Versuchsprotokoll

WS 93/94 / Do.1 / Platz 11

Frank Pilhofer, Andreas Friedel

Donnerstag, 21. Oktober 1993

Elektronik - Praktikum / Analog - Teil

Diodenkennlinien und Diodenschaltungen

Versuch 2

Inhaltsverzeichnis

Einleitung 3

Grundlagen 3

Dotierung eines Halbleiters 3

Die Diode 3

Aufbau 4

Funktion 4

Die ideale Diode 4

Die reale Diode 4

Zener-Diode 5

Gleichrichter 5

Einweggleichrichter 6

Effektivspannung eines Einweggleichrichters 6

Zweiweggleichrichter 7

Brückengleichrichter 7

Zener-Dioden-stabilisierter Brückengleichrichter 8

Experimente mit Dioden 8

Aufnahme von Durchlaßkennlinien 8

Bestimmung der Durchbruchspannung 10

Untersuchung von Netzgleichrichtern 10

Einweggleichrichter 10

Brückengleichrichter 11

Meßgleichrichter 11

Zenerdioden-stabilisiertes Netzgerät 11

Einleitung

In diesem Versuch wird die Welt der linear analogen Elektronik verlassen. Die Diode ist im Gegensatz zu den bisher beobachteten Schaltungen ein "nichtlineares Element". Eine Änderung der Eingangsspannung zieht hier keine proportionale Änderung der Ausgangsspannung nach sich (auch Kondensator und Spule sind bei Gleichspannungen lineare Bauelemente).

Die Diode ist der Grundstein heutiger Elektronik. Wurden sie zunächst in Röhrenform gebaut, so besteht sie heute meistens aus den hier verwendeten Halbleitern. Verwendung finden sie in einer Vielzahl elektronischer Schaltungen und nicht zuletzt dem Transistor, dem Baustein moderner Computer.

Grundlagen

Dotierung eines Halbleiters

Als Halbleiter werden überwiegenderweise Silizium und Germanium verwendet. Beide Elemente sind vierwertig. Im Kristallgitter sind alle äußeren Elektronen in eine Atombindung integriert und (Valenzelektronen) sind dementsprechend schlecht zur elektrischen Leitung zu verwenden. Erst bei hohen Spannungen lösen sich Elektronen aus dem Verbund.

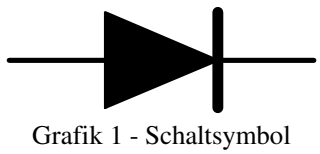
Um die elektrische Leitfähigkeit zu verbessern, werden die Kristalle "dotiert", d.h. gezielt mit Fremdatomen verunreinigt.

Werden zur Dotierung 3-wertige Atome verwendet (p-Dotierung), so kann dieses im Gitter eine der vier möglichen Bindungen wegen Elektronenknappheit nicht "annehmen"; es bleibt ein "Elektronenloch". Trotz elektrischer Neutralität werden sich zusätzliche Elektronen leicht in dieses Loch integrieren, um die Bindung zum Nachbaratom zu erfüllen. Genauso einfach können die Elektronen aus dem nun negativ geladenen Atomverbund herausgelöst werden: Der Halbleiter ist nun elektrisch leitend.

Zur Dotierung können auch 5-wertige Atome verwendet werden (n-Dotierung). Hier ist der Effekt umgekehrt: Ein überschüssiges Elektron, welches keine Bindung mit Nachbaratomen eingehen kann, kann mit niedrigem Energieaufwand gelöst werden.

Die Diode

Die Diode ist dadurch gekennzeichnet, Strom (zumindest idealerweise) nur in einer Richtung passieren zu lassen. Nebenstehend ist das Schaltsymbol der Diode gezeichnet. Der Pfeil zeigt in "Durchlaßrichtung": Liegt eine Spannung in dieser Richtung

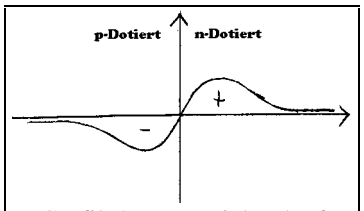


Grafik 1 - Schaltsymbol einer Diode

(technische Stromrichtung!) an, so wird die Diode leitend. Wird umgepolt, so blockiert die Diode (symbolisiert durch den Sperrstrich).

