
E5 Gleichrichterschaltungen

Physikalische Grundlagen

Grundbegriffe
Halbleiterdiode
Vakuumdioden
Mittelwerte
Effektivwerte
Drehspulmessgerät für Gleich- und Wechselspannungen
Aufbau eines Oszillografen

1. Gleichrichtung

Gleichrichterschaltungen dienen der Umwandlung von Wechselspannungen in Gleichspannungen. Dazu werden als Gleichrichter bezeichnete Bauelemente verwendet, deren elektrischer Widerstand von der Polarität der angelegten Spannung abhängt. Für die eine Halbwelle einer anliegenden Wechselspannung haben sie einen geringen Widerstand (Durchlassrichtung), für die andere Halbwelle einen hohen Widerstand (Sperrrichtung). So können Wechselspannungen durch Gleichrichter in pulsierende Gleichspannungen umgewandelt werden. Technisch von Gleichrichterschaltungen dienen der Umwandlung von Wechselspannungen in Gleichspannungen. Dazu werden als Gleichrichter bezeichnete Bauelemente verwendet, deren elektrischer Widerstand von der Polari-

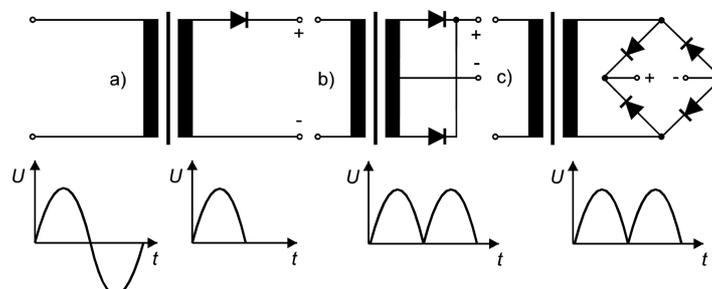


Abbildung 5.1: Gleichrichterschaltungen

tät der angelegten Spannung abhängt. Für die eine Halbwelle einer anliegenden Wechselspannung haben sie einen geringen Widerstand (Durchlassrichtung), für die andere Halbwelle einen hohen Widerstand (Sperrrichtung). So können Wechselspannungen durch Gleichrichter in pulsierende

Gleichspannungen umgewandelt werden. Technisch von Bedeutung sind besonders Gleichrichter auf Halbleiterbasis und in Spezialgebieten weiterhin Vakuumdioden. Die drei wichtigsten Schaltungsarten von Gleichrichtern unterscheiden sich im Bedarf an Bauelementen und in der Qualität der gleichgerichteten Spannung (Abb. 5.1). Bei Anliegen einer harmonischen Wechselspannung $U = U_m \sin \omega t$ wird bei der Einweggleichrichtung (Abb. 5.1a) nur die positive oder nur die negative Halbwelle ausgenutzt, während bei der Zweiweggleichrichtung (Abb. 5.1b und c) beide Halbwellen zur Gleichrichtung beitragen. Bei der Einweggleichrichtung steht dem Vorteil der geringen Anzahl an Bauelementen der Nachteil eines verhältnismäßig höheren Aufwandes zur nachfolgenden Glättung des besonders stark pulsierenden Signals gegenüber. Die Zweiweggleichrichtung (Abb. 5.1b) erfordert dagegen einen Transformator mit Mittelanzapfung. Um die gleiche Amplitude wie bei der Einweggleichrichtung zu erreichen, muss jede Teilwicklung die gleiche Spannung liefern wie die Wicklung bei der Einweggleichrichtung. Diesen Nachteil vermeidet die Graetzschaltung (Abb. 5.1c); allerdings ist hier gegenüber der Schaltung in Abb. 5.1b die doppelte Anzahl von Dioden.

