatur eines Halbleiters gelangen immer mehr Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband, somit steigt dort die Zahl der vorhandenen Leitungsträger. Für jedes Elektron, das ins Leitungsband gelangt, bleibt ein „Elektronenloch“ im Valenzband übrig. Somit kann man den Leitungsvorgang im Halbleiter nicht nur als „Elektronenstrom“, sondern auch als Löcherstrom bezeichnen.

2. Der dotierte Halbleiter

Für alle elektronischen Halbleiter-Bauelemente (Dioden, Transistoren, Thyristoren und Integrierte Schaltkreise) werden den chemisch reinen Elementen (heute hauptsächlich Silizium, früher auch Germanium) eine bestimmte Menge von Verunreinigungsstoffen (Dotierstoffe) gezielt beigegeben.

Wichtig ist dabei, dass diese Dotierstoffe entweder ein Außenelektron mehr (5-wertig, „Donatoren“, sie liefern also einen Elektronen-Überschuss: Phosphor, Arsen, etc.) oder ein Außenelektron weniger (3-wertige Donatoren, „Akzeptoren“, liefern also einen Elektronen-Mangel, so genannte Löcherleitung: Bor, Gallium, Indium, Aluminium) aufweisen.

Den daraus gewonnen Halbleiter nennt man, je nachdem, wie er dotiert ist, n-Halbleiter (Donator, es tragen die Elektronen wesentlich zur Leitung bei) oder p-Halbleiter (Akzeptor, es tragen die Löcher wesentlich zur Leitung bei). Im Allgemeinen bewirkt das Dotieren eines

Halbleiters, dass die gewünschten Eigenschaften schon bei wesentlich niedrigeren Temperaturen auftreten.

3. Die Diode

3.1 Der pn-Übergang

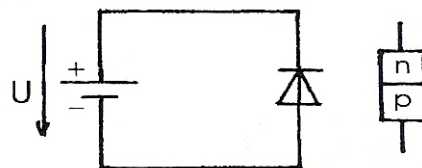
Bringt man einen p und einen n dotierten Halbleiter aneinander, so verbinden sich an der Kontaktstelle die Elektronen des n-dotierten mit den Löchern des p-dotierten Halbleiters (Diffusion). Im Grenzbereich der Kontaktstelle befinden sich nun kaum freie Ladungsträger, es hat sich eine **Sperrschicht** gebildet. Durch diesen Effekt wird der n-dotierte Halbleiter positiv, der p-dotierte negativ aufgeladen, wodurch eine Potentialdifferenz entsteht (Diffusionsspannung) die der Diffusion selbst entgegenwirkt.



Die beiden Anschlüsse der Diode nennt man **Anode** (p-Schicht) bzw. **Kathode** (n-Schicht)

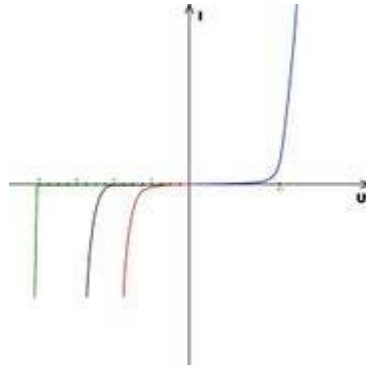
3.2 Diode in Sperrrichtung

Legt man eine Diode so in einen Schaltkreis, dass die Anode am Minuspol und die Kathode am Pluspol der Spannungsquelle liegt, so werden die Elektronen der Kathode zum positiven Pol und die Löcher zum negativen Pol „gezogen“. Das bewirkt, dass sich die Sperrschicht verbreitert und im Idealfall kein Strom fließt.



Dies ist in Wirklichkeit jedoch nicht so, es befindet sich trotzdem eine kleine Zahl an Leitungselektronen in der Sperrschicht, was auf deren thermische Energie zurückzuführen ist. Diese werden, nachdem sie erst durch Diffusion in die Sperrschicht gelangt sind, durch den Diffusionsstrom nicht gebremst, sondern quasi beschleunigt, es fließt ein kleiner, so genannter „Sperrstrom“.

Wie zu erwarten nach vorher genannten Effekten, ist dieser Sperrstrom stark temperaturabhängig. Wie aus der Diodenkennlinie (siehe unten stehende Abbildung) erkennbar, steigt der Sperrstrom ab einem gewissen, kritischen Wert (Zenerspannung, Durchbruchspannung) stark an. Ursache dafür sind sehr hohe elektrische Feldstärken im Kristall, welche durch Stoßionisation entstehen (durch höhere thermische Energie nimmt die Zahl der Stoßprozesse im Inneren des Kristalls zu).



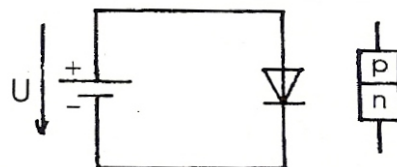
Diese hohen Feldstärken können die Leitungselektronen so stark beschleunigen, dass sie weitere Elektronen aus der Bindung ausschlagen, was eine Kettenreaktion auslöst und sich schließlich immer mehr freie Ladungsträger im Kristall befinden (Lawinen-Effekt). Durch die so entstandenen, hohen Ströme kann es schlussendlich zur thermischen Zerstörung der Diode kommen.

Das Problem ist, dass bei gewöhnlichen Dioden die Durchbruchspannung zwar sehr groß ist, aber nicht genau spezifiziert ist, d.h. sie schwankt je nach Herstellung.

Bei Zener-Dioden ist sie jedoch genau spezifiziert und wird hier auch Zenerspannung genannt. Der Wert der Zenerspannung hängt von der Dotierungsstärke ab. Je höher die Dotierung, desto kleiner die Sperrschicht, desto kleiner die Zenerspannung. Bei Dioden, wo diese Spannung höher als 5,7 Volt ist, ist der Durchbruch auf den Lawineneffekt zurückzuführen. Unter 5,7 Volt ist dies aber auf den s.g. Zener-Effekt zurückzuführen, wo durch die vorher erwähnten, hohen Feldstärken die Elektronen direkt aus den Bindungen innerhalb der Sperrschicht gerissen werden, wodurch innerhalb der Sperrschicht freie Ladungsträger entstehen (d.h. dass die Sperrschicht quasi keine Sperrschicht mehr ist). Ansonsten entspricht die Kennlinie einer Zenerdiode genau der Kennlinie einer gewöhnlichen Diode.