Aufbau

Eine Diode besteht aus zwei unterschiedlich dotierten Halbleitern, z.B. in der einen Hälfte p-dotiert und in der anderen n-dotiert. Werden diese beiden Schichten zusammengefügt, so fließt ein kurzzeitiger Strom. Durch die Grenzschicht diffundieren Elektronen aus der n-dotierten in die p-dotierte Hälfte, wo sie die "Löcher" auffüllen. Aus anderer Sicht kann der Effekt natürlich auch als Wanderung der Löcher in die n-dotierte Schicht aufgefaßt werden, wo sich diese mit überschüssigen Elektronen auslöschen.



Grafik 2 - Potentialverlauf

Diese Wanderung stoppt jedoch schon nach kurzer Zeit. In der Grenzschicht ist der p-dotierte Halbleiter nun echt negativ geladen und umgekehrt (Sperrschicht). Auf diese Weise entsteht ein elektromagnetisches Feld, welches die Diffusion unterbindet (d.h. der vom Feld verursachte Strom entspricht dem Diffusionsstrom). Der Potentialverlauf zu diesem Zeitpunkt ist in dem nebenstehenden Diagramm dargestellt.

Funktion

Wird nun eine Spannung in Durchlaßrichtung an die Diode angelegt, so werden bildlich gesprochen am p-dotierten Ende Löcher, am n-dotierten Ende Elektronen nachgefüllt. Das Potentialgefälle aus Grafik (2) verschwindet, der Strom fließt.

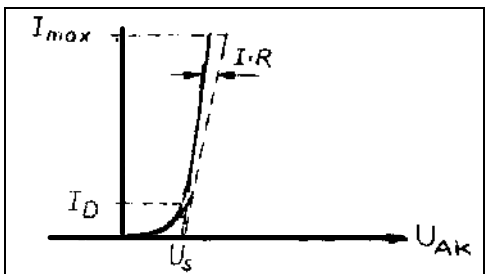
Bei Umpolung der Spannung werden jedoch weitere Elektronen aus dem n-dotierten Halbleiter in den p-dotierten Teil "herübergesogen" und umgekehrt. Das Potentialgefälle vergrößert sich, die Sperrschicht verbreitert sich; in diesem Zustand kann kein Strom fließen.

Die ideale Diode

Eine ideale Diode sperrt für alle Spannungen in Sperrrichtung, so daß kein Strom mehr fließen kann. Ist die Diode in Durchlaßrichtung geschaltet, soll sie nur einen Ohm'schen Widerstand besitzen.

Die reale Diode

Im Normalfall ist eine reale Diode weit vom physikalischen Wunschdenken der idealen Diode entfernt. In Sperrichtung fließt ein sehr kleiner sogenannter Sperrstrom (Größenordnung μA). Auch bei positiven Spannungen verhält sich die reale Diode keineswegs wie ein Ohm'scher Widerstand. Zunächst muß die Potentialdifferenz (Grafik 2) überwunden werden; erst danach

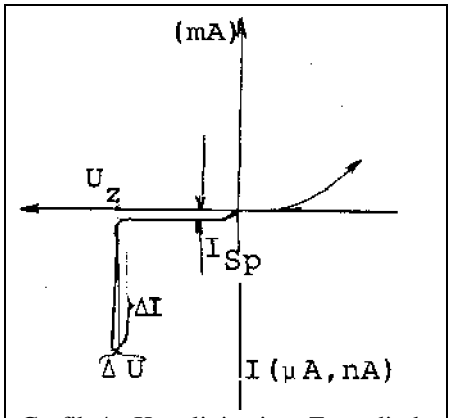


Grafik 3 - Kennlinie einer Diode

steigt der Strom an der Diode exponentiell an. In Grafik (3) ist das Verhältnis von Spannung zu Strom grafisch aufgetragen. Diese Grafik wird "Kennlinie" genannt. Wichtig ist insbesondere die "Knickspannung" U_S, bei der die Kurve beginnt, scharf nach oben abzuknicken.