2. Messung von Gleich- und Wechselspannungen

Das Prinzip soll wegen der besseren Anschaulichkeit an Drehspul-Spannungsmessern mit analoger Anzeige dargestellt werden. Sie beruhen auf der Messung geringer Gleichströme, indem die sich in einem Permanentmagneten befindende Drehspule infolge der magnetischen Wirkung des Stromes eine der Stromstärke proportionale Drehung erfährt. Wegen des konstanten Innenwiderstandes (Widerstand der Drehspule und der zur Messbereichseinstellung vorgeschalteten Präzisionswiderstände) ergibt sich eine lineare Skale, welche direkt in Spannungseinheiten geeicht werden kann. Bei genügend schnellen periodischen Spannungsänderungen stellt sich der an der Spule befestigte Zeiger infolge der Trägheit dieses mechanischen Systems auf den zeitlichen Mittelwert

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U \, dt \quad (5.1)$$

ein, bei einer Wechselspannung also auf Null. Wechselspannungen können mit einem Drehspulinstrument gemessen werden, wenn dem Instrument ein Gleichrichter vorgeschaltet wird. Wegen der nichtlinearen Kennlinie des Gleichrichters ist die Skale aber nicht mehr streng linear und sie wird in die für praktische Zwecke benötigten Effektivwerte geeicht, gegeben durch

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2 \, dt \quad (5.2)$$

Für die Skalierung der Wechselspannungsgeräte wird ein sinusförmiger Verlauf der Spannung, frei von verfälschenden Oberschwingungen, vorausgesetzt.

3. Quantitative Betrachtungen zur Zweiweggleichrichtung

Die sinusförmige Eingangs-Wechselspannung $U_E = U_m \sin \omega t$ erzeugt in der Zweiweggleichrichterschaltung (Abb. 5.2) einen Stromfluss

$$I(t) = \frac{U_m}{R + R_D} |\sin \omega t|, \quad (5.3)$$

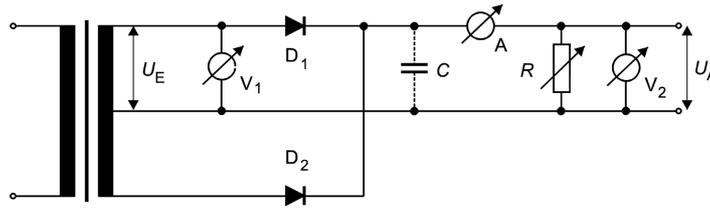


Abbildung 5.2: Zweiweggleichrichtung

wobei R_D der Innenwiderstand der Diode und R der Lastwiderstand des Kreises ist. An letzterem entsteht nach dem Ohmschen Gesetz der Spannungsabfall

$$U_A(t) = I(t) \cdot R = \frac{U_m R}{R + R_D} |\sin \omega t|. \quad (5.4)$$

Ist das Messgerät V_2 ein für Gleichspannungen geeichtes Drehspulinstrument, zeigt es infolge der Trägheit des Messsystems den zeitlichen Mittelwert \bar{U}_A an, der sich wie folgt ergibt:

$$\bar{U}_A = \frac{1}{T} \int_0^T U_A(t) dt = \frac{1}{T} \frac{2U_m R}{R + R_D} \int_0^{T/2} \sin \omega t dt = \frac{2U_m}{\pi} \cdot \frac{R}{R + R_D}. \quad (5.5)$$

Ist das Messgerät V_2 ein für Wechselspannungen geeichtes Drehspulinstrument, zeigt es dagegen den Effektivwert an:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_A^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \left(\frac{U_m R}{R + R_D} \right)^2 \int_0^{T/2} \sin^2 \omega t dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \frac{R}{R + R_D}. \quad (5.6)$$

Diese Überlegungen zeigen, dass die Ausgangsspannung U_A von der Größe des Belastungswiderstandes R abhängt (Gl. (5.5) bzw. (5.6)), da dieser auch den fließenden Strom (Gl. (5.3)) bestimmt. Nimmt der Strom $I(t)$ zu (bei fester Eingangsspannung), so fällt am Innenwiderstand der Diode R_D eine größere Spannung ab und die Ausgangsspannung U_A muss abnehmen. Wird speziell der Lastwiderstand sehr groß ($R \rightarrow \infty$), dann wird der Strom sehr klein ($I(t) \rightarrow 0$), man sagt die Schaltung arbeitet im Leerlauf, und es ergeben sich die Leerlaufspannungen

$$\bar{U}_{A\text{Leer}} = \frac{2U_m}{\pi} \quad \text{bzw.} \quad U_{\text{effLeer}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (5.7)$$

