

Versuch ET 03 – Schaltungen mit nichtlinearen Widerständen

## 1 Versuchsziel

Kennenlernen der Wirkungsweise und des Einsatzes von Schaltungen mit nichtlinearen Widerständen am Beispiel von Schaltungen mit Z- und Netzgleichrichterdiode.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Z-Diode

Z-Dioden sind Siliziumdioden, die im Sperrbereich betrieben werden. Sie besitzen im Durchbruchgebiet einen steilen Stromanstieg, wobei sich die Spannung  $U$  an der Diode nur sehr gering ändert (Abbildung 1). Diese Eigenschaft der Z-Dioden nutzt man zur Spannungsstabilisierung in elektronischen Schaltungen.

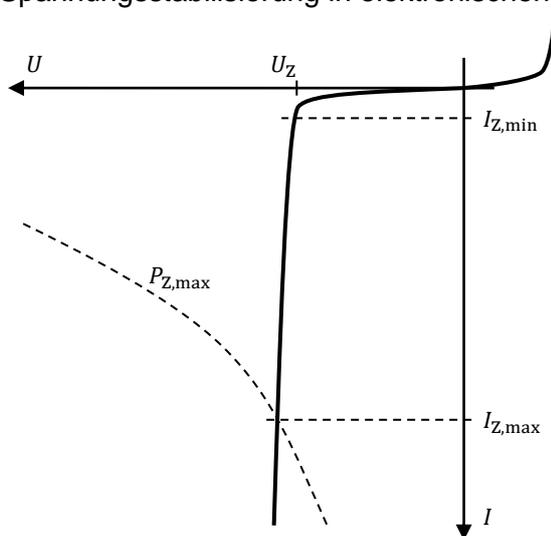


Abbildung 1: Sperrkennlinie einer Z-Diode

Die Durchbruchspannung  $U_Z$  von Z-Dioden lässt sich durch gezielte Fertigungsverfahren zwischen 2,7 V ... 200 V genau festlegen. Der maximale Diodenstrom  $I_{Z,max}$  ergibt sich aus der Durchbruchspannung und der maximalen Leistung  $P_{Z,max}$ , für die die Z-Diode ausgelegt ist, näherungsweise zu

$$I_{Z,max} = \frac{P_{Z,max}}{U_Z} \quad (1)$$

Der Knickbereich der Kennlinie (Abbildung 1) bestimmt den minimalen Strom  $I_{Z,min}$ , bei dem noch eine Spannungsstabilisierung möglich ist.

Abbildung 2 zeigt eine Schaltung zur Stabilisierung der Spannung  $U_a$  an einem Verbraucher  $R$  mit Hilfe einer Z-Diode nach dem Prinzip der Parallelstabilisierung.

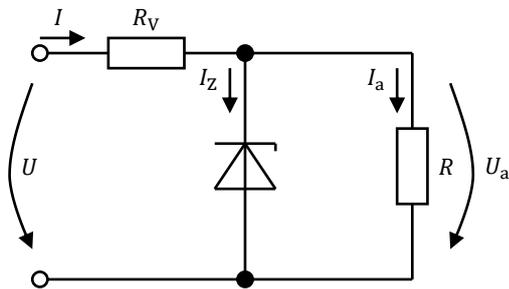


Abbildung 2: Stabilisierung der Spannung  $U_a$  an einem Verbraucher  $R$

Der Vorwiderstand  $R_V$  berechnet sich zu

$$R_V = \frac{U - U_a}{I_Z + I_a}. \quad (2)$$

### Spannungsstabilisierung bei konstanter Belastung:

Die Spannung  $U_a$  nimmt bei Änderung der Eingangsspannung  $U$  in einem bestimmten Bereich ( $U_{\min} \dots U_{\max}$ ) etwa den Wert der Durchbruchspannung  $U_Z$  an. Durch Spannungsteilung erhält man nach Abbildung 2:

$$U = U_Z \left( \frac{R_Z \parallel R + R_V}{R_Z \parallel R} \right) = U_Z \left[ 1 + R_V \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_Z} \right) \right]. \quad (3)$$

Aus Gleichung (3) ergibt sich  $U_{\min}$  bei  $R_Z \rightarrow \infty$  ( $I_Z = 0$ ). Der maximale Wert  $U_{\max}$  wird durch die maximal zulässige Leistung  $P_{Z,\max}$  der Z-Diode begrenzt. Für diesen Fall beträgt der Widerstand der Z-Diode:

$$R_{Z,\min} = \frac{U_Z^2}{P_{Z,\max}}. \quad (4)$$

### Spannungsstabilisierung bei variabler Belastung:

Die gleiche Schaltung ermöglicht es auch, die Spannung  $U_a$  an einem in bestimmten Grenzen variablen Belastungswiderstand  $R$  annähernd konstant zu halten. Zur Ermittlung der zulässigen Grenzen für  $R$  bei vorgegebenem Vorwiderstand  $R_V$  wird die Schaltung als linearer aktiver Zweipol, die Z-Diode als nichtlinearer, passiver Zweipol  $R_{AB}$  aufgefasst (Abbildung 3).

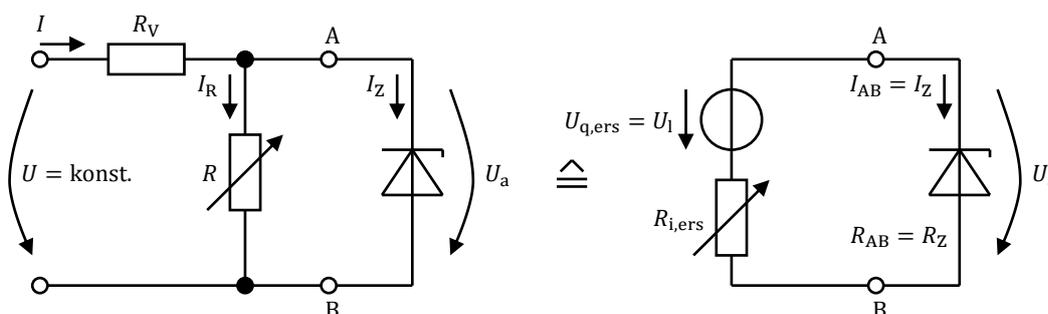


Abbildung 3: Spannungsstabilisierung bei variablem  $R$

Die Strom-Spannungs-Kennlinien beider Zweipole zeigt Abbildung 4. Für den Kurzschlussstrom  $I_{k,AB}$  des aktiven Zweipols gilt:

$$I_{k,AB} = \frac{U}{R_V} \quad (5)$$

Die Leerlaufspannung  $U_1 = I_{k,AB} \cdot R_{i,ers}$  mit  $R_{i,ers} = R \parallel R_V$  ist somit abhängig von  $R$  und beträgt:

$$U_1 = U \cdot \frac{R}{R + R_V} \quad (6)$$

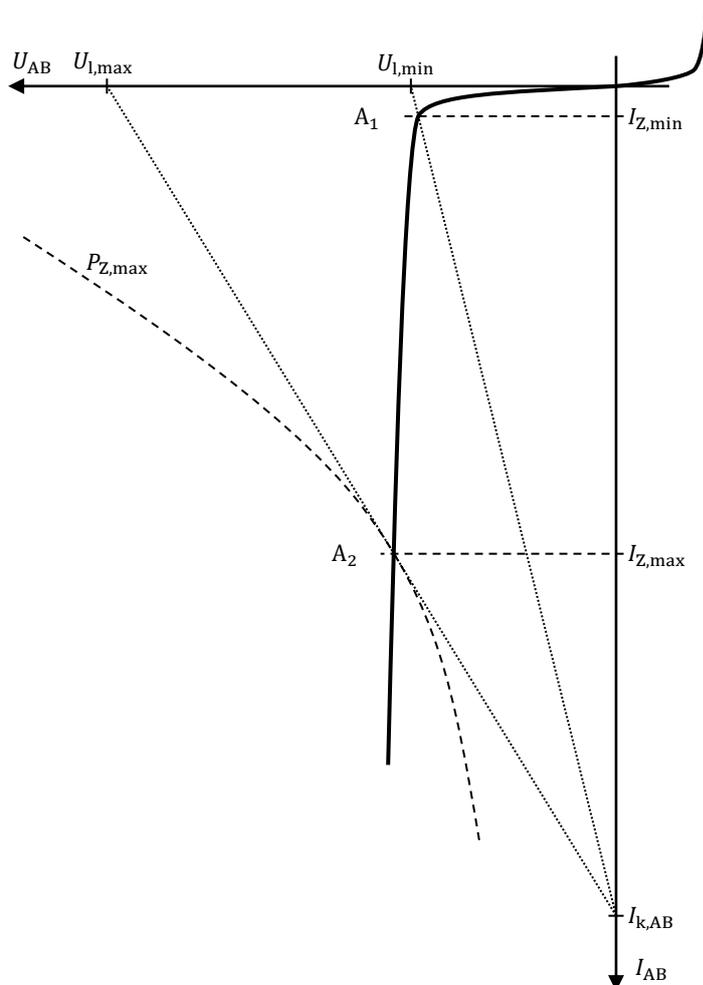


Abbildung 4: Kennlinien des aktiven und passiven Zweipols

Aus dem Kurzschlussstrom  $I_{k,AB}$  und den Werten der Arbeitspunkte A1 und A2 lassen sich die Grenzwerte für die Leerlaufspannung  $U_{1,max}$  und  $U_{1,min}$  grafisch bestimmen. Durch Umstellen von Gleichung (6) erhält man die Grenzwerte  $R_{max}$  und  $R_{min}$ , zwischen denen die Spannung  $U_a$  annähernd konstant bleibt.

$$R_{max} = \frac{R_V}{\frac{U}{U_{1,max}} - 1} \quad \text{und} \quad R_{min} = \frac{R_V}{\frac{U}{U_{1,min}} - 1} \quad (7)$$

Ein Belastungswiderstand  $R < R_{min}$  führt zu einem Absinken der Spannung  $U_a$  unter  $U_Z$  während bei  $R > R_{max}$  die zulässige Leistung  $P_{Z,max}$  der Z-Diode überschritten wird.

## 2.2 Gleichrichterdioden

In vielen Fällen nutzt man Siliziumdioden zum Gleichrichten technischer Wechselspannungen, z. B. in Netzteilen zur Gleichspannungsversorgung elektronischer Geräte. Silizium-Gleichrichterdioden besitzen im Durchlassbereich für Spannungen oberhalb der Schleusenspannung  $U_S = 0,5 \text{ V} \dots 0,7 \text{ V}$  einen sehr geringen Widerstand, während der Sperrwiderstand für negative Spannungen ca.  $10^6 \Omega$  beträgt. Entscheidend für die Wahl der Dioden bei der Netzgleichrichtung sind der geforderte Gleichstrom und die maximal auftretende Sperrspannung.

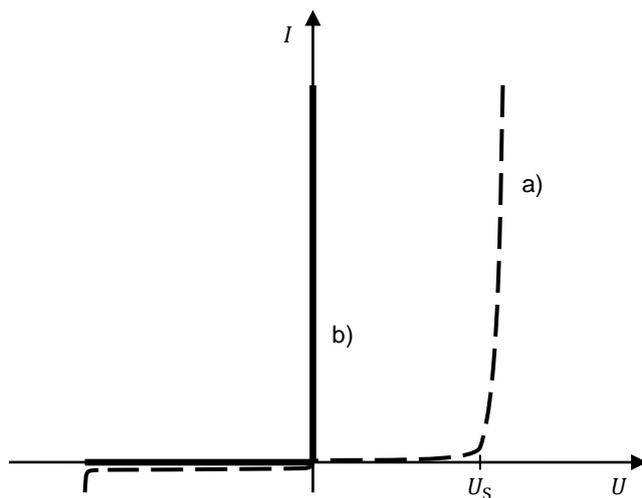


Abbildung 5: Strom-Spannungs-Kennlinie einer Silizium-Gleichrichterdiode (a – real, b – ideal)

Zur Vereinfachung der Zusammenhänge wird für die folgenden Betrachtungen von einer idealen Kennlinie ausgegangen (Abbildung 5b), d. h. der Durchlasswiderstand ist vernachlässigt und der Sperrwiderstand als unendlich hoch angenommen worden. Damit wirkt die Diode wie ein idealer Schalter.