3.3 Diode in Durchlassrichtung

Schaltet man die Diode umgekehrt in den Stromkreis, so wird die Sperrschicht mit weiteren Elektronen und Löchern angefüllt, die quasi hineingedrückt werden. Durch die angelegte Spannung U_a wird der Diffusionsstrom U_d auf $U_d - U_a$ verringert. Es fließt somit ein höherer Durchlassstrom, der mit der Temperatur exponentiell ansteigt.



3.4 Vorwiderstand

Bei Stromstärken, mit denen man normalerweise arbeitet, liegt die Diodenspannung in Durchlassrichtung bei 0,6 bis 0,7 Volt. Bei größeren Spannungen allerdings würden schon Ströme im kA-Bereich fließen, was zur Zerstörung der Diode führen würde (Die Größe dieses Stromes wird durch die Formel von Shockley begründet, worauf hier allerdings nicht näher eingegangen wird). Auf jeden Fall erkennt man daraus, dass man unbedingt einen Vorwiderstand an die Spannungsquelle anschließen muss.

3.4.1 Berechnung des Vorwiderstandes

Aus dem maximal zulässigen Durchlassstrom, der aus dem Datenblatt der Diode zu entnehmen ist und der Spannung, die angelegt werden soll, berechnet man den benötigten Vorwiderstand. Man nimmt an, dass die gesamte Spannung am Vorwiderstand abfällt und errechnet dann den Vorwiderstand nach dem Ohmschen Gesetz:

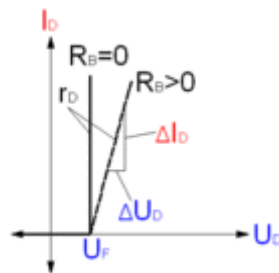
$$R_V = \frac{\text{Versorgungsspannung}}{\text{max. Durchlassstrom}}$$

3.5 Differentieller Widerstand

Der differentielle Widerstand

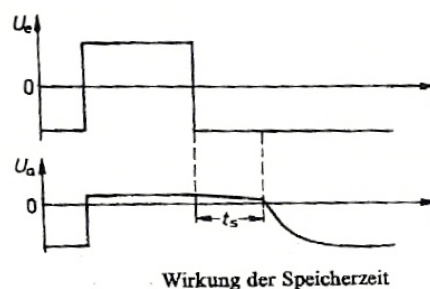
$$r_d = dU/dI$$

gibt an, welche Spannungsänderung dU eine gewisse Stromänderung dI verursacht. Somit ist dieser essentiell für Wechselspannungen! (Der differentielle Widerstand gibt die Steigung der Kennlinie eines Bauteils in EINEM Punkt an)



3.6 Dynamisches Verhalten eines pn-Übergangs

Der Übergang vom Durchlassbereich in den Sperrbereich (was durch eine Wechselspannung erzielt wird) erfolgt nicht instantan, sondern erst nach einer gewissen „Speicherzeit“ t_s . Dies kann man sich folgendermaßen vorstellen. Ist die Spannung so gepolt, dass die Diode in Durchlassrichtung befindet, so befinden sich Leitungselektronen in der Sperrschicht. Wird die Spannung plötzlich umgepolt, befinden sich weiterhin Ladungsträger in der Sperrschicht, die erst „ausgeräumt“ werden müssen (vergleiche dazu 3.2).



Die Speicherzeit ist umso größer, je größer der Durchlassstrom vor der Umpolung war, da sich bei größeren Strömen mehr Ladungsträger in der Sperrschicht befinden. Bei Gleichrichter bzw. Spannungsstabilisierungsschaltungen muss die Periodendauer groß gegen die

Speicherzeit sein, damit der Gleichrichtereffekt nicht verschwinden kann. Man kann sich leicht vorstellen, dass in diesem Fall einfach „zu wenige Perioden vorhanden sind, um einen ungefähr gleichen Spannungsverlauf“ zu erzielen“. Ersichtlicher wird dies bei den verschiedenen Anwendungen einer Diode.

4. Anwendungen der Diode

Gleichrichterschaltungen

Einweggleichrichter

Durch Serielles hinzufügen einer Diode in einem Schaltkreis, welcher mit Wechselspannung betrieben wird, kann diese gleich gerichtet werden. Das heißt, dass nur mehr der positive Teil der Spannungsfunktion am Lastwiderstand ankommt, während der negative Teil einfach durch die Sperrwirkung der Diode abgeschnitten wird. Durch zusätzliches paralleles hinzuschalten eines Kondensators kann die geglättet werden, was in der Regel erwünscht ist. Der Kondensator lädt sich auf während die Diode durchlässig ist und wenn sie sperrt entlädt er sich und versorgt so den Verbraucher mit Spannung. Jedoch ist diese Gleichspannung noch immer schwankend und wird daher als Brummspannung bezeichnet. Für diese Schaltung(mit Kondensator) gelten dann folgende Gleichungen:

$$(1) \quad U_a = U_{a0} \left(1 - \sqrt{\frac{R_s}{R_L}}\right)$$

$$(2) \quad U_{Br} \approx \frac{U_a}{CR_L f}$$

Da $U_a = \frac{R_E}{R_E + R_V} U_1$ nicht direkt Messbar ist muss man sie über die folgende Formel nähern.

