

Karlsruhe, 27. März 2017

## LABORPRAKTIKUM

# Elektrische Antriebe und Leistungselektronik: **Diodengleichrichterschaltungen**

Prof. Dr.-Ing. Michael Braun

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b>	<b>1</b>
1.1. Anforderungen an die Gleichrichterschaltung . . . . .	1
1.2. Qualität der Ausgangsspannung . . . . .	1
1.2.1. Normen / Qualität des Netzstromes . . . . .	2
1.3. Gleichrichterschaltungen . . . . .	3
1.4. Eigenschaften und Kennlinie einer Leistungsdiode . . . . .	4
1.4.1. Kennlinie . . . . .	4
1.4.2. Schutzeinrichtungen . . . . .	5
1.4.3. Idealisierung . . . . .	5
1.4.4. Verluste . . . . .	6
1.5. Zweipuls-Brückenschaltung . . . . .	7
1.5.1. Kapazitive Glättung der gleichgerichteten Spannung . . . . .	7
1.5.2. Netzstromverlauf . . . . .	8
1.6. Sechspuls-Brückenschaltung . . . . .	13
1.6.1. Induktive Glättung des Gleichstromes . . . . .	13
1.7. Leistungsdefinitionen . . . . .	16
1.8. Beispiel der Kenndaten einer Diode (1N5408G) . . . . .	19
<b>2. Versuche</b>	<b>20</b>
2.1. Wechselstrombrückenschaltung . . . . .	21
2.2. Drehstrombrückenschaltung . . . . .	25
2.3. Vergleich der Harmonischen im Eingangsstrom der beiden Schaltungen . . . . .	27
2.4. Wirkungsgrad der Schaltungen . . . . .	27
<b>A. Abkürzungen in dieser Anleitung</b>	<b>29</b>
<b>B. Indices</b>	<b>30</b>

# 1. Einführung

## 1.1. Anforderungen an die Gleichrichterschaltung

Ungesteuerte Gleichrichter ermöglichen die direkte elektrische Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom. Die Gleichrichtung erfolgt mit Hilfe ungesteuerter elektrischer Ventile. Als Anforderung an diese Gleichrichterschaltungen können im Wesentlichen die Punkte

- Geringe Kosten der Gleichrichterschaltung
- Guter Wirkungsgrad der Schaltung
- Qualität der Ausgangsgleichspannung (Kapitel 1.2)
- Einhaltung der Grenzwerte für den Netzstrom (Kapitel 1.2.1)

genannt werden. Im Versuch werden die Wechselstrombrückenschaltung und die Drehstrombrückenschaltung mit Siliziumdioden als elektrische Ventile untersucht.

## 1.2. Qualität der Ausgangsspannung

Ein Kriterium zur Bewertung der Gleichrichterschaltung ist die Qualität der Ausgangsgleichspannung. Bei den Ungesteuerten Gleichrichterschaltungen wird dafür die Differenz zwischen der Maximalen und der Minimalen Ausgangsspannung in einer Pulsperiode als Vergleichsgröße herangezogen. Diese Spannungsdifferenz wird als Brummspannung bezeichnet.

$$U_{\text{Brumm}} = U_{\text{max}} - U_{\text{min}} \quad (1.1)$$

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung der Spannungsqualität ist die Angabe des Gleichspannungsmittelwertes  $\bar{U}$  und des Effektivwertes des Wechselanteils  $U_{\text{AC}}$ . Der Gleich-

spannungseffektivwert kann dann durch

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\bar{U}^2 + U_{\text{AC}}^2} \quad (1.2)$$

berechnet werden.

### 1.2.1. Normen / Qualität des Netzstromes

Die Bundesrepublik Deutschland hat nach Vorgabe der Europäischen Union das „Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln (EMVG)“ erlassen. In der Version vom 26.02.2008 heißt es darin:

#### Grundlegende Anforderungen

1. Betriebsmittel müssen nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik so entworfen und gefertigt sein, dass
  - a) die von ihnen verursachten elektromagnetischen Störungen kein Niveau erreichen, bei dem ein bestimmungsgemäßer Betrieb von Funk- und Telekommunikationsgeräten oder anderen Betriebsmitteln nicht möglich ist;
  - b) sie gegen die bei bestimmungsgemäßigem Betrieb zu erwartenden elektromagnetischen Störungen hinreichend unempfindlich sind, um ohne unzumutbare Beeinträchtigung bestimmungsgemäß arbeiten zu können.
2. Ortsfeste Anlagen müssen zusätzlich zu den Anforderungen nach Absatz 1 nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik installiert werden. Die zur Gewährleistung der grundlegenden Anforderungen angewandten allgemein anerkannten Regeln der Technik sind zu dokumentieren.