Durch Gleichrichten einer sinusförmigen Wechselspannung erhält man zunächst eine pulsierende Gleichspannung, die durch Parallelschalten von Kondensatoren und weiteren Bauelementen (sogenannten Siebschaltungen) geglättet werden kann.

Als Maß für den Wechselanteil der Gleichspannung ist die Welligkeit  $W$  als Quotient von Effektivwert  $U$  und Gleichrichtwert  $\bar{U}$  der pulsierenden Gleichspannung definiert.

$$W = \frac{U}{\bar{U}} \quad (8)$$

Der Effektivwert (quadratischer Mittelwert) errechnet sich nach der Beziehung

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} . \quad (9)$$

Der Gleichrichtwert  $\bar{U}$  stellt den arithmetischen Mittelwert der gleichgerichteten Spannung dar.

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T |u| dt \quad (10)$$

Die geringste Welligkeit ( $W = 1$ ) besitzt demnach eine reine Gleichspannung.

### 2.2.1 Einwegschaltung

Bei der Einweg-Gleichrichterschaltung (Abbildung 6) erhält man am Verbraucher  $R$  sowie an der Diode  $D$  jeweils pulsierende Gleichspannungen mit dem Maximalwert  $U_{\max} = \hat{U}$ . Der maximale Strom durch Diode und Verbraucher beträgt:

$$I_{\max} = \hat{I} = \frac{\hat{U}}{R}. \quad (11)$$

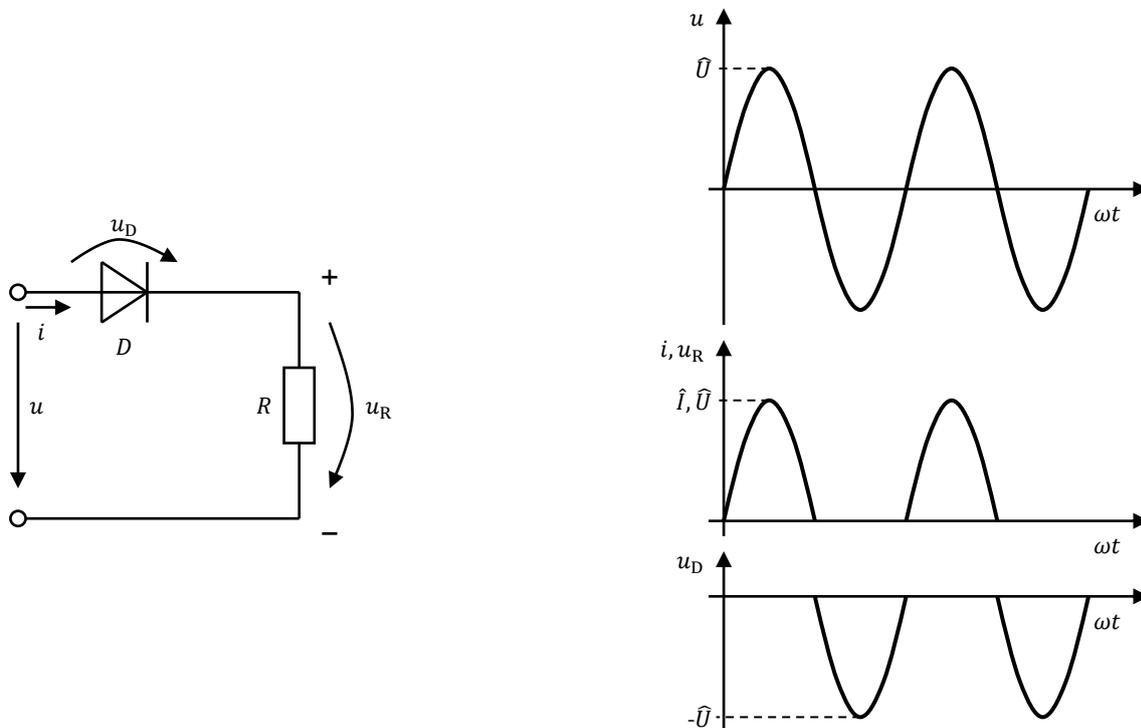


Abbildung 6: Einweggleichrichtung ohne Glättungskondensator

Die Einwegschaltung ohne Glättungskondensator wird vorzugsweise in der Schweiß- und Galvanotechnik angewendet, weil in diesen Einsatzfällen die Welligkeit der Gleichspannung keinen negativen Einfluss ausübt.

Zur Glättung der pulsierenden Gleichspannung lassen sich im einfachsten Fall Kondensatoren verwenden (Abbildung 7). Während der positiven Halbschwingung der angelegten Wechselspannung  $u = \hat{U} \sin \omega t$  (Dioden im Durchlassbereich) lädt sich der Kondensator  $C$  nahezu auf die Spannung  $\hat{U}$  auf. In der Sperrphase der Diode (negative Halbschwingung von  $u$ ) entlädt sich der Kondensator über den Widerstand  $R$  nach der Beziehung

$$u_R = \hat{U} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (12)$$

Als  $\tau = RC$  bezeichnet man die Zeitkonstante dieses Entladevorganges. Je größer  $\tau$  gewählt wird, desto langsamer entlädt sich der Kondensator  $C$ , d. h. umso geringer ist die Welligkeit  $W$  der Gleichspannung  $U_R$ . Der Aufladevorgang verläuft wesentlich schneller infolge des äußerst geringen Durchlasswiderstandes der Diode. Der Strom  $i_R$  im Verbraucher  $R$  verläuft proportional zur Spannung  $u_R$ .