$$(3) \quad U_a \approx \frac{2U_{a, \max} + U_{a, \min}}{3}$$

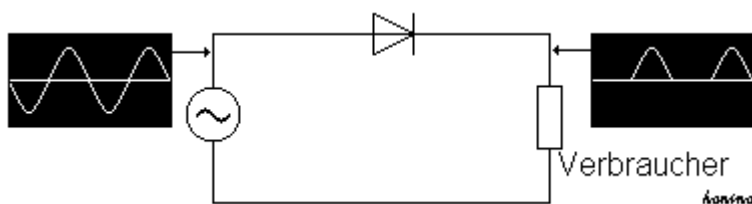


Abb.: Schaltplan eines Einweggleichrichters (ohne Kondensator)

Brückengleichrichter

Im Prinzip funktioniert der Brückengleichrichter wie der Einweggleichrichter mit dem Unterschied, dass die negative Halbwelle anstelle abgeschnitten zu werden mittels einer raffinierten Schaltung aus 4 Dioden nach unten gekippt wird. Dadurch wird diese auch genutzt und wieder mittels eines Kondensators noch zusätzlich geglättet. Es ergeben sich für den Brückengleichrichter folgenden Gleichungen:

$$(4) \quad U_{a0} \approx \sqrt{2}U_{L, \text{eff}} - 2U_D$$

$$(5) \quad U_a = U_{a0} \left(1 - \sqrt{\frac{R_v}{2R_L}}\right)$$

$$(6) \quad U_{Br} \approx \frac{U_a}{2CR_L f}$$

Weiters ist auch Gleichung (3) von oben anwendbar.

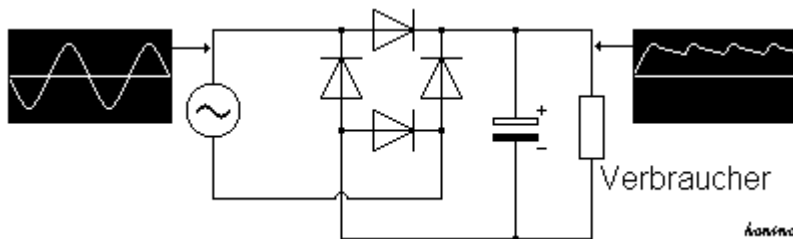


Abb.: Schaltplan eines Brückengleichrichters

Spannungsstabilisierung

Da für den Betrieb von elektronischen Schaltungen eine relativ stabile Gleichspannung benötigt, braucht man ein System, welches Schwankungen dämpft und minimiert. Daher schaltet man hinter einen Gleichrichter üblicher Weise noch einen Spannungsstabilisierungsschaltung, deren einfachste Form mittels einer Zenerdiode verwirklicht werden kann. Auf Grund der besonderen Eigenschaften dieser Diode ergeben sich nun für unsere Schaltung folgende Formeln:

$$(7) \quad I_{Z0} = \frac{U_1 - U_2}{R_V}$$

$$(8) \quad I_{Z \max, \min} = \frac{U_1 \pm \Delta U_1 - U_z}{R_V} - I_L$$

Für letztere Formel muss man wissen, dass die Eingangsspannung eine Brummspannung und keine reine Gleichspannung ist. Die Stabilisierung funktioniert nur, wenn ΔU_1 ausreichend klein ist, sodass $I_{Z \min}$ und $I_{Z \max}$ noch im Bereich der Z-Diode liegen, welcher sich linear verhält. Für den Stabilisierungsfaktor S , welche die Effektivität dieser Schaltung angibt, existiert folgende Gleichung:

$$(9) \quad S = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} = \frac{R_V + r_D}{r_D}$$

Da der Gleichrichter auf Grund der zwischengeschalteten Stabilisierungsschaltung nun nicht mehr vom Lastwiderstand sondern von dem Eigenwiderstand der Stabilisierungsschaltung belastet wird, bekommt man folgende Relation:

$$(10) \quad R_E = \frac{U_1}{U_1 - U_z} R_V$$

Die Effektivität der stabilisierenden Wirkung der gesamten Schaltung hängt von mehrer Faktoren ab: RV, Glättungskondensator am Gleichrichter, großer Lastwiderstand und eventuell nachgeschalteter Transistor (Stromverstärker).

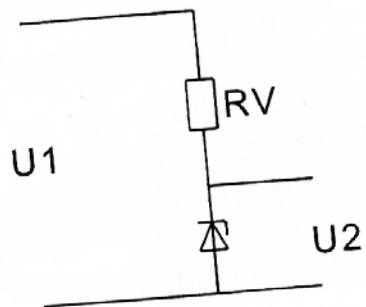


Abb. Ausschnitt aus Schaltplan einer Spannungsstabilisierungs-Schaltung

Aufgabe 1 – Messung der Kennlinie einer Z-Diode

Durchführung

Wir konstruierten einen einfachen Stromkreis mit einem Amperemeter in Serie zu einer Diode, einem Vorwiderstand, einer Spannungsquelle(11V Gleichspannung) und einer Widerstandsdekade und einem Voltmeter parallel zur Diode und dem Amperemeter. Durch Veränderung des Widerstands der Widerstanddekade wurden einmal in Sperrrichtung und einmal in Durchlassrichtung verschiedene Ströme und Spannungen gemessen. Hierbei hatten wir zu beachten, dass die Ströme sich im Bereich zwischen 0mA und 50mA(in Durchlassrichtung) bzw. 0mA und 80mA (in Sperrrichtung) bewegen.

Auswertung

Die minimale Größe des Vorwiderstandes wurde mittels der angelegten Spannung(11V) abzüglich der Zenerspannung und den für unsere Messung zu erwartenden Strom(bis zu 50mA bzw. 80mA). Es zeigte sich, dass ein Widerstand von 100Ω ausreichend ist. Beim Auftragen des Durchlassstromes gegen die Durchlassspannung zeigte sich, wie erwartet, dass sich für kleine Spannungen der Durchlassstrom flach ansteigt, bis zu einem gewissen Punkt, ab dem dann der Anstieg stark zunimmt. Gleiches Verhalten zeigen auch Sperrstrom und Sperrspannung.