Die genannten „anerkannten Regeln der Technik“ können dabei beispielsweise aus den entsprechenden VDE-Normen entnommen werden. So sind zum Beispiel in DIN-EN-VDE-61000 Grenzwerte für die Ströme festgelegt, die ein Gerät vom öffentlichen Netz beziehen darf. Im Bereich niedriger Frequenzen werden diese Grenzen als maximale Amplituden der Harmonischen Oberschwingungen bezogen, im Bereich höherer Frequenzen auf die Frequenz selbst. Es gibt aber auch Bereiche, die unreguliert bleiben, zum Beispiel wenn Ströme mit diesen Frequenzen keine Störungen verursachen.

Diese Grenzwerte sollen auch von den hier untersuchten Diodengleichrichtern eingehalten werden.

Zur Beschreibung der Qualität des Netzstromes stehen folgende Kenngrößen zur Verfügung:

- Mit dem **Klirrfaktor** wird das Verhältnis aller Oberschwingungseffektivwerte zum Gesamteffektivwert einer Größe angegeben. Je kleiner der Klirrfaktor, desto besser die Qualität des Stromes.
- In einem **Bodediagramm** wird der Effektivwert des Netzstromes über der Frequenz dargestellt. Optimal wäre ein Hochpunkt bei der Grundfrequenz und Null bei allen anderen Frequenzen.
- Der **Grundschiwungsphasenwinkel**  $\varphi$  gibt den elektrischen Phasenwinkel zwischen der Netzspannung und der Grundschiwung des Stromes an. Auch hier wird  $\varphi = 0$  als optimal angesehen.
- Die **THD** „Total Harmonic Distortion“ ist das Verhältnis von der Summe aller Leistungen der Oberschwingungen zur Leistung der Grundschiwung. Es gilt wieder: Je kleiner der THD desto besser.

Eine weitere Beschreibung dieser Größen finden Sie im Kapitel 1.7.

## 1.3. Gleichrichterschaltungen

Die gängigsten Gleichrichterschaltungen aus Dioden sind

- Die Zweipuls-Brückenschaltung (Auch Wechselstrombrückenschaltung genannt)
- Die Dreipuls-Mittelpunktschaltung (Nicht mehr verbreitet, erzeugt einen Gleichanteil auf der Wechselspannungsseite)
- Die Sechspuls-Brückenschaltung (Drehstrombrückenschaltung)
- Die Zwölfpuls-Brückenschaltung (bei sehr großen Leistungen, benötigt speziellen Transformator)

In diesem Versuch wird nur die Zweipuls-Brückenschaltung und die Sechspuls-Brückenschaltung untersucht.

## 1.4. Eigenschaften und Kennlinie einer Leistungsdiode

Ein pn-Übergang stellt ein technisch brauchbares Ventil dar, wenn an p- und n-Gebiet je ein flächenhafter Metallkontakt angebracht ist. Ein Sonderfall der pn-Diode ist die psn-Diode oder auch pin-Diode genannt. Hier ist zwischen einer hochdotierten p-Zone auf der einen und einer hochdotierten n-Zone auf der anderen Seite eine hochohmige, schwach dotierte oder gar nicht dotierte Mittelzone eingebettet (s bedeutet schwach dotiert, dabei ist es egal ob schwach n- oder schwach p- dotiert bzw. i bedeutet intrinsisch). Die hochohmige Mittelzone ist notwendig, um hohe Spannungen sperren zu können. Gleichzeitig vermag die psn-Diode aber auch hohe Ströme zu führen, weil die Mitte bei einer in Durchlassrichtung gepolten Spannung von den beiden Randzonen her mit Ladungsträgern überschwemmt wird. Die Diode wird dabei sehr niedrigohmig.

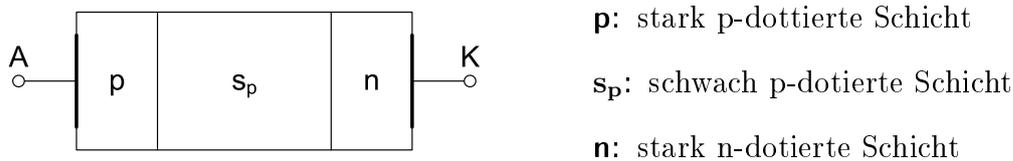


Abbildung 1.1.: Aufbau einer Leistungsdiode

### 1.4.1. Kennlinie

Die Ventileigenschaften der Diode lassen sich durch die statische Kennlinie beschreiben (siehe Abbildung 1.2). Ist die Ventilspannung  $U_V$  negativ, so sperrt die Diode. Es fließt ein sehr kleiner Strom  $I_R$  in Sperrrichtung. Ein Überschreiten der Durchbruchspannung  $U_{BR}$  führt sehr schnell zu einem Steilanstieg des Sperrstroms. Ist die Anodenspannung positiv, so leitet die Diode. Die Durchlassspannung  $U_F$  beträgt dabei ca. 1 Volt.