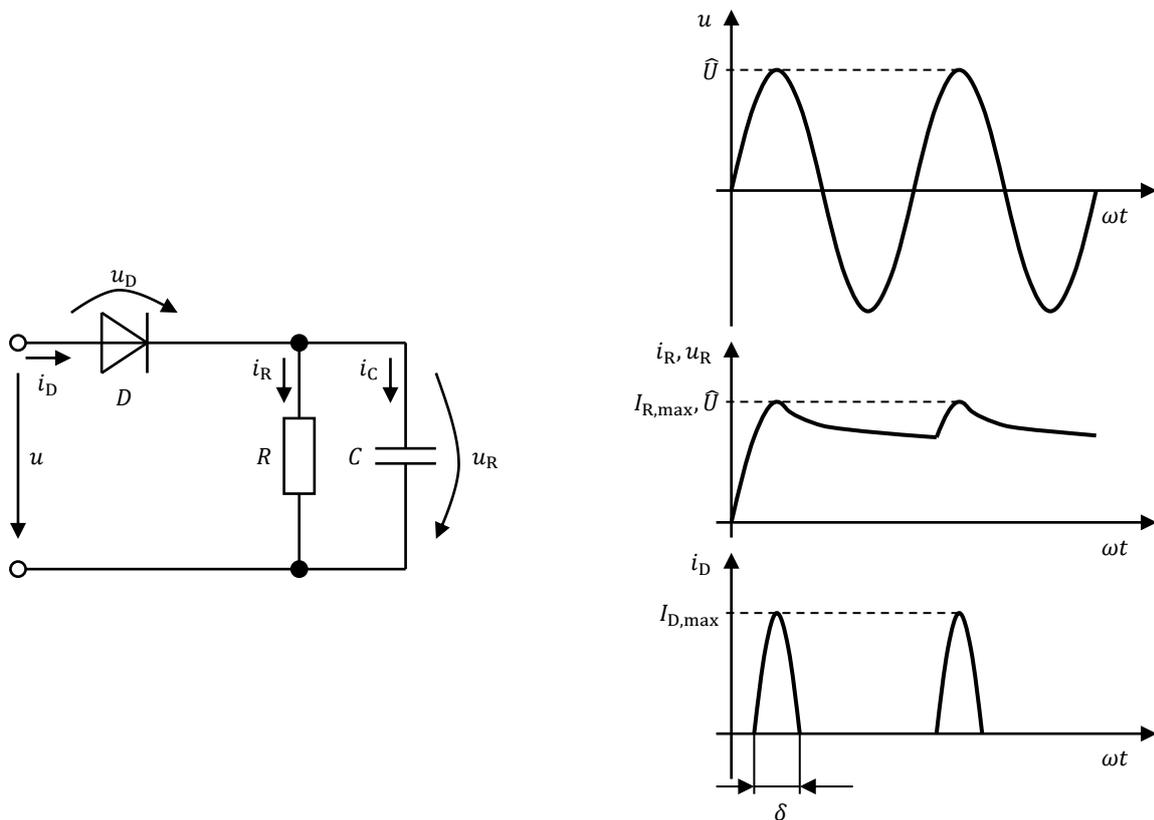


Abbildung 7: Einwegschaltung mit Glättungskondensator

Der Strom  $i_D$  durch die Diode fließt nur während des Aufladevorganges des Kondensators und setzt sich zusammen aus dem Strom  $i_R$  durch den Verbraucher  $R$  und dem Aufladestrom  $i_C$  des Kondensators. Somit ergibt sich ein impulsförmiger Strom  $i_D$ , dessen Spitzenwert  $I_{D,max}$  um ein Vielfaches über dem maximalen Strom  $I_{R,max}$  durch den Verbraucher  $R$  liegen kann. Übliche Werte sind

$$I_{D,max} = (6 \dots 9) \cdot I_{R,max} .$$

Diese Impulsbeanspruchung der Diode muss bei der Dimensionierung von Gleichrichterschaltungen berücksichtigt werden.

Die Zeitdauer des Stromflusses durch die Diode wird als Stromflusswinkel  $\delta$  angegeben. Praktisch liegen diese Werte bei

$$\delta = 30^\circ \dots 50^\circ .$$

Während der Sperrphase der Diode addiert sich an der Diode die Spannung der negativen Halbwelle der angelegten Wechselspannung mit der Spannung  $u_R$  am Verbraucher. Bei Leerlauf ( $R \rightarrow \infty$ ) und zugeschaltetem Kondensator erhält man an der Diode eine Spannung bis zu

$$U_{D,max} = 2\hat{U} \quad (\text{siehe Abbildung 8}). \quad (13)$$

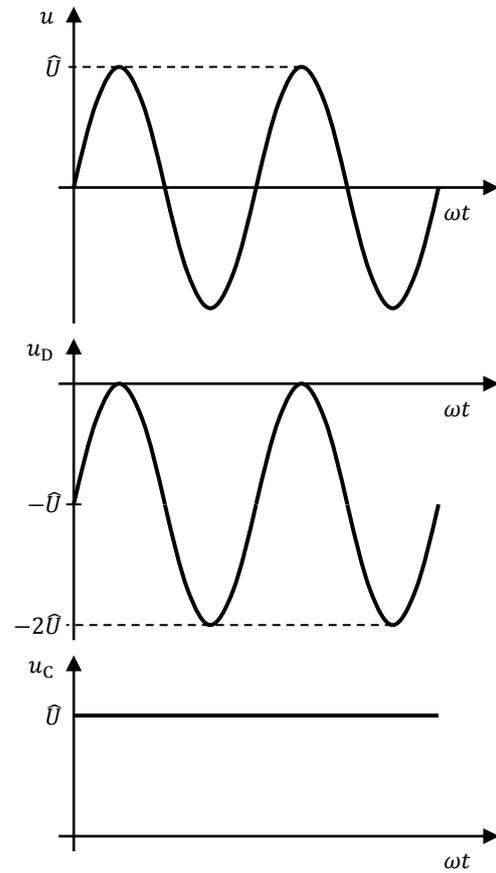
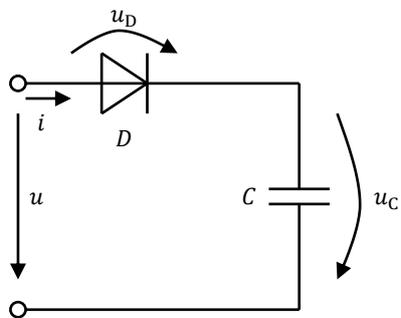


Abbildung 8: Einwegschtung mit rein kapazitiver Belastung

## 2.2.2 GRAETZ- oder Brückenschaltung

Die GRAETZ-Schaltung (Abbildung 9) ist die wirtschaftlichste und am häufigsten angewandte Schaltung zur Netzgleichrichtung. Sie nutzt beide Halbschwingungen der Wechselspannung zur Gleichrichtung. Die maximale Spannung beträgt sowohl am Verbraucher  $R$  als auch an der Diode  $U_{\max} = \hat{U}$ , der Strom  $i_R$  durch den Verbraucher ist proportional der Spannung  $u_R$ . Die Spannung  $u_R$  pulsiert mit der doppelten Frequenz der Eingangswchselspannung.