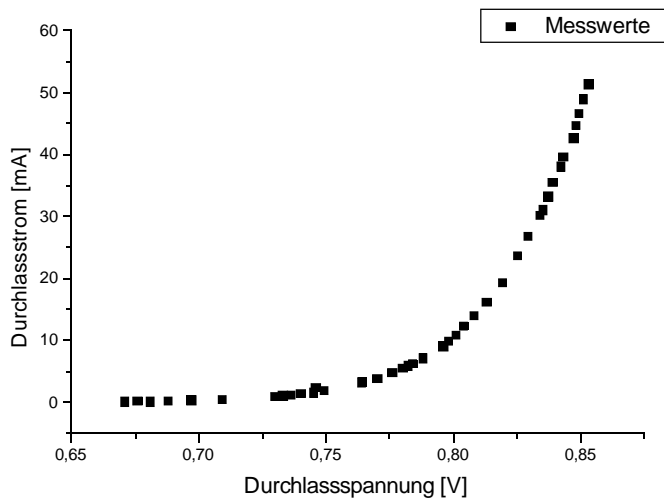


Abb.: Diode in Durchlassrichtung

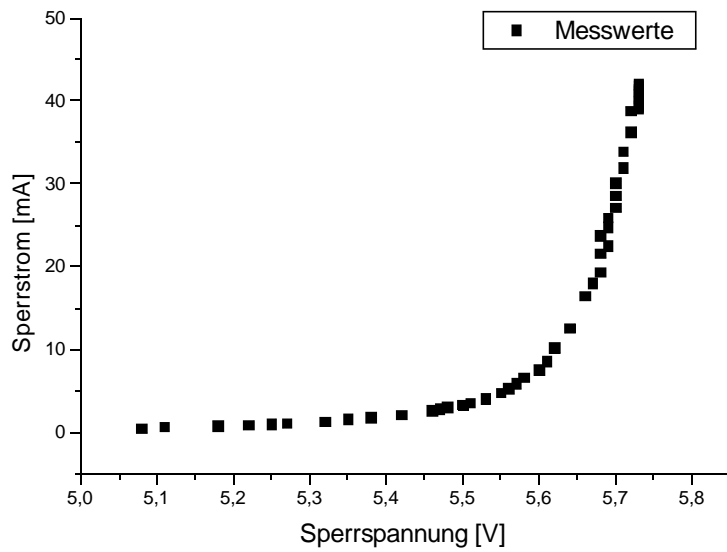


Abb.: Diode in Sperrrichtung

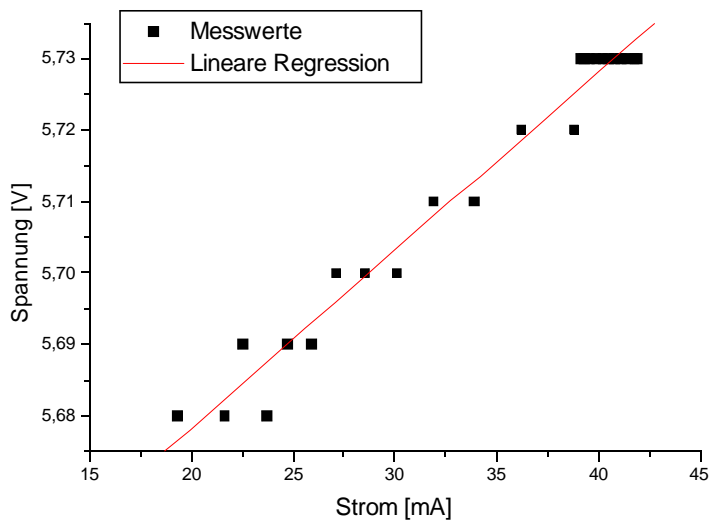


Abb. Differentieller Widerstand

Durch Betrachten des Steilen Teiles des Sperrschaltungsgraphen kann man den Differentiellen Widerstand durch Auftragen der Spannung gegen die Stromstärke dieser Werte und anschließende Lineare Regression erhalten.

$$r_D = (2,49 \pm 0,09)\Omega$$

Aufgabe 2 – Messung der Speicherzeit einer Diode

Durchführung

Wir bauten einen einfachen Stromkreis, welcher aus einer Spannungsquelle (eigentlich Frequenzgenerator), einem ohmschen Widerstand und einer Diode in Serie bestand. Der Spannungsverlauf an der Quelle und an der Diode wurde im Oszilloskop graphisch dargestellt. Die angelegte, rechteckförmige Wechselspannung betrug 1V Volt und hatte eine Frequenz von 1MHz.

Auswertung + Interpretation

Beim Betrachten des Spannungsverlaufs im Oszilloskop konnte man sehen, dass, trotz Umpolung der Eingangsspannung (In der Grafik durch eine grüne Linie markiert), die Diode den Strom noch nicht durchlässt. Der Spannungsverlauf verharrt noch kurze Zeit über der Nulllinie (in der Grafik blau). Diese Zeitspanne ist die Speicherzeit (rot markiert). Ihre Größe konnte durch das hier verwendete Oszilloskop direkt abgelesen werden und sie beträgt für die benützte Diode:

$$t_s = (240 \pm 10) \text{ ns.}$$

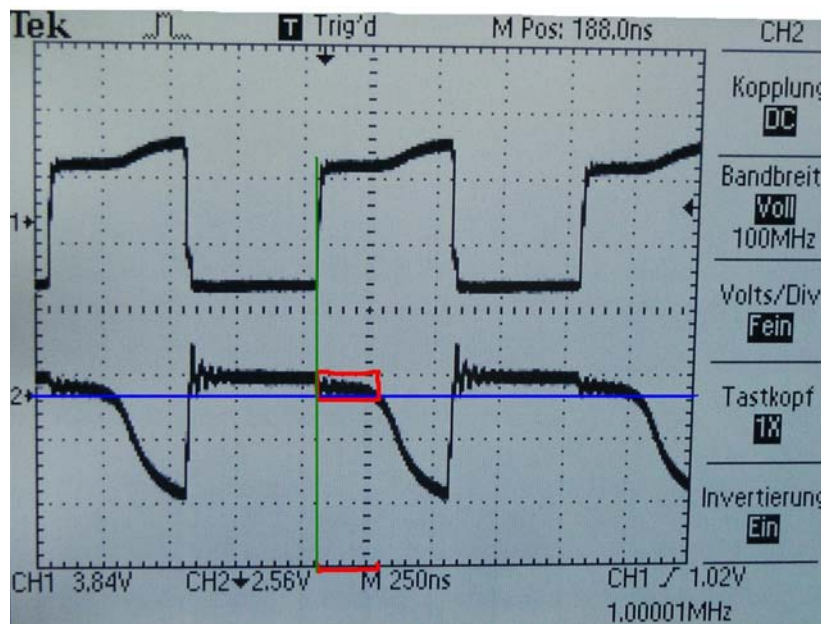


Abb.: nachbearbeitete Fotografie des Oszilloskopdisplays

Die von uns bestimmte Speicherzeit liegt in dem zu erwartenden Bereich (Größenordnung Nanosekunden).

Aufgabe 3 – Aufbau eines Einweggleichrichters

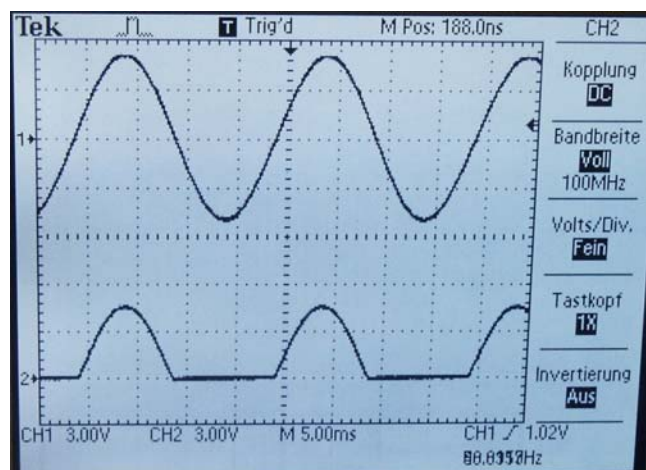
Durchführung

Aus einer Diode und einem Lastwiderstand von einem Lastwiderstand von $1\text{ k}\Omega$ bauten wir eine Einweggleichrichter-Schaltung, zuerst noch ohne Kondensator, welcher zur Spannungsglättung verwendet wird. Mit einem Kanal des Oszilloskops wurde der sinusförmige Verlauf der Eingangswchselspannung dargestellt, mit dem anderen Kanal die Ausgangsspannung. Im späteren Verlauf wurde ein Kondensator (Kapazität: 49 nF) zum Lastwiderstand parallel geschaltet, um einen gleichmäßigeren Verlauf der Ausgangsspannung zu erzielen.

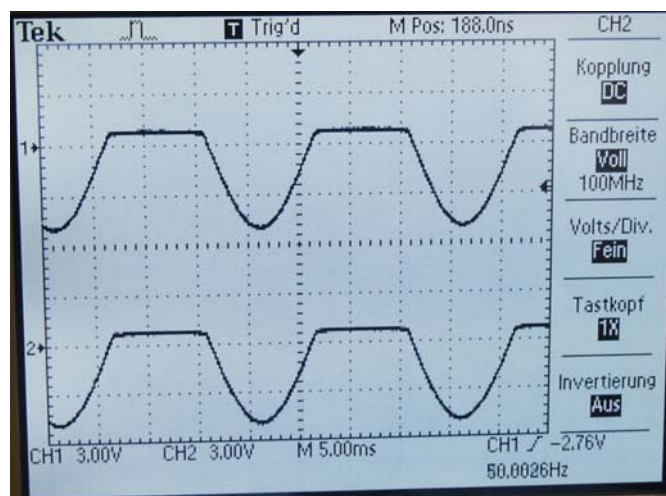
Auswertung

Es war vor dem Einbau des Glättungskondensators der Verlauf der Eingangswchselspannung, der Ausgangsspannung und der Spannung an der Diode selbst schematisch zu zeigen.

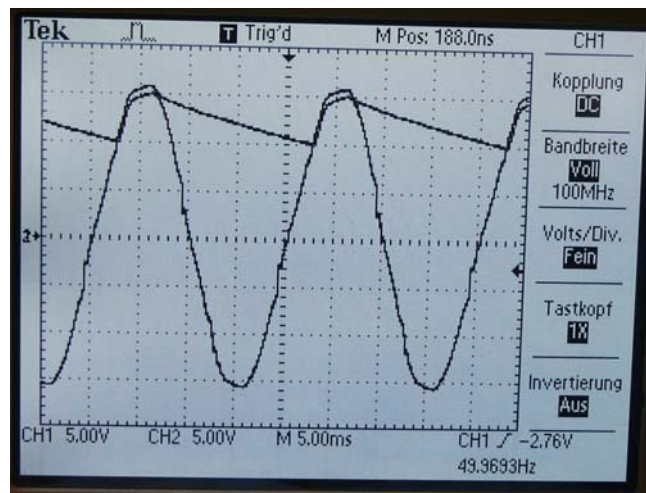
Eingangswchselspannung (oberer Graph) und Ausgangsspannung (unterer Graph):



Sowie die Diodenspannung (hier beide Graphen):



Nach dem Einbau des Glättungskondensators ergab sich folgendes Bild für die Ausgangsspannung, welche sich wie erwartet als eine Art Sägezahnkurve ergeben hat (Graph „über“ der sinusförmigen Eingangsspannung):



Mit einem Voltmeter haben wir zuerst die Eingangswchelspannung gemessen, diese ergab sich zu