#### Die wichtigsten Kenngrößen der Diode

**$I_{F(AVM)}$**  Der Dauergrenzstrom ist der arithmetische Mittelwert des dauerhaft zulässigen Durchlassstroms, der nach DIN 41787 auf eine angegebene Gehäusetemperatur oder bestimmte Kühlung bezogen ist. Bei Betrieb mit Dauergrenzstrom ist ein Überstrom nicht zulässig, da bei dieser Belastung die thermische Grenze erreicht wird.

**$U_{RRM}$**  Periodische Spitzenspannung ist der höchste zulässige Augenblickswert von periodisch auftretenden Spitzenspannungen.

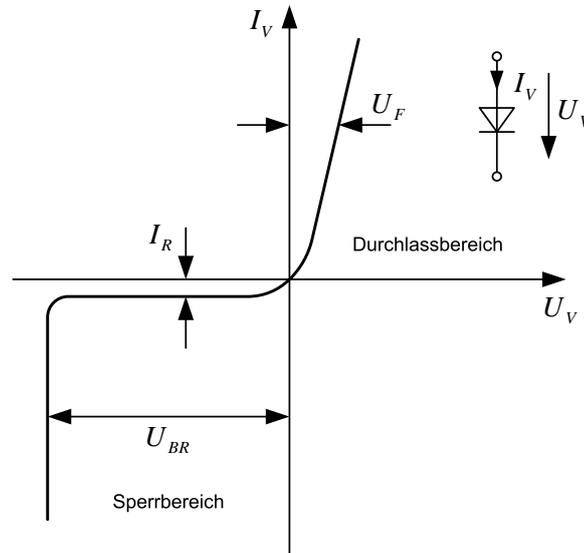


Abbildung 1.2.: Kennlinie

### 1.4.2. Schutzeinrichtungen

Infolge ihrer kleinen Wärmekapazität ist die Diode gegen Überlastung durch Strom und Spannung sehr empfindlich. Zum Schutz gegen Überstrom verwendet man überflinke Sicherungen (siehe Abbildung 1.3), deren Schmelzintegral  $\int i^2 dt$  kleiner ist als das Lastintegral  $\int i_V^2 dt$  der Diode.

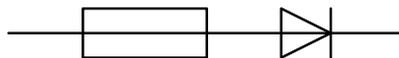


Abbildung 1.3.: Sicherung zum Schutz der Diode vor Überströmen

Falls aus dem angeschlossenen Netzwerk Spannungsspitzen infolge des Rückstromverhaltens der Diode (Trägerstauereffekt) erwartet werden, so können diese durch eine RC-Beschaltung (siehe Abbildung 1.4) gedämpft werden. Denn diese Beschaltung begrenzt das  $\frac{dU}{dt}$  an der Diode und wird oft als Snubber bezeichnet.

### 1.4.3. Idealisierung

Für sehr viele Betrachtungen können der Diode die Eigenschaften eines idealen Schalters zugeordnet werden ( $I_R = 0$  und  $U_F = 0$ ).

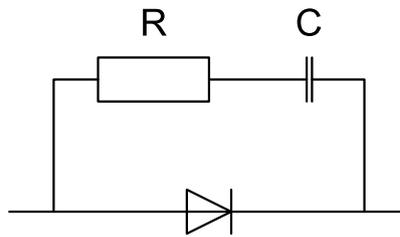


Abbildung 1.4.: Schutzbeschaltung mittels R-C-Glied

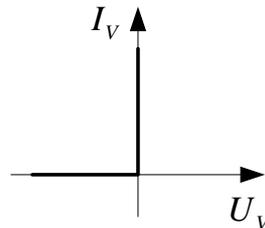


Abbildung 1.5.: Kennlinie eines idealen Schalters

#### 1.4.4. Verluste

Die Verluste an einer Diode setzen sich aus

- den Durchlassverlusten
- den Sperrverlusten
- den Schaltverlusten

zusammen.

Die Durchlassverluste der Dioden fallen immer dann an, wenn ein Strom in Durchlassrichtung durch eine Diode fließt. Die Durchlassspannung setzt sich dabei näherungsweise aus einem konstanten Anteil und einem differentiellen Anteil zusammen. Die momentane Verlustleistung beträgt demnach  $p(t) = U_F \cdot i(t) + r_D \cdot i(t)^2$ .