Wird parallel zum Ausgang der Gleichrichterschaltung ein Kondensator C (Abb. 5.2, gestrichelt) geschaltet, dann lädt sich dieser sowohl für Einweg- als auch für Zweiweggleichrichtung im Leerlauf ($I(t) = 0$) bis auf den Scheitelwert U_m auf und man misst sowohl mit einem Gleich- wie auch mit einem Wechselspannungsinstrument den Scheitelwert

$$\bar{U}_{A\text{Leer}} = U_{\text{effLeer}} = U_m. \quad (5.8)$$

Voraussetzung dabei ist, dass der Innenwiderstand des Messinstruments groß gegenüber dem Innenwiderstand des Gleichrichters ist. Im Fall der Belastung ist \bar{U}_A mit Kondensator immer

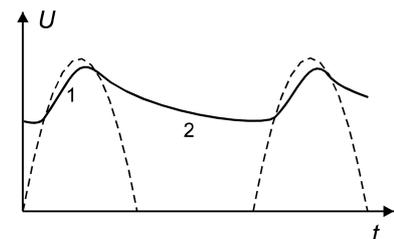


Abbildung 5.3: Glättung

größer als ohne und gleichfalls lastabhängig. Abb. 5.3 zeigt qualitativ den zeitlichen Verlauf einer geglätteten Spannung für den Fall der Einweggleichrichtung.

Der Betrag der Restwelligkeit hängt von der Größe des Kondensators, der Belastung und dem Innenwiderstand des Gleichrichters ab. Die mathematische Beschreibung des Ladevorganges (Teil 1 der Kurve) ist schwierig, da sich die Ladespannung zeitlich ändert und der Innenwiderstand des Gleichrichters (Flusswiderstand) nicht konstant ist. Die Entladungskurve (Teil 2) ist dagegen eine einfache Exponentialfunktion mit negativem Exponenten.

Die unten stehende Tabelle (Tab. 5.1) gibt eine Übersicht über die Mittel- und Effektivwerte nach (Gl. (5.1) bzw. Gl. (5.2)) für eine Wechselspannung sowie für pulsierende Gleichspannungen nach Ein- bzw. Zweiweggleichrichtung ohne Glättung. U_m ist dabei der jeweilige Scheitelwert. Zusammenfassend folgt, dass pulsierende Gleichspannungen außer mit Gleich- auch mit Wechselspannungsinstrumenten gemessen werden können. Letztere zeigen aber nur dann den Effektivwert an, wenn das Signal während der ganzen Periode sinusförmig ist, was im Beispiel der Tabelle nur bei der Zweiweggleichrichtung der Fall ist. Bei der Einweggleichrichtung wird nicht der Effektivwert $U_m/2$ (Tab. 5.1) angezeigt, sondern der Mittelwert aus den Effektivwerten für die beiden Halbperioden; die erste Halbperiode mit $U_{\text{eff}} = U_m/\sqrt{2}$ und die zweite Halbperiode mit $U_{\text{eff}} = 0$ (Gl. (5.2)) ergeben als Anzeige

$$U^* = \frac{1}{2} \left(\frac{U_m}{\sqrt{2}} + 0 \right) = \frac{U_m}{2\sqrt{2}}. \quad (5.9)$$

Die im vorliegenden Praktikumsversuch eingesetzten Vielfachmessgeräte mit einem zentralen Drehschalter zur Messbereichseinstellung sind Drehspulmessgeräte der oben geschilderten Betriebsarten. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass aus Schaltungsgründen, die hier nicht näher erläutert werden sollen, die Mehrzahl der Vielfachmessgeräte Gleichspannungsmessungen nur in der dafür vorgesehenen Betriebsart zulassen, also nicht in den Wechselspannungsbereichen. Das gilt insbesondere für die elektronischen Vielfachmesser mit digitaler Anzeige. Digitalvielfachmessgeräte enthalten anstelle des mechanischen Messwerkes einen Messverstärker mit nachfolgendem Analog-Digital-Wandler und dekadischer Ziffernanzeige. Hochwertigere Geräte erlauben wegen des relativ hohen Eingangswiderstandes der Messverstärker eine praktisch „leistungslose“ Spannungsmessung (vgl. Versuch E2). Mit entsprechendem Schaltungsaufwand sind auch wesentlich kleinere Gerätefehler (systematische Restfehler) als mit mechanischen Messwerken erreichbar.