In der Theorie von Shockley wird auch eine Formel für den Kennlinienverlauf genannt. So gilt für den Stromfluß $I(U_{AK}) = I_{Sp}(T)\left(e^{\frac{U_{AK}}{U_T}} - 1\right)$. Dabei ist $I_{Sp}(T)$ der temperaturabhängige Sperrstrom und $U_k = \frac{kT}{e}$ die sogenannte Temperaturspannung. In dieser Formel wird jedoch der Ohm'sche Widerstand des Halbleiters nicht berücksichtigt.

Zener-Diode



Grafik 4 - Kennlinie einer Zenerdiode

Eine Zenerdiode verhält sich bei positiven Spannungen genauso wie die zuvor besprochenen realen Dioden. Zusätzlich tritt jedoch im Bereich negativer Spannung ein weiterer Effekt auf: wird die Zenerspannung unterschritten, so bricht die Diode durch. In diesem Zustand kann der Strom wie in Durchlaßrichtung fließen. Die Kennlinie einer Zenerdiode ist nebenstehend (Grafik 4) aufgezeichnet. Eine Zenerdiode beruht entweder auf dem Lawineneffekt oder auf dem Zenereffekt. Bei ersterem werden Leitungselektronen durch die angelegte Spannung so stark beschleunigt, daß an der Grenzschicht zwischen Leiter und Halbleiter Elektronen aus dem Atomverband herausgeschlagen werden. Diese werden ebenfalls beschleunigt und brechen weitere Elektronen frei etc. Es entsteht eine Lawine von Elektronen, die für die elektrische Leitung sorgt.

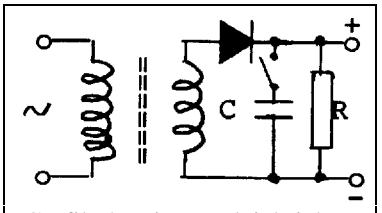
Beim Zenereffekt werden im Verarmungsbereich Bindungen aufgebrochen und die nötigen Ladungsträger bereitgestellt. Hier müssen Felder in der Größenordnung $10^6 \frac{V}{cm}$ überwunden werden. Zur Verbesserung dieses Phänomens wird bei Zenerdioden daher die Sperrschicht dünn gehalten.

Gleichrichter

Gleichrichter wandeln eine Wechselspannung in eine Gleichspannung um. Dieses Problem ergab sich, als die Entscheidung bei der Stromübertragung zugunsten der Wechselspannung ausfiel und am Verbraucherort weiterhin für einige Anwendungen Gleichstrom benötigt wurde.

Es ergibt sich natürlich sofort die Forderung, daß möglichst viel von der Eingangsleistung des Wechselstroms umgewandelt und am Ausgang des Gleichrichters abgegeben wird. Auch soll die Ausgangsspannung möglichst konstant sein.

Einweggleichrichter



Grafik 5 - Einweggleichrichter

Der Einweggleichrichter ist die einfachste Gleichrichterschaltung und wird mit einer einzigen Diode aufgebaut. Wächst die Eingangsspannung über die Knickspannung der Diode, wird diese leitend; Strom läuft über den Verbraucher. In der negativen Halbwelle des Eingangssignals sperrt die Diode. Der "gleichgerichtete" Strom hat hier noch überhaupt keine Ähnlichkeit mit einer Gleichspannung; es wird immer nur eine Sinushalbwelle gefolgt von einer Pause übertragen - wobei die übertragene Spannung noch um die Knickspannung der Diode abfällt.