Die Sperrverluste werden durch den geringen Leckstrom  $I_V$  verursacht. Dieser Strom ist in üblichen Bauelementen so gering, daß er vernachlässigt werden kann.

Die Schaltverluste werden durch die Umladung der parasitären Kapazität in der Diode beim Schalten verursacht. Sie können eine wesentliche Rolle spielen, wenn die Diode mit hohen Schaltfrequenzen betrieben wird. In der Anwendung als Netzgleichrichter muß die Diode aber nur alle  $10ms$  eine Schalthandlung durchführen. Diese Verluste können darum ebenfalls vernachlässigt werden.

## 1.5. Zweipuls-Brückenschaltung

Die Zweipuls-Brückenschaltung (Pulszahl  $p=2$ ) formt die Wechselspannung in eine zweipulsige Gleichspannung um (Bild 1.6). Nach jeder Halbperiode wechseln sich die beiden Ventile eines Brückenweiges (Diode 1 und 2 oder Diode 3 und 4) in der Stromführung ab. Die Zweipuls-Brückenschaltung wird oft auch als Wechselstrombrückenschaltung bezeichnet.

Wird ein starres Netz vorausgesetzt, so erhält man die in Abbildung 1.7 dargestellten Spannungsverläufe. Der Wechselanteil der gleichgerichteten Spannung  $\tilde{u}_d$  hat eine Pulsfrequenz  $f = 2 \cdot f_{\text{Netz}}$ . Die Anodenspannung  $u_{D1}$  zeigt die Sperrbeanspruchung der Diode 1. Die ideale Leerlaufgleichspannung berechnet sich nach der Formel

$$U_{di} = \sqrt{2} \cdot U_{L1} \quad (1.3)$$

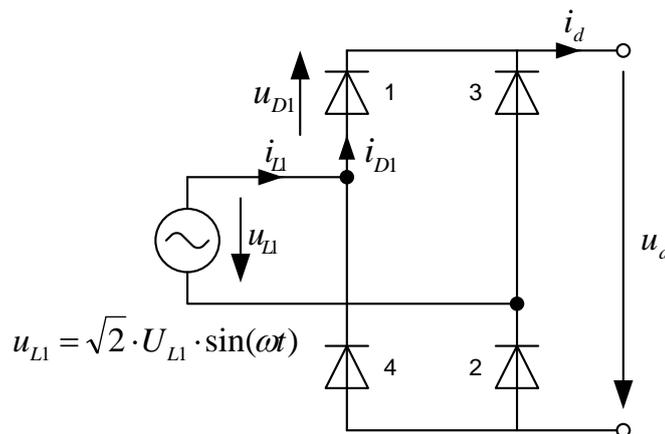


Abbildung 1.6.: Zweipuls-Brückenschaltung

### 1.5.1. Kapazitive Glättung der gleichgerichteten Spannung

Bei rein ohmscher Last hat der gleichgerichtete Strom ( $i_d$ ) den gleichen zeitlichen Verlauf wie die gleichgerichtete Spannung  $u_d$ . Die Ausgangsleistung pulsiert also mit der doppelten Netzfrequenz. Dies ist in sehr vielen Anwendungen unerwünscht. Gerade bei elektronischen Geräten, wie zum Beispiel Microcontrollern ist eine ununterbrochene Spannungsversorgung für den Betrieb unerlässlich.

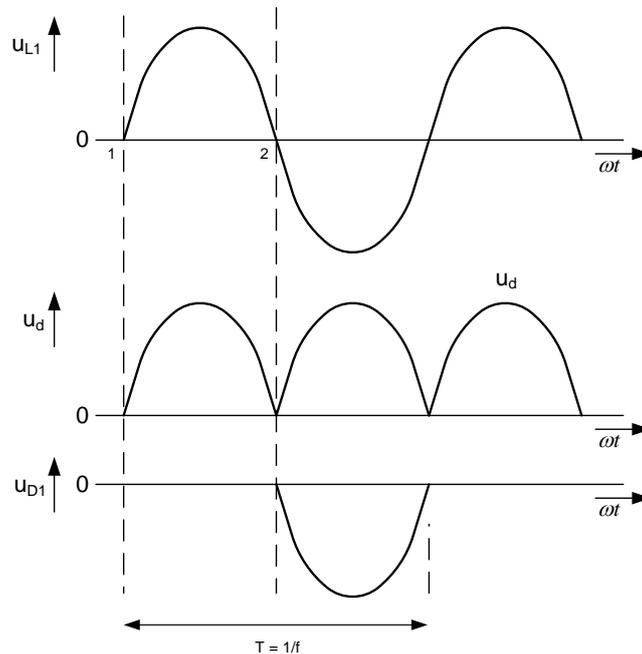


Abbildung 1.7.: Zeitverläufe der Spannung bei der Zweipuls-Brückenschaltung ohne Glättungseinrichtung