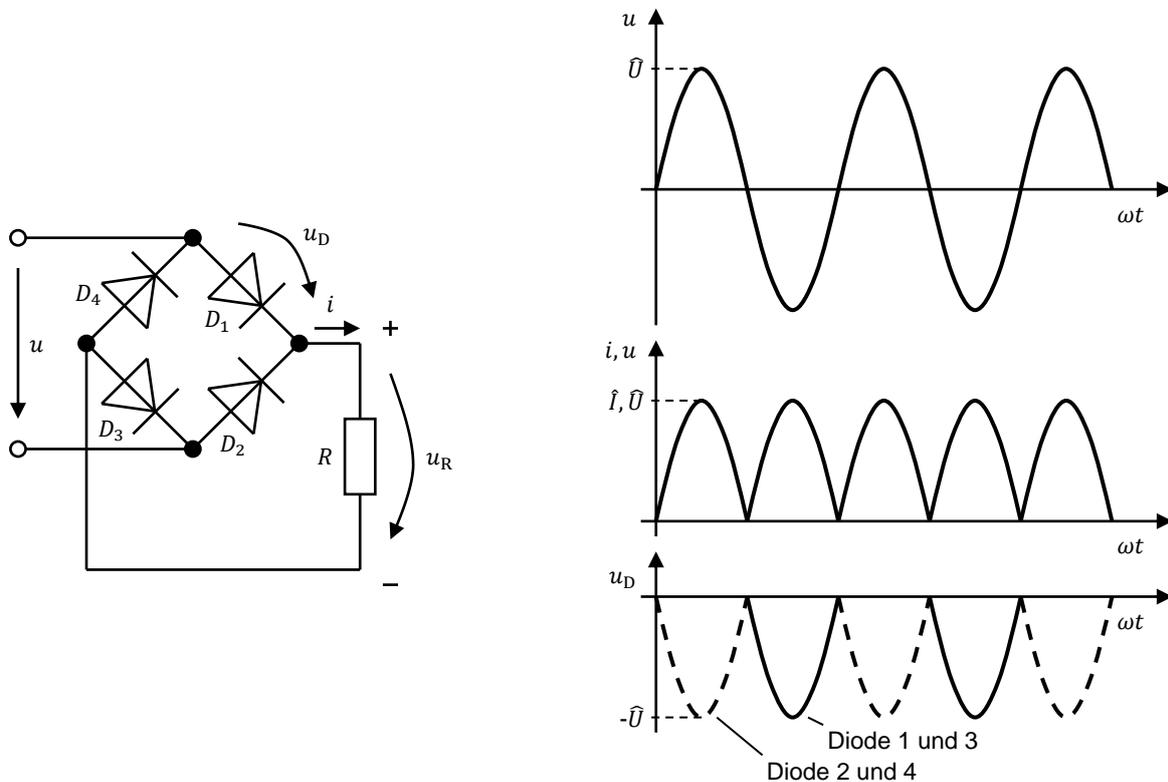


Abbildung 9: GRAETZ-Schaltung ohne Glättungskondensator

Wird dem Verbraucher ein Kondensator  $C$  parallel geschaltet (Abbildung 10), verbessert sich im Vergleich zum Einweggleichrichter bei gleicher Zeitkonstante  $\tau$  die Welligkeit der Gleichspannung  $u_R$  am Verbraucher auf Grund der kürzeren Entladezeiten. Der Strom  $i_R$  verhält sich proportional zur Spannung  $u_R$ .

Der Strom  $i_D$  durch die Dioden besteht aus Impulsen. Im Vergleich zur Einwegschaltung verringert sich die Impulsamplitude bei gleicher Zeitkonstante  $\tau$ , da sich der Kondensator weniger entlädt.