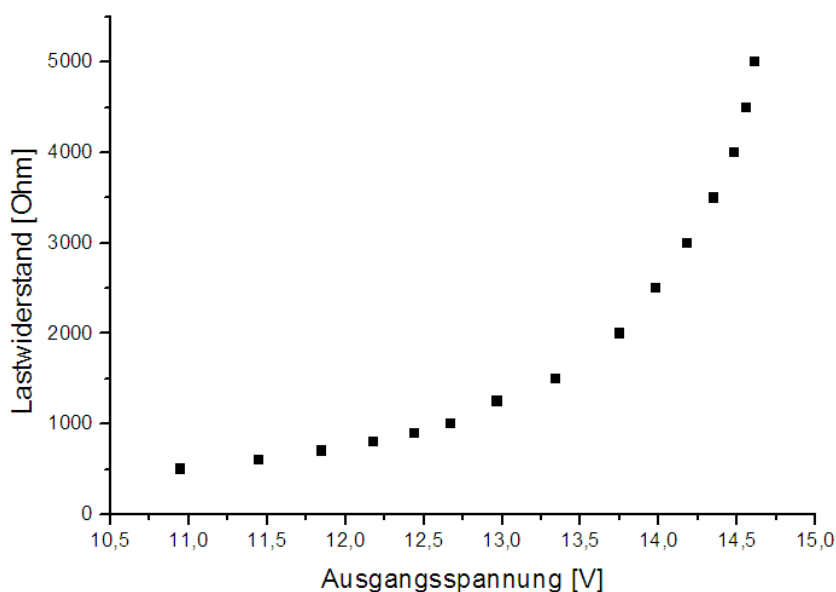
$$U_e = 11,3 \pm 0,1 \text{ V}$$

sowie eine Leerlaufausgangsspannung

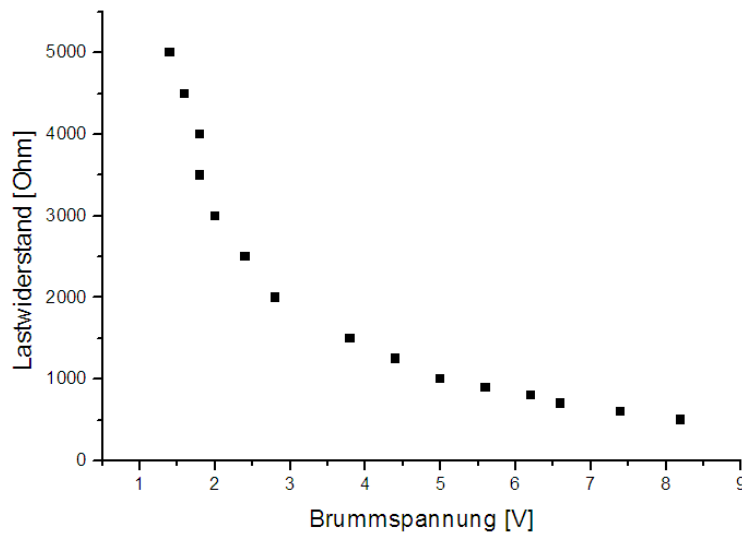
$$U_{a0} = 15,4 \pm 0,1 \text{ V}$$

Nun haben wir jeweils die Minima und Maxima der Ausgangsspannung gemessen, bzw. diese auch nach Formel (3) aus Punkt 4 berechnet, weiters haben wir die Brummspannung gemessen bzw. diese nach Formel (6) aus Punkt 4 berechnet. Die Vergleiche zwischen Messung und Rechnung sollen zeigen, wie gut sich die jeweiligen Berechnungsformeln als Näherung eignen. Die Tabelle dazu findet sich im Anhang „Brückengleichrichter“.

Trägt man die Ausgangsspannung als Funktion des Lastwiderstandes auf, so ergibt sich folgender Graph:



Trägt man die Brummspannung gegen den Lastwiderstand auf, so folgt:



Interpretation

Für beide Graphen wurden jeweils die direkt vom Oszilloskop angegebenen Werte verwendet, welche mit einer großen Ungenauigkeit versehen sind (Fehler bei 0,2 V). Trotzdem lässt sich recht deutlich sehen, dass bei steigendem Lastwiderstand die Ausgangsspannung gegen den Wert der Leerlaufausgangsspannung geht (Vergleiche Punkt 4 Formel (1): Geht der Lastwiderstand R_L gegen Unendlich, so wird der Klammerausdruck 1 und die Ausgangsspannung entspricht der Leerlaufausgangsspannung) und die Brummspannung gegen Null geht (Vergleiche Punkt 4 Formel (2): Geht der Lastwiderstand R_L gegen Unendlich, so geht auch der Nenner gegen Unendlich und die Brummspannung geht damit gegen 0).

Aufgabe 4 – Aufbau eines Brückengleichrichters

Durchführung

Mit 4 Dioden und dem gleichen Lastwiderstand bzw. Kondensator von Aufgabe 3 wurde ein Brückengleichrichter gebaut. Ansonsten entsprach die Durchführung bzw. Auswertung dem vorigen Punkt.

Auswertung

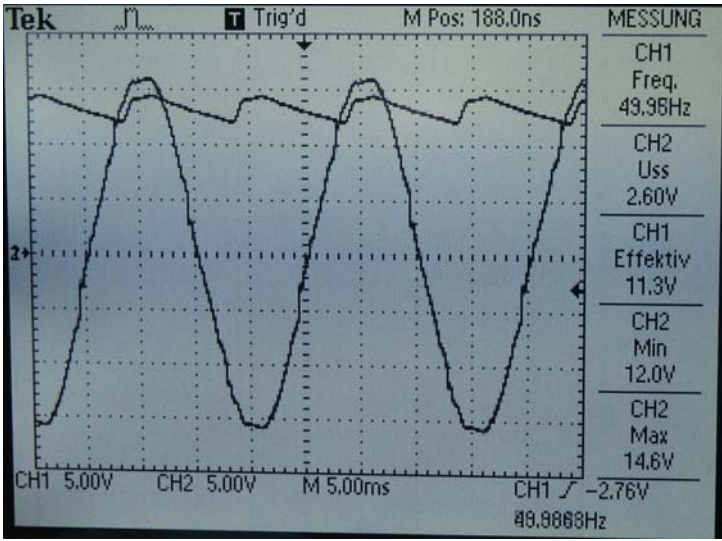
Wie vorher haben wir zuerst mit einem Voltmeter die Eingangswechselspannung gemessen, diese ergab sich zu