Zur Glättung des Stromes benutzt man im einfachsten Fall eine Kapazität, wie in Bild 1.8 dargestellt. Die Kondensatorspannung wird dann periodisch auf den Scheitelwert der Netzspannung aufgeladen und stellt somit für den Verbraucher eine ununterbrochene Gleichspannung zur Verfügung.

Diese Schaltung ist sehr einfach, billig und klein zu realisieren. Sie wird darum bei sehr vielen kleinen Haushaltsgeräten, wie in Netzteilen für Handys oder Computern, bei Radios, Uhren, kleineren Lampen usw. eingesetzt.

### 1.5.2. Netzstromverlauf

Die Verhältnisse der Strom- und Spannungsverläufe bei idealen Bauelementen sind in Bild 1.9 dargestellt. Ab dem Zeitpunkt 1 übersteigt die gleichgerichtete Netzspannung die Kondensatorspannung. Der Netzstrom steigt stark an und lädt den Kondensator bis auf den Maximalwert  $\hat{u}$ . Zum Zeitpunkt 2 sinkt die gleichgerichtete Netzspannung wieder unter den Wert des nun voll aufgeladenen Kondensators. Ab diesem Zeitpunkt wird die Last ausschließlich aus dem Kondensator versorgt. Die Kondensatorspannung sinkt darum zeitlich linear bis zum Zeitpunkt 3 ab. Die Spannungsdifferenz zwischen dem maximalen und dem minimalen Wert wird als Brummspannung bezeichnet, die Zeitspanne, in der ein

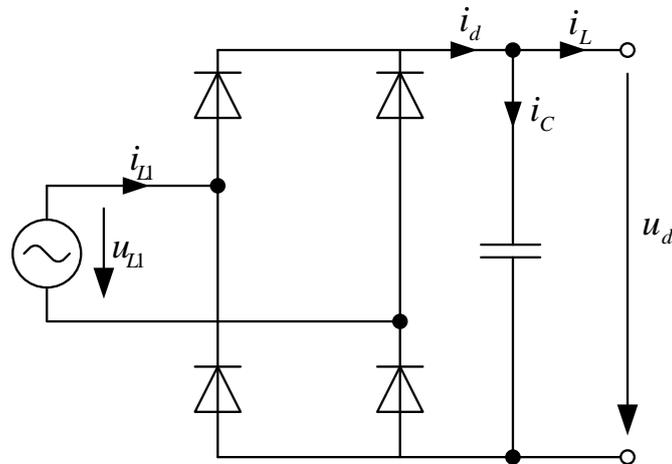


Abbildung 1.8.: Zweipuls-Brückenschaltung mit kapazitiver Glättung

Netzstrom fließt, wird als Stromflußwinkel  $\phi$  bezeichnet. Tatsächlich befindet sich aber immer ein Verlustwiderstand im Stromkreis, der sich im Wesentlichen aus der Netzimpedanz und dem Innenwiderstand des Kondensators zusammensetzt. Diese Verhältnisse sind in Bild 1.10 dargestellt. Für diesen Fall kann der Netzstromverlauf folgendermaßen berechnet werden: Zum Zeitpunkt  $\omega t = \alpha_0$  erreicht die Netzspannung abzüglich der Diodenspannungen gerade den Betrag der Kondensatorspannung. Ab diesem Zeitpunkt fließt ein Strom über den Verlustwiderstand  $R_V$ , der im Kondensator zur Kondensatorspannung aufintegriert wird.

$$i_C(\omega t) = \frac{u_N(\omega t) - \left( \frac{1}{C} \int_{\alpha_0}^{\omega t} i_C(\omega t) d\omega t + u_C(\alpha_0) \right)}{R_V} \Bigg|_{\alpha_0 \leq \omega t \leq \alpha_0 + \phi} \quad (1.4)$$

Die übrige Zeit fließt aus dem Kondensator nur der Laststrom ab.

$$i_C(\omega t) = i_L(\omega t) = \text{const.} \Big|_{\alpha_0 + \phi \leq \omega t \leq \alpha_0} \quad (1.5)$$

Löst man die Differentialgleichung 1.5.2 auf, so kann damit zum Beispiel bei bekanntem Leitwinkel  $\phi$  die Netzimpedanz bestimmt werden.