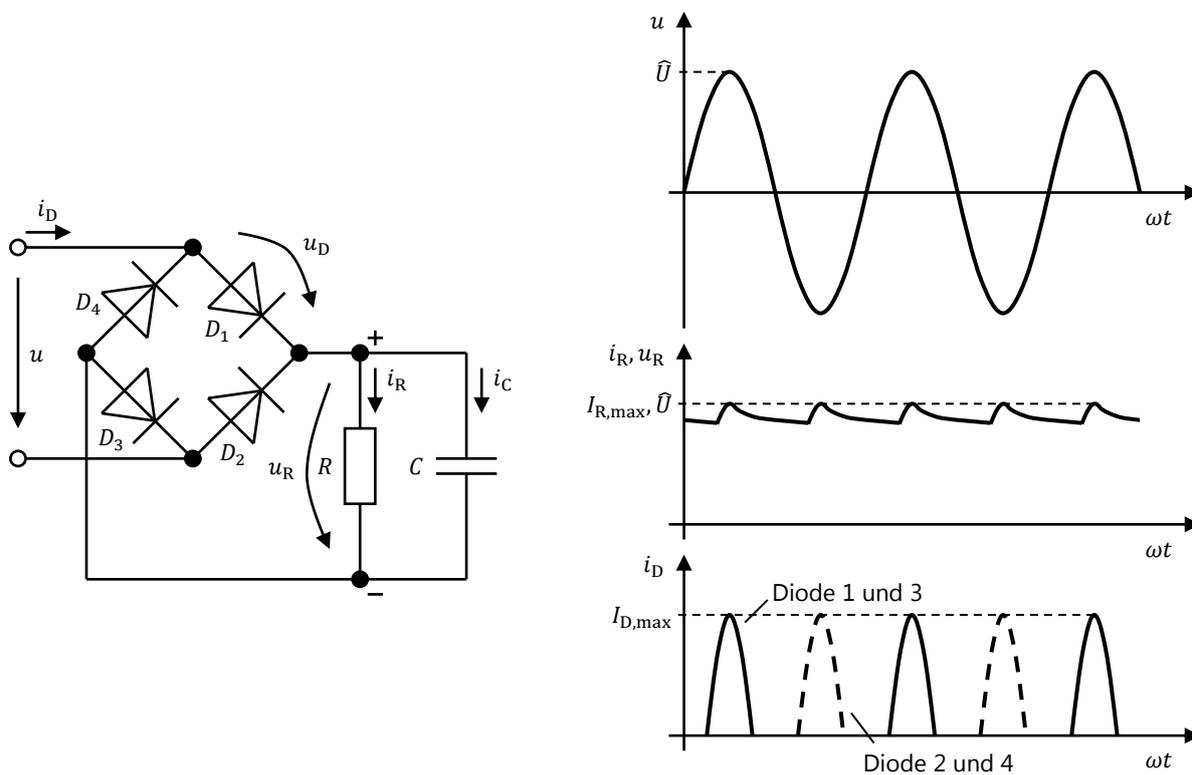


Abbildung 10: GRAETZ-Schaltung mit Glättungskondensator

### 3 Versuchsvorbereitung

#### 3.1 Auslegung einer Schaltung zur Spannungsstabilisierung

An eine Schaltung nach Abbildung 2 wird eine Gleichspannung  $U$  angelegt. Die Spannung an der Z-Diode betrage  $U_Z = 10\text{ V}$ ,  
 der Lastwiderstand  $R = 2\text{ k}\Omega$  und  
 der Vorwiderstand  $R_V = 400\ \Omega$ .

##### 3.1.1

Für welche Leistung muss die Z-Diode mindestens ausgelegt sein, wenn die Schaltung mit  $U_{\max} = 16\text{ V}$  betrieben werden soll?

##### 3.1.2

Welche Spannung  $U_{\min}$  muss mindestens anliegen, damit  $U_R = 10\text{ V}$  erreicht wird?

#### 3.2 Spannungsstabilisierung bei variabler Last

Gegeben sei untenstehende Kennlinie (Abbildung 11) einer Z-Diode ( $P_{Z,\max} = 2\text{ W}$ ;  $U_Z = 10\text{ V}$ ). Ermitteln Sie grafisch, in welchem Bereich sich die Belastung ändern darf (Schaltung nach Abbildung 3), damit die Spannung  $U_R$  am Lastwiderstand  $R$  konstant bleibt und die Diode nicht überlastet wird.  $U = 24\text{ V}$ ;  $R_V = 60\ \Omega$ .

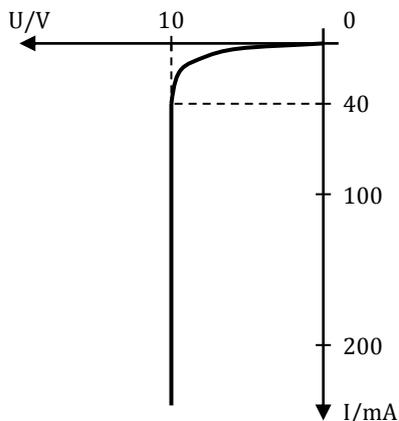


Abbildung 11: Kennlinie der Z-Diode

#### 3.3 Kennwerte von Gleichrichterschaltungen

Ermitteln Sie allgemein die Effektivwerte  $U_R$ , die Gleichrichtwerte  $\bar{U}_R$  sowie die Werte der Welligkeit  $W$  bei Einweg- und GRAETZ-Schaltung mit ohmscher Belastung (Abbildung 6 und Abbildung 9) bei einer Eingangswchselspannung  $u(t) = \hat{U} \sin \omega t!$

## 4 Versuchsdurchführung

### 4.1 Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie von Dioden

Nehmen Sie die Strom-Spannungs-Kennlinien der vorgelegten Z-Diode (siehe Abbildung 12) sowie der Gleichrichterdiode (siehe Abbildung 13) auf!

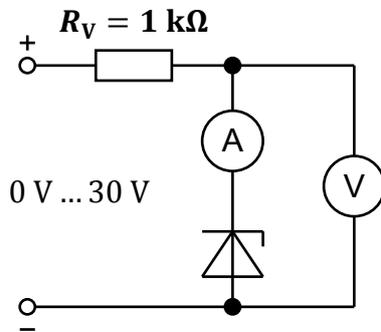


Abbildung 12: Messschaltung für Z-Diode  
(nur Sperrrichtung messen!)

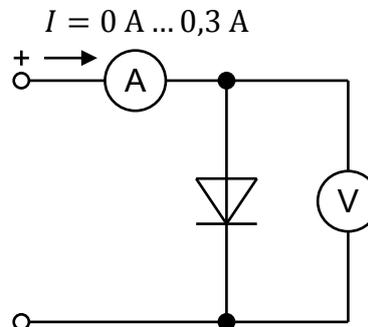


Abbildung 13: Messschaltung für Gleichrichterdiode  
(nur Durchlassrichtung messen!)

### 4.2 Messungen an der Z-Diode

Messen Sie die Ausgangsspannung  $U_a$  am Lastwiderstand  $R$  sowie den Strom  $I_Z$  durch die Z-Diode:

- in Abhängigkeit von der angelegten Gleichspannung  $U$  bei konstanter Belastung  $R$  (Abbildung 14); Darzustellen sind  $U_a = f(U)$  und  $I_Z = f(U)$  in einem Diagramm!
- in Abhängigkeit von der Belastung  $R$  bei konstanter Spannung  $U$  (Abbildung 15)! Darzustellen sind  $U_a = f(R)$  und  $I_Z = f(R)$  in einem Diagramm (Maßstab der  $R$ -Achse:  $1 \text{ cm} \triangleq 500 \Omega$ )!

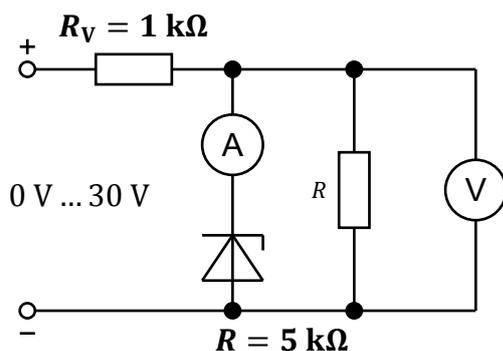


Abbildung 14: Messschaltung bei konstanter  
Belastung  $R$

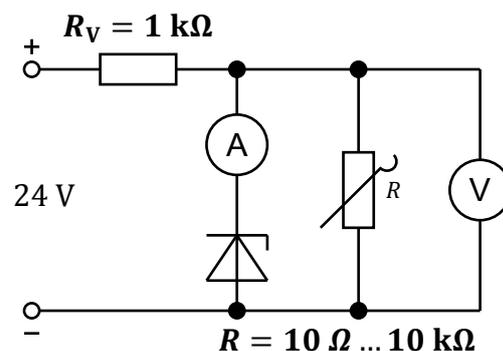


Abbildung 15: Messschaltung bei konstanter  
Spannung  $U$

### 4.3 Leistung an der Z-Diode

Ermitteln Sie aus den Ergebnissen der Aufgabe 4.2 die Leistung  $P_Z$  der Z-Diode in Abhängigkeit von der Eingangsspannung  $U$  bzw. vom Lastwiderstand  $R$  und stellen Sie diese Funktionen grafisch dar!