Um die Kurve noch ein wenig zu glätten, kann noch ein Kondensator parallel zum Verbraucher geschaltet werden. Wird die Diode leitend, so lädt sich der Kondensator auf. Sperrt die Diode eine knappe halbe Periode später, so entlädt sich der Kondensator über den Verbraucher und erhält so noch eine (exponentiell abfallende) Spannung aufrecht. Noch bevor sich der Kondensator (mit ausreichend großer Kapazität) entladen hat, beginnt die nächste Aufladephase.

Effektivspannung eines Einweggleichrichters

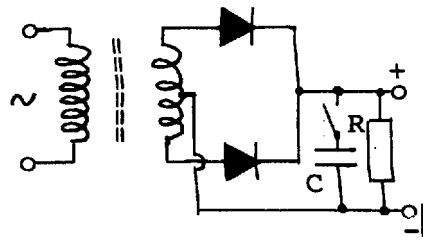
Hier soll kurz und beispielhaft die Effektivspannung eines Gleichrichters bestimmt werden. Um das ganze möglichst einfach zu halten, wird das ganze am Einweggleichrichter ohne Ladekondensator durchgerechnet.

Als Voraussetzungen wird eine Eingangsspannung mit einer Amplitude von 8,8V und, zur Vereinfachung, eine ideale Diode mit 0,6V Knickspannung verwendet.

Wie in Versuch 0, wo die Effektivspannung eines Sinussignals ausgerechnet wurde, wird hier die übertragene Leistung berechnet. Für Gleichstrom gilt $P = UI = \frac{1}{R}U^2$; da das Ausgangssignal hier jedoch nicht im entferntesten eine Gleichspannung ist, wird wie beim Wechselstrom über eine sinnvolle Zeit, z.B. eine Periode integriert: $P = \frac{1}{TR}\int_0^T U^2(t)dt$. Nun wird nur die eine Sinushalbwelle übertragen, also ist $\int_{T/2}^{T} U^2(t)dt = 0$. Weiterhin muß die Eingangsspannung erst 0,6V erreichen, bis die Diode leitend wird. Im gegebenen Fall ist die Diode im Zeitraum $t = \frac{T\sin^{-1}\frac{0,6}{8,8}}{2\pi} = (0,011T; 0,489T)$ leitend. In diesem Bereich entspricht der Ausgangssinus dem Eingangssinus; abzüglich der 0,6V, die an der Diode abfallen. Vom fertigen Sinus ist also noch dieser Betrag abzuziehen: $P = \frac{1}{2\pi R}\hat{U}^2\int_{0,068}^{3,073}\left(\sin\omega t - \frac{0,6}{8,8}\right)^2 dt$. Nach numerischer Lösung des Integrals ergibt sich $P = \frac{0,21}{R}\hat{U}^2$ oder die Effektivspannung $U_{eff} = 0,46\hat{U}$.

Zweiweggleichrichter

In den durchgeführten Versuchen wird der Zweiweggleichrichter nicht behandelt; deshalb soll dieser nur mit seiner Schaltung (Grafik 6) und zwei Bemerkungen erwähnt werden. Beim Zweiweggleichrichter wird über einen zweiten Kondensator die negative Halbwelle des Eingangssignals "gekippt" und somit nutzbar gemacht. Es werden nur zwei Dioden, dafür jedoch ein Trafo mit Mittelabgriff benötigt. Dieser Mittelabgriff dient als neuer negativer Pol, was noch den unerwünschten Effekt nach sich zieht, daß die Ausgangsspannung auch in der Amplitude nur halb so groß wie die Eingangsspannung wird. Die Ausgangsleistung ist zwar zeitlich stabiler, aber wegen der halbierten Amplitude auch nicht höher als beim Einweggleichrichter.