Generell gilt: je größer der Kondensator und je kleiner der Laststrom, desto kleiner wird  $\phi$  und desto kleiner wird der Spannungsrippel  $U_{\text{brumm}}$  am Ausgang. In den ../Bildern 1.11 und 1.12 sind die simulierten Netzstromverläufe für die Netzimpedanz von  $0,05\Omega$  und  $5\Omega$  dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, daß der Netzstromverlauf bei der kleinen Netzim-

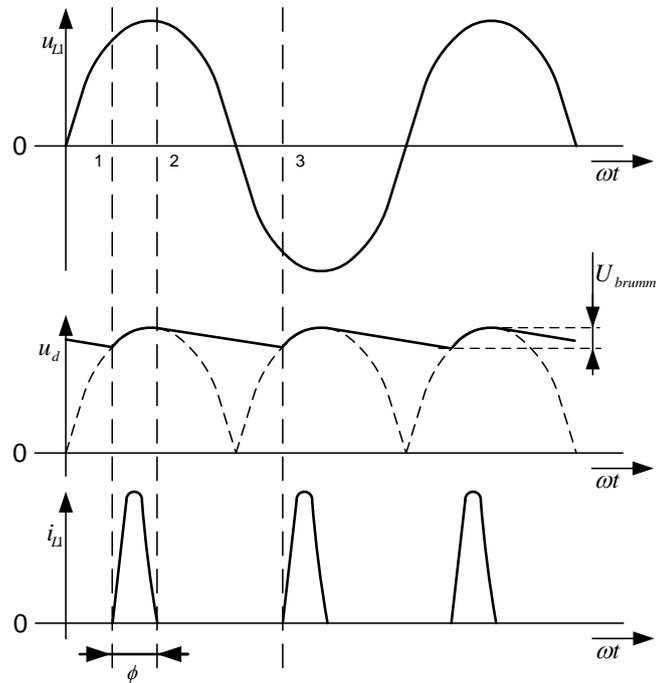


Abbildung 1.9.: Zeitverläufe bei der Zweipuls-Brückenschaltung mit kapazitiver Glättung

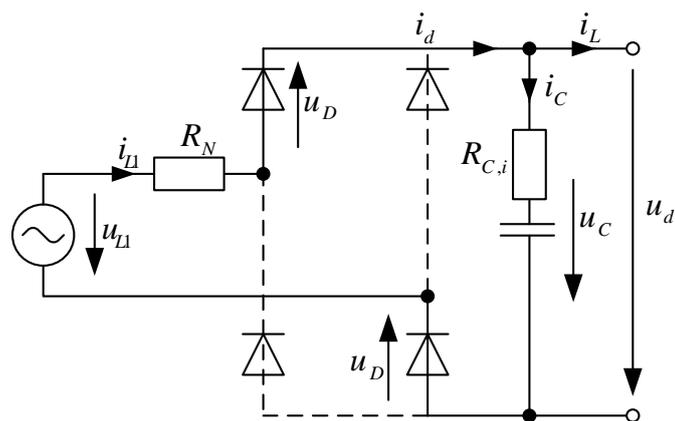


Abbildung 1.10.: Zweipuls-Brückenschaltung mit kapazitiver Glättung und Verlustwiderständen