#### 4.4 Messungen für Einweg- und GRAETZ-Schaltung mit Vielfachmessern

Messen Sie für die Einweg-Gleichrichterschaltungen (Abbildung 6 und Abbildung 7) sowie für die GRAETZ-Schaltungen (Abbildung 9 und Abbildung 10) die arithmetischen Mittelwerte (Gleichrichtwerte) der Spannung  $\bar{U}_R$  und des Diodenstromes  $\bar{I}_D$  bei unterschiedlicher Belastung mit Vielfachmessern (Gleichstrommessbereich verwenden!!)

Messen Sie den Effektivwert  $U$  der angelegten Wechselspannung  $u(t)$  (Wechselstrommessbereich des Vielfachmessers!).

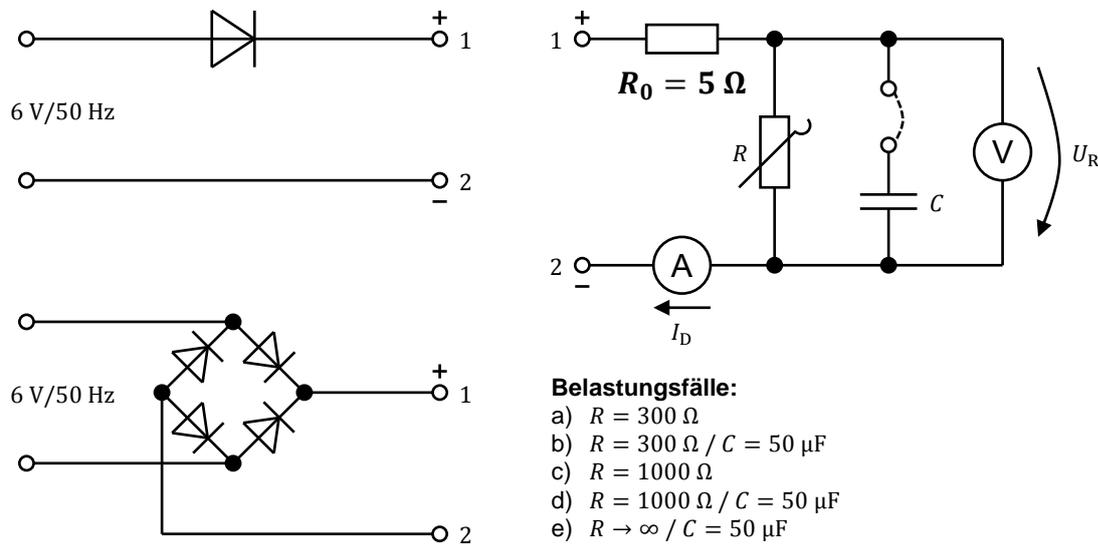


Abbildung 16: Messschaltungen für Einweggleichrichtung (oben) und GRAETZ-Schaltung (unten)

#### 4.5 Messungen für Einweg- und GRAETZ-Schaltung mit Oszilloskop

Oszillografieren Sie für Einweg- und GRAETZ-Schaltung die zeitlichen Verläufe der Eingangswechselspannung  $u(t)$  und der Spannung  $u_R(t)$  für unterschiedliche Belastungen und stellen Sie die Oszillogramme maßstäblich dar!

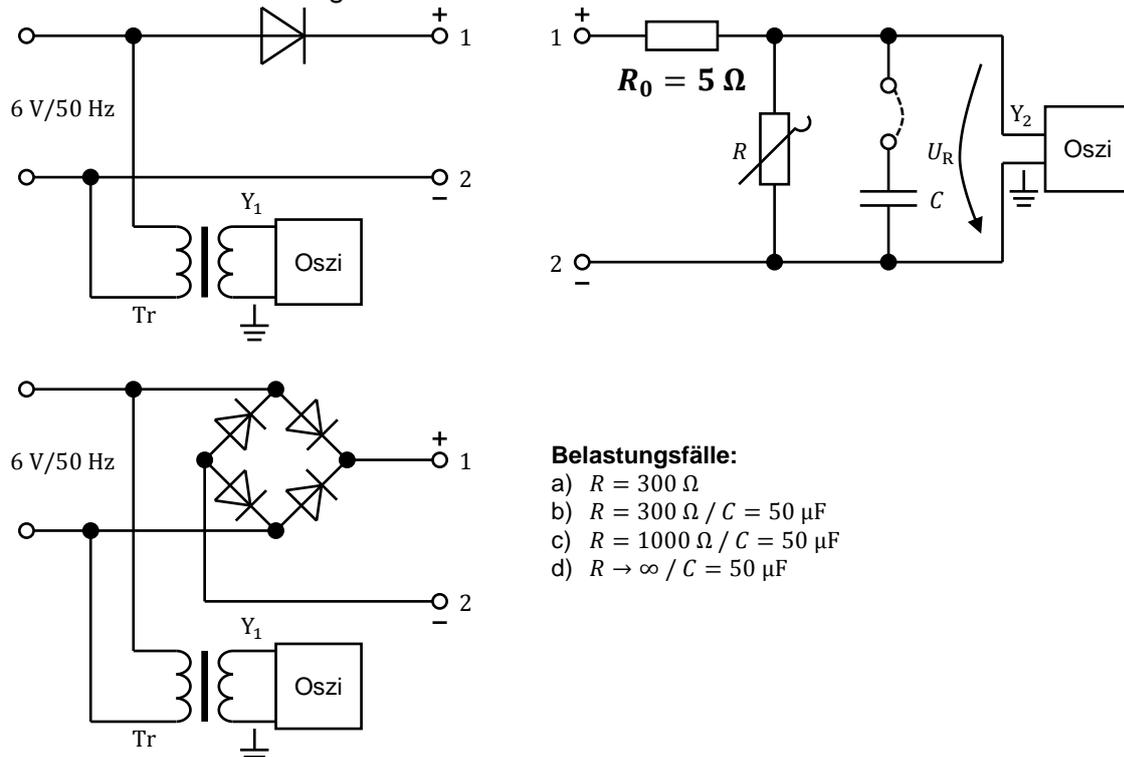


Abbildung 17: Messschaltungen für Einweggleichrichtung (oben) und GRAETZ-Schaltung (unten)