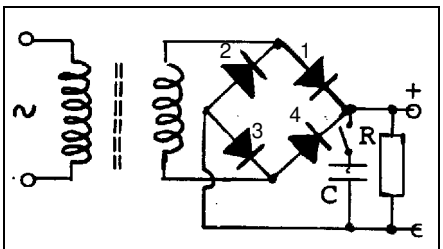


Grafik 6 - Zweiweggleichrichter

Brückengleichrichter

Der Brückengleichrichter vereint die Vorteile von Einweg- und Zweiweggleichrichter. Beide Halbwellen der Wechselspannung werden unter Übertragung der vollen Amplitude ausgenutzt. Für den Aufbau werden 4 allerdings Dioden benötigt, was in der Urzeit der Röhrendioden noch viel zu teuer und aufwendig (thermische Kühlung) war.

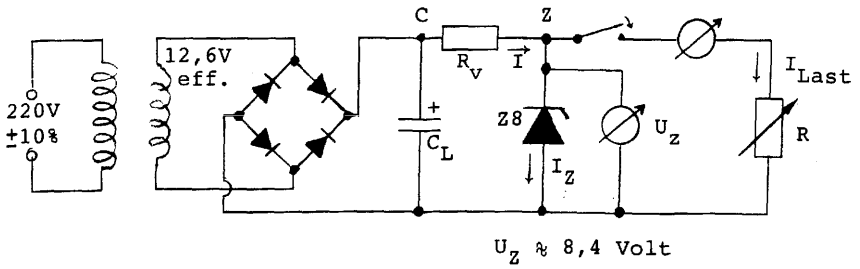
Heutzutage, wo Dioden nur noch Pfennige kosten und weder Klimaanlage noch eigenen Schrank mehr benötigen, hat der Brückengleichrichter die erstgenannten Schaltungen verdrängt.



Grafik 7 - Brückengleichrichter

Der Aufbau eines Brückengleichrichters ist in der nebenstehenden Grafik (7) dargestellt. Während der positiven Halbwelle der Eingangsspannung fließt der Strom vom Trafo über Diode 1 zum Pluspol des Verbrauchers und von diesem über Diode 3 zurück; Die Dioden 2 und 4 sind gesperrt. In der nächsten halben Periode fließt der Strom über Diode 4 zum Verbraucher und anschließend über Diode 2 zurück während 1 und 3 sperren. Ein kleiner Nachteil des Brückengleichrichters ist es noch, daß der Strom stets über 2 Dioden fließen muß. Auf diese Weise fällt die Knickspannung an beiden Dioden ab. Die Amplitude der Ausgangsspannung liegt also um $2U_S$ unter der Eingangsamplitude. Doch auch dieser Wert ist noch deutlich besser als beim Zweiweggleichrichter.

Zener-Dioden-stabilisierter Brückengleichrichter



Grafik 8 - Brückengleichrichter mit Zenerdiodenstabilisierung

Zusätzlich zur Schaltung des Brückengleichrichters wird hier eine Zenerdiode in Sperrichtung parallel zum Glättkondensator geschaltet. Mittels dieses Tricks kann die Ausgangsspannung sehr stark stabilisiert werden. Der Brückengleichrichter liefert mit dem Glättkondensator eine Ausgangsspannung in der Größenordnung (mit den in der Grafik angegebenen Werten) 11V mit einer Brummspannung von ungefähr 1V. Dies liegt unterhalb der Zenerspannung der Zenerdiode, diese wird also unter sehr kleinem Innenwiderstand leitend. Daher fließt ein Strom durch die Diode und bewirkt einen Spannungsabfall am Vorwiderstand R_V. Wir können uns leicht überlegen, daß sich ein stabiler Zustand einstellen muß, bei dem an der Diode ungefähr die Durchbruchspannung anliegt. Schon bei kleinen Spannungsschwankungen ändert sich der Stromfluß durch die Diode und damit auch der Spannungsabfall an R_V erheblich. Eine geänderter Spannungsabfall am Vorwiderstand ändert jedoch auch die Spannung an der Zenerdiode. Dieser Mechanismus ist eine gegenläufige Rückkopplung, denn eine Spannungsänderung an der Zenerdiode bewirkt eine Spannungsänderung an gleicher Stelle in entgegengesetzter Richtung.