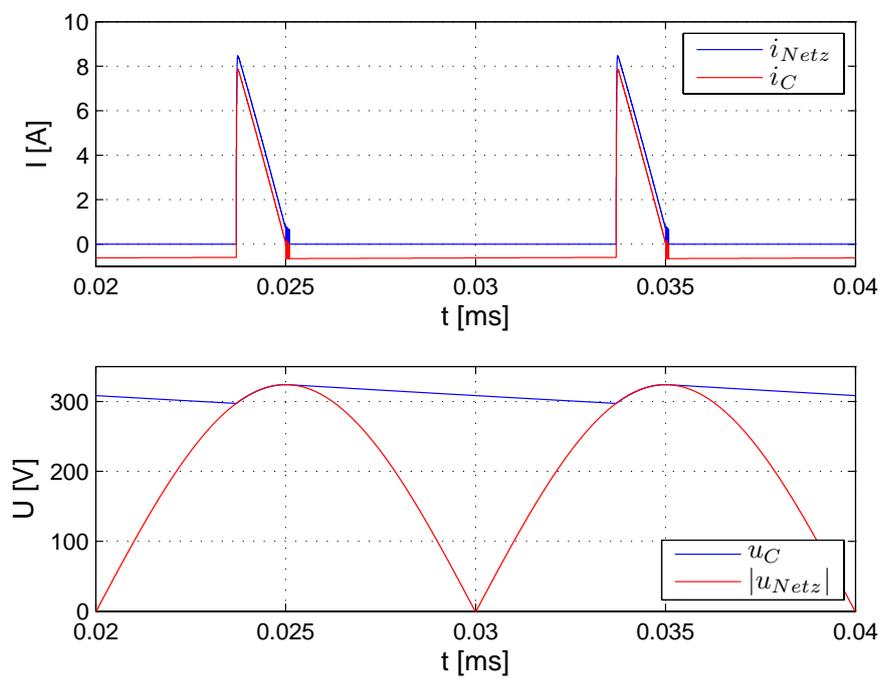


Abbildung 1.11.: Simulierte Zeitverläufe bei der Zweipuls-Brückenschaltung mit kapazitiver Glättung und  $500\Omega$  Last. Die Netzimpedanz wurde mit  $0,05\Omega$  angenommen.

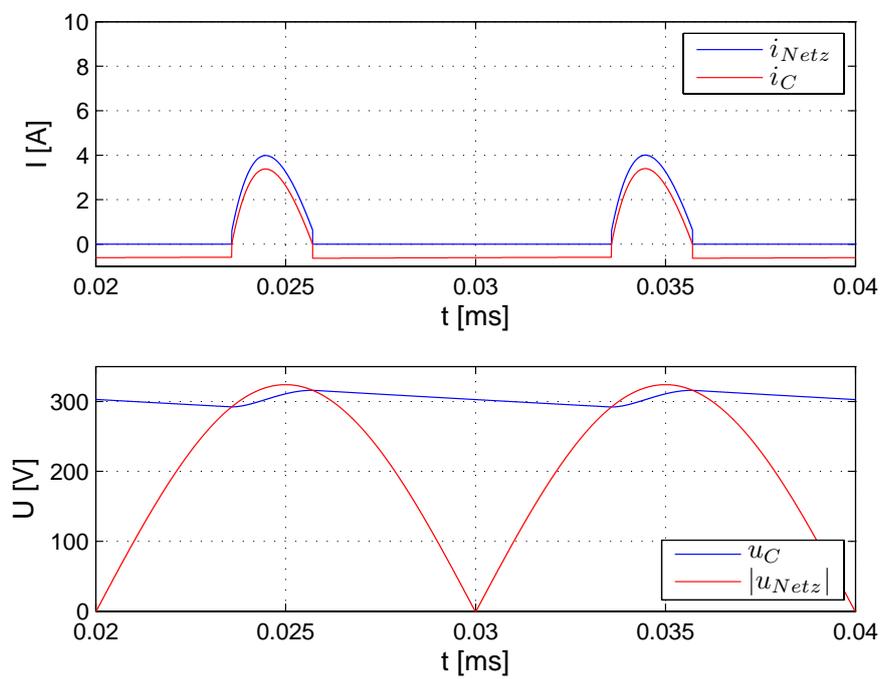


Abbildung 1.12.: Simulierte Zeitverläufe bei der Zweipuls-Brückenschaltung mit kapazitiver Glättung und  $500\Omega$  Last. Die Netzimpedanz wurde mit  $5\Omega$  angenommen.

pedanz sehr gut dem theoretischen Verlauf entspricht. Eine größere Netzimpedanz kann sich aber deutlich auf den Stromverlauf auswirken und den Stromflusswinkel  $\varphi$  wesentlich vergrößern.

Der Stromflusswinkel für den idealen Fall (keine Verluste an den Dioden,  $Z_{\text{Netz}} = 0$ ) lässt sich über die Leistungsbilanz berechnen:

$$W_{\text{Last}} = R_{\text{Last}} \cdot I_{\text{Last}}^2 \cdot \frac{1}{f_{\text{Netz}} \cdot 2} = 2 \cdot \int_0^\pi U_{\text{Netz}} \cdot I_{\text{Netz}} dt \quad (1.6)$$

Der Nachteil der Schaltung stellt die ungünstige Stromform dar. Die Stromspitzenwerte übersteigen den Effektivwert des Stromes um ein Vielfaches und das Netz wird stark mit Oberschwingungen des Stromes belastet.

Da für Geräte am öffentlichen Netz eine geeignete EMV verlangt wird, dürfen Wechselstrombrückenschaltungen mit kapazitiver Glättung nur bis ca. 80W eingesetzt werden.

## 1.6. Sechspuls-Brückenschaltung

Die bei Stromrichtern größerer Leistung meist verwendete Drehstrombrückenschaltung besteht aus drei Brückenzweigen, die jeweils aus zwei Dioden aufgebaut sind.