$$U_e = 11,3 \pm 0,1 \text{ V}$$

sowie die Leerlaufausgangsspannung

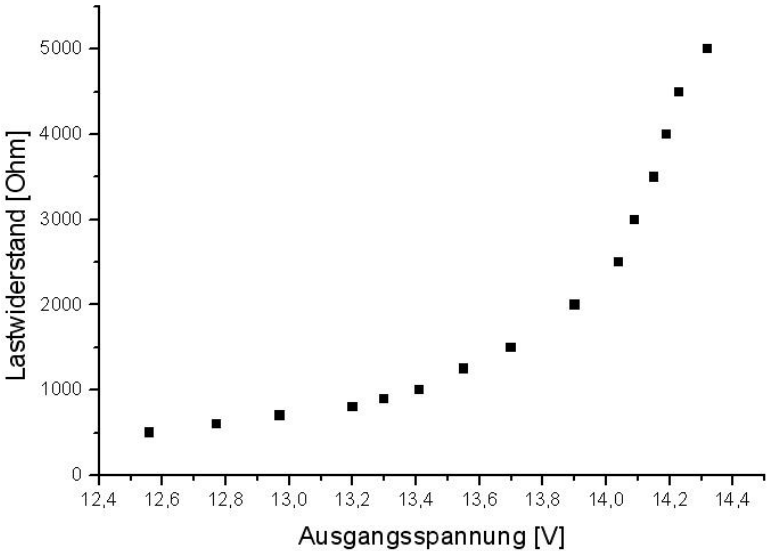
$$U_{a0} = 15,1 \pm 0,1 \text{ V}$$

Analog zum Einweggleichrichter erfolgt die Auswertung zum Aufbau des Brückengleichrichters. Im ersten Bild wird schematisch der Verlauf von Eingangsspannung (Sinuskurve) und Ausgangsspannung (lang gezogene Sägezahnkurve) gezeigt.

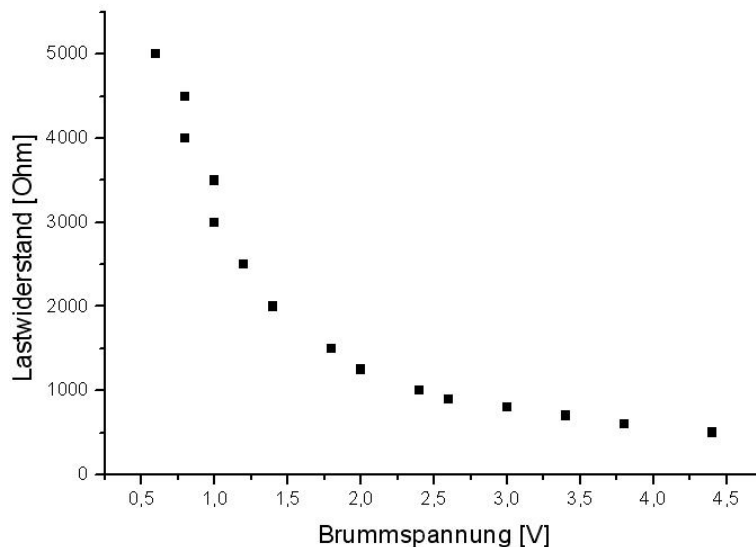


Die Messwerte finden sich auf dem Anhang „Brückengleichrichter“.

Trägt man die Ausgangsspannung als Funktion des Lastwiderstandes auf, so ergibt sich folgender Graph:



Trägt man die Brummspannung gegen den Lastwiderstand auf, so folgt:



Interpretation

Der Zusammenhang der verschiedenen Spannungen mit dem Lastwiderstand entspricht dem, was man durch die Formeln (5) und (6) aus Punkt 4 erwarten kann. Aus den Daten der Messung kann man sehen, dass die Ausgangsspannung beim Brückengleichrichter etwas schneller gegen den Wert der Leerlaufausgangsspannung geht als beim Einweggleichrichter. Als Begründung dafür könnte es sein, dass beim Einweggleichrichter nicht durchgehend Strom fließt, da jede zweite Halbwelle abgeschnitten wird und so erst bei höherem Lastwiderstand R (gemäß dem Ohmschen Gesetz: $U = R \cdot I$) der maximale Spannungswert erreicht wird.

Aufgabe 5 - Spannungsstabilisierungsschaltung

Durchführung

An dem im vorherigen Versuch schon gebauten Brückgleichrichter schlossen wir nun an der Stelle des Lastwiderstands eine Stabilisierungsschaltung ein. Hierzu bauten wir zuerst einmal einen Vorwiderstand (50Ω) und eine Z-Diode in Serie an der Stelle des Lastwiderstands ein. Danach schlossen wir Parallel zu der Z-Diode den Lastwiderstand (Widerstandsdekade) wieder an. Anschließend maßen wir mittels des Oszilloskopes die Brummspannung vor der nun eingebauten Stabilisierungsschaltung und auch dahinter am Lastwiderstand in Abhängigkeit desselben.