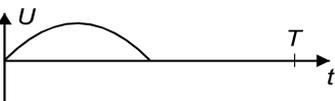
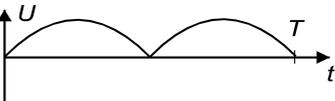
Spannungsart	Spannungsverlauf	Mittelwert \bar{U}	Effektivwert U_{eff}
Wechselspannung		0	$\frac{U_m}{\sqrt{2}}$
Gleichspannung (Einweg)		$\frac{U_m}{\pi}$	$\frac{U_m}{2}$
Gleichspannung (Zweiweg)		$\frac{2U_m}{\pi}$	$\frac{U_m}{\sqrt{2}}$

Tabelle 5.1: Mittel- und Effektivwerte

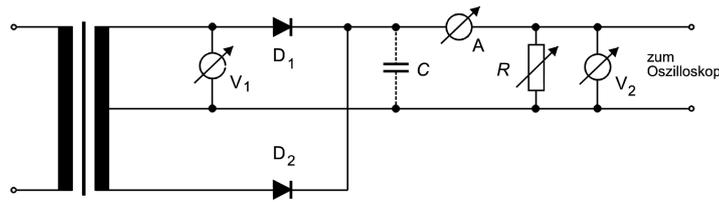


Abbildung 5.4: Schaltung zum Versuch

Aufgaben

1. Messung der zeitlichen Mittelwerte \bar{U} der Gleichspannungen als Funktion des Laststromes I für Ein- und Zweiweggleichrichtung jeweils mit und ohne Kondensator ($10\ \mu\text{F}$) und grafische Darstellung der Ergebnisse in einem gemeinsamen Diagramm.
2. Getrennt für die Einweg- und die Zweiweggleichrichtung sollen in jeweils gemeinsamen Diagrammen die Spannungsverläufe dargestellt werden für die Fälle:
 - (a) keine Belastung, ohne Ladekondensator,
 - (b) keine Belastung, mit Ladekondensator,
 - (c) mittlere Belastung, mit Ladekondensator.
3. Messung der Gleichspannung für die Ein- und Zweiweggleichrichtung jeweils im Leerlauf ohne Glättungskondensator
 - (a) mit dem für Gleichspannungen geeichten Drehspulmessinstrument,
 - (b) mit dem für Wechselspannungen geeichten Drehspulinstrument.
4. Berechnung der Scheitelspannung U_m aus den Messwerten von Aufgabe 3 und Vergleich mit
 - (a) dem aus der Wechselspannungsmessung mit V_1 berechneten Wert,
 - (b) den Gleichspannungsmessungen mit Glättungskondensator und ohne Belastung für Ein- und Zweiweggleichrichtung (Gl. (5.8)).

Versuchsdurchführung

Die Schaltung der Zweiweggleichrichtung (Abb. 5.4) wird unter Verwendung von Halbleiterdioden aufgebaut. Der Laststrom wird mit dem Regelwiderstand R eingestellt. Aus der aufgebauten Zweiweggleichrichtung erhält man die Einweggleichrichtung durch Unterbrechung des Katoden- oder Anodenanschlusses von D_2 . Für V_1 verwende man ein für Wechselspannungen (Effektivwertanzeige U_{eff}) geeichtetes Messgerät.

Für Aufgabe 2 werden die Spannungsverläufe vom Bildschirm des Oszillografen abgezeichnet.

Fragen

1. Erläutern Sie das Wirkungsprinzip einer Halbleiterdiode und beschreiben Sie die Strom-Spannungs-Kennlinie.
2. Erläutern Sie die Wirkungsweise eines Oszillographen.
3. Erläutern Sie die Vor- und Nachteile der Einweg- gegenüber der Zweiweggleichrichtung.
4. Was ist eine Kaskadenschaltung von Gleichrichtern und Kondensatoren und wie wirkt sie?
5. Überlegen Sie, wie Sie mit den elektronischen Bauelementen Quadrierer, Radizierer, Tiefpass einen echten Effektivwertmesser realisieren können, der für beliebige periodische Signale korrekt arbeitet.