Auf diese Weise liegt an der Zenerdiode also höchstens eine Spannung $U_Z \approx 8,4V$ an, was gleichzeitig die Spannung am Verbraucher ist. Dabei ist es unerheblich, wie groß die Ausgangsspannung des Brückengleichrichters ist. Solange diese genügend weit über der Zenerspannung ist und der Kondensator eine ausreichende Kapazität besitzt, liefert die Schaltung eine sehr gute (d.h. stabile und glatte) Gleichspannung.

Der in Reihe vor Zenerdiode und Verbraucher geschaltete Widerstand R_V dient als Strombegrenzer für die Diode, welche ansonsten bei einer Belastung von -12V durchbrennen würde.

Experimente mit Dioden

Aufnahme von Durchlaßkennlinien

Die Dioden wurden zur Aufnahme ihrer Kennlinien an eine Kennlinienschreiber angeschlossen. Dieser legt variable Spannungen an die Diode an, mißt den fließenden Strom und stellt das Resultat auf einem Oszillographen dar.

Die Durchlaßkennlinien der durchgemessenen Dioden befinden sich im Anhang.

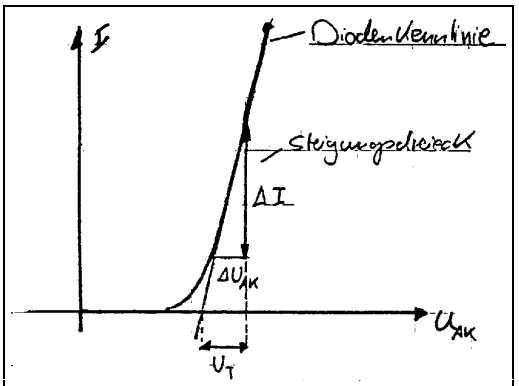
Für die einzelnen Dioden wurde auch die Durchbruchspannung bestimmt. Hierfür wird die Spannung verwendet, bei der ein Strom von 2mA fließt. Oberhalb dieses Stromes verhalten sich die Dioden schon recht gut wie ein Ohm'scher Widerstand (annäherungsweise linear verlaufende Kurve).

Nummer	Typ	Knickspannung	Nummer	Typ	Knickspannung
1	Silizium	0,56V	6	LED - grün	1,8V
2	Germanium	0,42V	7	LED - blau	2,5V
3	Silizium	0,55V	8	Zener	0,7V
4	LED - rot	<defekt>	9	Schottky	0,28V
5	LED - gelb	1,8V	10	Tunnel	----

Für je eine Silizium- und Germaniumdiode sollen nun U_T und I_{Sp} aus der Schockley'schen Diodenformel bestimmt werden. Nach diesen Werten kann durch Einsetzen zweier Meßpunkte aufgelöst werden. Nach der Berechnung von $U_T = \frac{U_2 - U_1}{\ln I_2 - \ln I_1}$ kann der Sperrstrom direkt durch $I_{Sp} = I_1 e^{-U_1 / U_T}$ bestimmt werden.

Für die Germaniumdiode (2) ergeben sich $U_T = 0,23V$ und $I_{Sp} = 318\mu A$; für die Siliziumdiode (3) gilt $U_T = 0,53mV$ und $I_{Sp} = 46nA$.

Im Kennlinienfeld läßt sich U_T an dem differentiellen Widerstand im Durchlaßbereich ablesen. Wegen $\frac{1}{r_i} = \frac{dI}{dU_{AK}} = \frac{1}{U_T} I_{SP} e^{U_{AK}/U_T} \approx \frac{I}{U_T}$ gilt $U_T \approx I r_i$. Die Temperaturspannung läßt sich also annäherungsweise über ein Steigungsdreieck an der Kennlinie bestimmt werden (siehe Grafik 9).