Auswertung

Es zeigte sich eine in Rahmen der Messung geringfügige Zunahme des Stabilisierungsfaktors mit zunehmendem Lastwiderstand. Der Stabilisierungsfaktor und der differentielle Widerstand wurden aus der Formel (9) aus dem Verhältnis der Eingangs- und Ausgangsbrummspannung errechnet. Trotz der geringen Genauigkeit des Oszilloskopes (Fehler von $0,2\text{ V}$) und der relativ geringen Widerstandsabhängigkeit haben wir über die Werte des Stabilisierungsfaktors (siehe Messwerte) und der des differentiiellen Widerstandes zu mitteln. Wir erhielten somit einen durchschnittlichen Stabilisierungsfaktor von

$$S = 76 \pm 3$$

im Bereich 50-500Ω. Weiters erhielten wir im selben Bereich einen durchschnittlichen differentiellen Widerstand von

$$r_D = (0,66 \pm 0,02) \Omega.$$

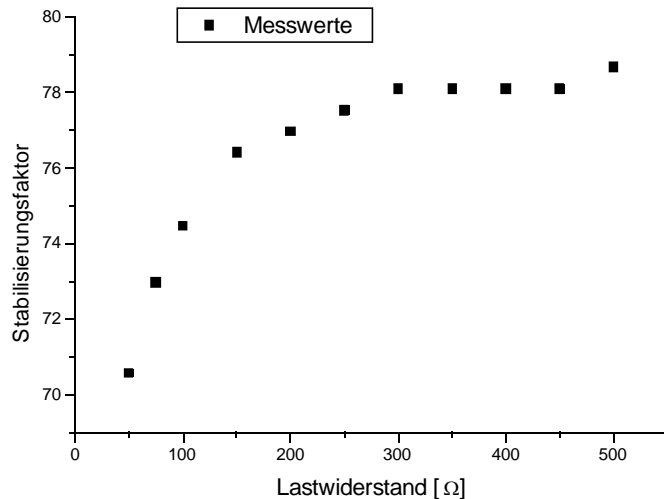


Abb.: Stabilisierungsfaktor in Abhängigkeit des Lastwiderstandes

Interpretation

Eigentlich sollte der differentielle Widerstand der Z-Diode, welcher in Rahmen dieses Versuchs bestimmt wurde mit dem gemessenen differentiellen Widerstand aus dem ersten Versuch halbwegs übereinstimmen. Dies ist jedoch nicht der Fall. Selbst zwischen den größten in diesem Versuch bestimmten Wert und dem Wert aus dem ersten Versuch liegt noch immer ein Faktor $\sim 3,5$. Dies kann sicher nicht allein auf die Ungenauigkeit des Oszilloskopes zurückgeführt werden. Des Weiteren erschien uns auch der berechnete Wert des Stabilisierungsfaktors, welcher sich zwischen 70 und 80 bewegte etwas zu groß für die Qualität unserer Schaltung, doch dieser ergab sich wie leicht nachzuvollziehen ist aus unseren Messwerten. Vielleicht wurde auch der differentielle Widerstand im ersten Versuch etwas ungenau bestimmt, da dort der Beginn des linearen Bereiches nach gutem Augenmaß festgelegt wurde. Die Abhängigkeit des Stabilisierungsfaktors in dem zu untersuchenden Bereich vom Lastwiderstand ist relativ gering. Bei Lastwiderständen ab 200Ω ist er praktisch konstant und darunter lässt er bis 50Ω nur um etwa 10% nach. Vermutlich wäre eine Untersuchung des Bereiches mit einem Lastwiderstand unter 50Ω interessanter gewesen.

Messwerte 1

Die Genauigkeit der Messung liegt jeweils bei der letzten hier sichtbaren Nachkommastelle.

Z-Diode in Durchlassrichtung

I [mA]	U [V]
0,1	0,681
0,1	0,671
0,2	0,676
0,2	0,688
0,3	0,697
0,5	0,709
0,9	0,730
1,1	0,733
1,2	0,736
1,4	0,740
1,6	0,745
1,9	0,749
2,4	0,746
3,2	0,764
3,9	0,770
4,8	0,776
5,6	0,780
5,9	0,782
6,3	0,784
7,1	0,788
9,0	0,796
9,9	0,798
10,9	0,801
12,3	0,804
14,0	0,808
16,2	0,813
19,3	0,819
23,7	0,825
26,8	0,829
30,2	0,834
31,1	0,835
33,2	0,837
35,5	0,839
38,1	0,842
39,6	0,843
42,6	0,847
44,7	0,848
46,7	0,849
48,9	0,851
51,4	0,853

Z-Diode in Sperrrichtung

I [mA]	U [V]
0,5	5,08
0,7	5,11
0,8	5,18
0,9	5,22
1,0	5,25
1,1	5,27

1,3	5,32
1,6	5,35
1,8	5,38
2,1	5,42
2,6	5,46
2,8	5,47
3,0	5,48
3,3	5,50
3,6	5,51
4,1	5,53
4,8	5,55
5,3	5,56
5,9	5,57
6,6	5,58
7,5	5,60
8,6	5,61
10,2	5,62
12,6	5,64
16,5	5,66
18,0	5,67
19,3	5,68
21,6	5,68
22,5	5,69
23,7	5,68
24,7	5,69
25,9	5,69
27,1	5,70
28,5	5,70
30,1	5,70
31,9	5,71
33,9	5,71
36,2	5,72
38,8	5,72
39,1	5,73
39,3	5,73
39,6	5,73
39,9	5,73
40,2	5,73
40,5	5,73
40,8	5,73
41,1	5,73
41,4	5,73
41,8	5,73
41,9	5,73

Messwerte 5

Auf Grund der geringen Genauigkeit des Oszilloskops würde ich in die letzte in der Tabelle sichtbare Stelle der Messwerte für U_1 und U_2 nicht allzu viel Vertrauen legen.

R_L [Ω]	U_1 [mV]	U_1 [V]	U_2 [V]	S	R_D [Ω]
50	153	0,153	10,8	71	0,72
75	148	0,148	10,8	73	0,69
100	145	0,145	10,8	74	0,68
150	140	0,140	10,7	76	0,66
200	139	0,139	10,7	77	0,66
250	138	0,138	10,7	78	0,65
300	137	0,137	10,7	78	0,65
350	137	0,137	10,7	78	0,65
400	137	0,137	10,7	78	0,65
450	137	0,137	10,7	78	0,65
500	136	0,136	10,7	79	0,64