#### 4.6 Oszillografieren des Diodenstromes

Oszillografieren Sie für die Einwegschaltung die zeitlichen Verläufe der Eingangswchselspannung  $u(t)$  und des Diodenstromes  $i_D(t)$  für unterschiedliche Belastungen und stellen Sie die Oszillogramme maßstäblich dar!

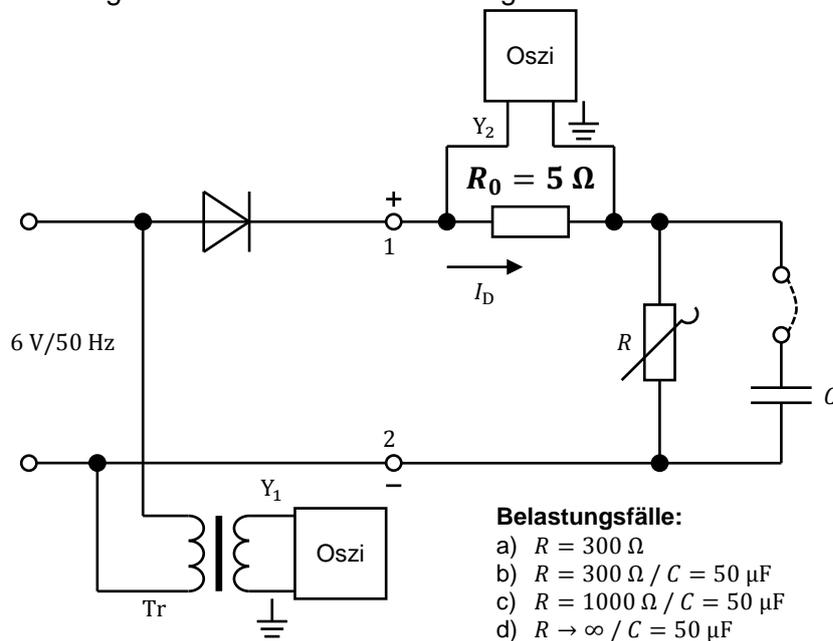


Abbildung 18: Messschaltung zur Ermittlung des Diodenstromes

#### 4.7 Strommaxima und Stromflusswinkel

Ermitteln Sie aus den Oszillogrammen von Aufgabe 4.6 die Maximalwerte der Ströme  $I_{D,\max}$  sowie die Stromflusswinkel  $\delta$ !

#### 4.8 Ermitteln der Spannung der Diode

Oszillografieren Sie bei der Einwegschaltung die Spannung  $u_D(t)$  über der Diode bei Leerlauf ( $R \rightarrow \infty$ ) und zugeschaltetem Kondensator  $C$  (Abbildung 8)!

Skizzieren Sie maßstäblich den Verlauf  $u_D(t)$  und entnehmen Sie dem Oszillogramm  $U_{D,\max}$ !

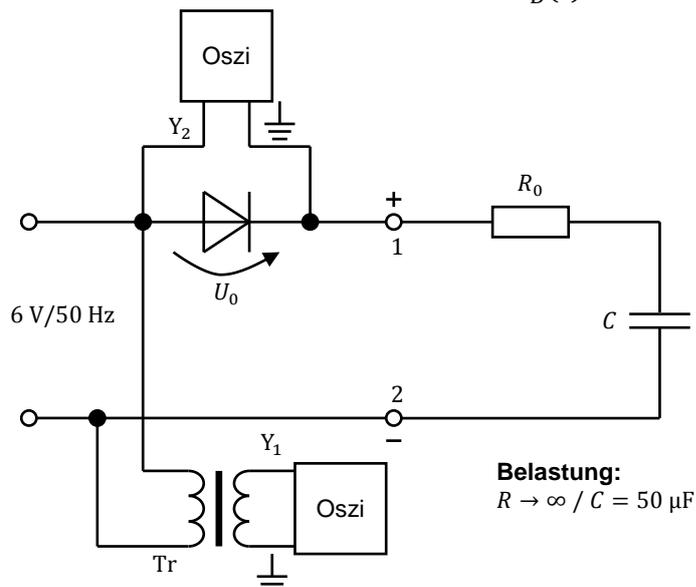


Abbildung 19: Messschaltung zur Ermittlung der Spannung über der Diode

**Hinweis:** Stellen Sie sicher, dass der Kondensator vor Messbeginn vollständig entladen ist!

## 5 Literatur

- [1] S. Altmann, D. Schlayer, Lehr- und Übungsbuch Elektrotechnik, Fachbuchverlag Leipzig - Köln, 1995.
- [2] W.-E. Büttner, Grundlagen der Elektrotechnik 1, Oldenbourg Verlag München - Wien, 2004.
- [3] T. Harriehausen, D. Schwarzenau, Moeller Grundlagen der Elektrotechnik, Springer Vieweg – Wiesbaden, 2013

## 6 Anhang

### 6.1 Geräteliste

- 1 Dreifach-Gleichspannungs-Netzgerät STATRON (2 x 0...32 V/3 A, 1 x 5 V/3 A)
- 1 Netzgerät 6 V~/50 Hz, 4 A
- 1 Zweikanal-Speicheroszilloskop HM507 mit Drucker HP Laserjet 1100
- 1 Trenn-Übertrager Tr
- 1 Dekadenwiderstand  $R = 10 \times 10 \Omega$
- 1 Dekadenwiderstand  $R = 10 \times 100 \Omega$
- 1 Dekadenwiderstand  $R = 10 \times 1000 \Omega$
- 1 Analog-Multimeter MetraHit 1A
- 1 Analog-Multimeter MA 2H
- 3 vorgefertigte Schaltungen