Grafik 9 - Ablesen der Temperaturspannung

Ein interessantes Kurvenbild zeigt die Tunneldiode, die auf dem quantenmechanischen Tunneleffekt beruht. Für sehr kleine Spannungen (hier <0,03V) verhält sich die Tunneldiode nahezu wie ein Ohm'scher Widerstand. Darüber hinaus wird die Kurve plötzlich flacher und wird sogar negativ. Im Bereich zwischen ca. 0,05V und 0,38V besitzt die Tunneldiode einen negativen differentiellen Widerstand, d.h. eine steigende Spannung resultiert in einem abfallenden Strom.

Mit diesem Kurvenverlauf ist der verwendete Kennlinienschreiber einfach überfordert. Dieser sucht für die jeweils angelegte Spannung Schnittpunkte der Kennlinie mit der jeweiligen Widerstandsgeraden (eingezeichnet). Da der Schreiber die Spannung abwechselnd linear erhöht und anschließend linear erniedrigt, läuft diese Gerade parallel von links unten nach rechts oben und zurück. Bei diesem Verfahren treten jedoch Unstetigkeiten auf; an diesen Stellen verliert der Schreiber den Kontakt zur Kennlinie und findet ihn an völlig anderer Stelle wieder. Dabei wird der Bereich negativem differentiellen Widerstands nicht erfaßt und daher auch nicht auf

dem Schirm dargestellt. In der Zeichnung ist der fragliche Bereich dünn mit Bleistift angedeutet.

Bestimmung der Durchbruchspannung

Nun wird die Spannung umgepolt und die Zenerspannung der Dioden untersucht. In der folgenden Tabelle sind die beobachteten Durchbruchspannungen (sofern sie im Bereich bis 40V lagen) eingetragen:

Nummer	Typ	Zenerspannung	Nummer	Typ	Zenerspannung
1	Silizium	------	6	LED - grün	18V
2	Germanium	------	7	LED - blau	------
3	Silizium	------	8	Zener	8V
4	LED - rot	<defekt>	9	Schottky	------
5	LED - gelb	36V	10	Tunnel	0V

Bei den Dioden 1-3, 7 und 9 war im untersuchten Bereich kein Durchbruch zu finden. Die "Zenerspannung" der Tunneldiode kann wohl kaum als solche aufgefaßt werden. Unterhalb von 0V verhielt sich die Tunneldiode wie ein kleiner Ohm'scher Widerstand. Die Kennlinie entsprach in diesem Bereich einer Geraden.

Untersuchung von Netzgleichrichtern

Wie in den Grundlagen beschrieben, werden nun Einweg- und Brückengleichrichter aufgebaut und durchgemessen. Die entsprechenden Kurvenverläufe sind im Anhang aufgezeichnet.

Einweggleichrichter

Als Eingangssignal wurde das mehr oder weniger gut sinusförmige Ausgangssignal eines Netztrafos verwendet. Ohne eingeschalteten Kondensator lieferte der Einweggleichrichter die positiven Halbwellen des Eingangssignals, wobei jedoch ca. 0,6V an der Gleichrichterdiode abgefallen sind.

Wurde der Kondensator eingeschaltet, jedoch kein Laststrom abgenommen, ergab sich eine bereits sehr stabile Gleichspannung in Höhe der Spannungsamplitude des Netztrafos.

Bei Abnahme eines Laststroms verschlechterte sich die Signalform jedoch deutlich. Erreichte das Eingangssignal sein Maximum, lud sich der Kondensator auf. Während jedoch die Eingangsspannung absank, floß ein steter Strom vom Kondensator über den Verbraucher ab, wobei die Kondensatorspannung ebenfalls abnahm.

Es zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Qualität des Ausgangssignals, der Kapazität des Kondensators und dem Laststrom. Je größer der Kondensator und je kleiner der Laststrom, desto stabiler konnte die Gleichspannung durch den Kondensator aufrechterhalten

werden. Bei vergrößertem Laststrom und/oder kleinerem Kondensator wurde dieser zu schnell entladen, die Spannung brach zusammen, bevor das Eingangssignal den Kondensator wieder aufzuladen vermochte.

Brückengleichrichter

Das Resultat des Brückengleichrichters war durchweg zufriedenstellender als das des Einweggleichrichters. Schon ohne Glättkondensator lag am Ausgang wegen der Ausnutzung beider Sinushalbwellen des Eingangs eine höhere Effektivspannung an - trotz des doppelten Spannungsabfalls über zwei Dioden.

Da der Kondensator in diesem Fall nur die Hälfte der Zeit des Einweggleichrichterglättkondensators überbrücken mußte, war er auch durchaus besser in der Lage, die erwünschte Amplitudenspannung aufrechtzuerhalten. Daß die Kurve in der Zeichnung schlechter aussieht als bei ersterem liegt natürlich auch daran, daß wir in der Einweggleichrichterschaltung einen 1mF, hier jedoch nur einen 0,5mF Kondensator verwendet haben.

In einem weiteren Diagramm wurde die Brummspannung beim Brückengleichrichter untersucht. Aufgrund des verwendeten Lastwiderstandes, der nur begrenzt belastbar war, konnte die Kurve nur bis 1A aufgenommen werden. Bei der Messung mit kleinem Ladekondensator haben wir bereits oberhalb von 0,8A auf weitere Messungen verzichtet; die Brummspannung erreichte hier die Größenordnung der Amplitude der Gleichspannung.

Es zeigte sich wie erwartet, daß ein großer Kondensator (hier 10fach) hilft, die Brummspannung möglichst klein zu halten.

Meßgleichrichter

In diesem Versuch wurde die Amplitude des Ausgangssignals am Oszillographen mit dem Ausschlag eines Meßinstruments verglichen. Bei einem Lastwiderstand von 70Ω, einem Kondensator von 1mF und einer Spannungsamplitude von 8,8V zeigte das Meßinstrument einen Ausschlag von 7,4V. Wurde der Kondensator entfernt, schrumpfte die Effektivspannung des Signals auf 2,7V.

Zenerdioden-stabilisiertes Netzgerät

Der Vorwiderstand $R_V = 47\Omega$ der Zenerdiode ist gut gewählt. Der Netztrafo liefert eine Effektivspannung von 12,6V, das entspricht einer Spannungsamplitude von $\hat{U} = \sqrt{2}U_{eff} \approx 17,8V$. Davon fallen bereits 1,2V über die Gleichrichterdioden ab, übrig bleiben 16,6V. Über die Zenerdiode fallen auf jeden Fall 8,4V ab, am Widerstand liegt also eine Maximalspannung von $U_R = 8,2V$ an, womit maximal $I_R = \frac{U_r}{R} = 175mA$ Strom fließen. Der maximal zulässige Stromfluß ist für die Diode mit 220mA angegeben. Damit wird der zulässige Meßbereich, sogar inklusive genügend Toleranz eingehalten.

Bei Heruntersetzen der Trafospannung konnte keine Änderung der Ausgangsspannung beobachtet werden. Eine merkliche Änderung gab es erst, wenn die Spannungsamplitude in die Nähe der Durchbruchspannung oder darunter kam. Solange die Zenerdiode zu jedem Zeitpunkt geöffnet ist, ist die Spannung stabil.

Für den Laststrom läßt sich ähnliches sagen. Solange er klein genug ist, passiert nichts. Erst wenn die Diode (in der Entladezeit des Kondensators) schließt, sinkt die Ausgangsspannung. Das kann natürlich durch Erhöhen der Kapazität ausgeglichen werden.

Nachträgliche Anmerkung: *An dieser Stelle blieben ein paar Fragen unbeantwortet. Einerseits meinte unser Assistent am Versuchstag, diese Fragen seien nicht so wichtig, andererseits hat er bei Rückgabe des Protokolls ziemlich gemeckert ...*