In der einen Brückenhälfte (Ventile 1, 3, 5) führt jeweils die Diode den Strom, die das höchste Anodenpotential gegenüber dem Sternpunkt besitzt, während in der anderen Brückenhälfte (Ventile 2, 4, 6) die Diode mit dem niedrigsten Kathodenpotential den Strom führt. Daraus ergibt sich die sechspulsige resultierende gleichgerichtete Spannung  $u_d$ . Für die Leerlaufgleichspannung der Sechspuls-Brückenschaltung gilt

$$U_{di} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_S \approx 2,34 \cdot U_S . \quad (1.7)$$

### 1.6.1. Induktive Glättung des Gleichstromes

Auch bei der Sechspulsbrückenschaltung möchte man die Last mit einer möglichst konstanten Leistung betreiben. Die kapazitive Glättung ist in diesem Fall aber normalerweise nicht möglich, da Grenzwerte der Anschlussbedingungen damit nicht eingehalten werden könnten. In diesem Fall ist die induktive Glättung des Stromes wie in Bild 1.15 üblich. Dabei wird durch die Spannung  $u_d$  ein Strom durch die Drossel und die Last aufgebaut. Im Tiefpunkt der gleichgerichteten Spannung dreht sich die Spannung an der Drossel um,

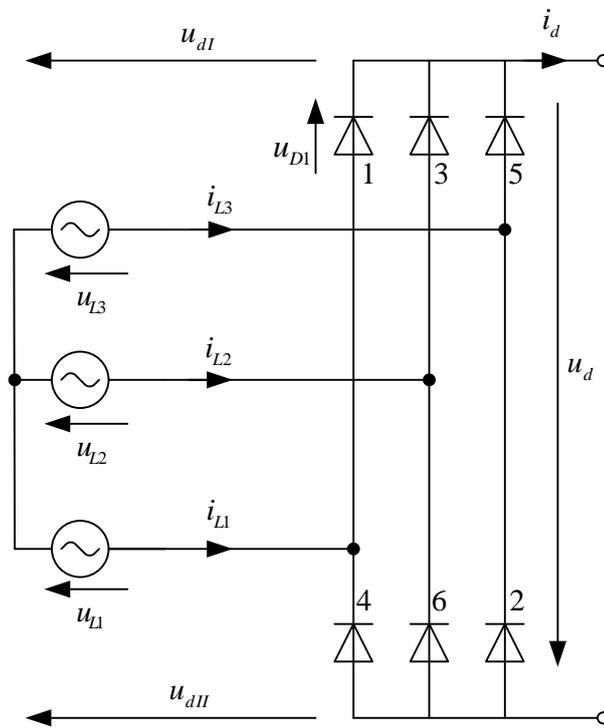


Abbildung 1.13.: Sechspuls-Brückenschaltung

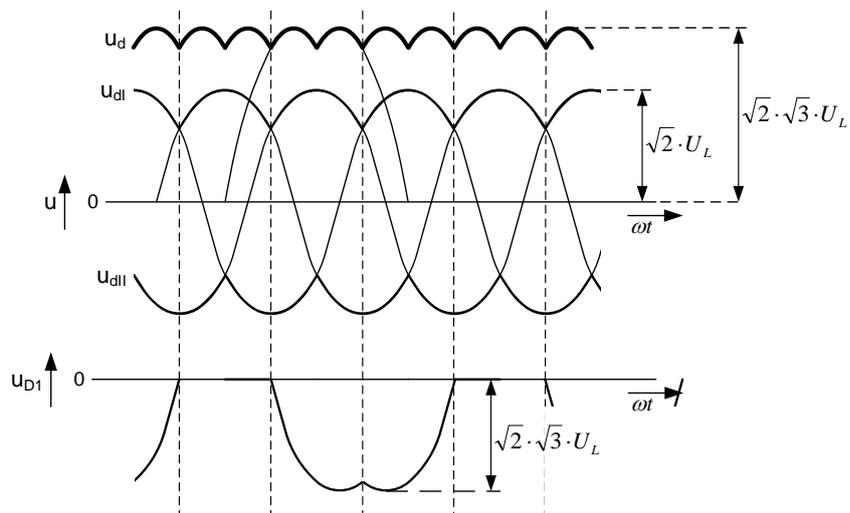


Abbildung 1.14.: Zeitverläufe der Spannung bei der Sechspuls-Brückenschaltung

sie wird wieder abmagnetisiert und der Strom durch die Last wird aufrechterhalten. Auf der Netzseite stellt sich dadurch ein Stromfluss wie in Bild 1.16 ein.

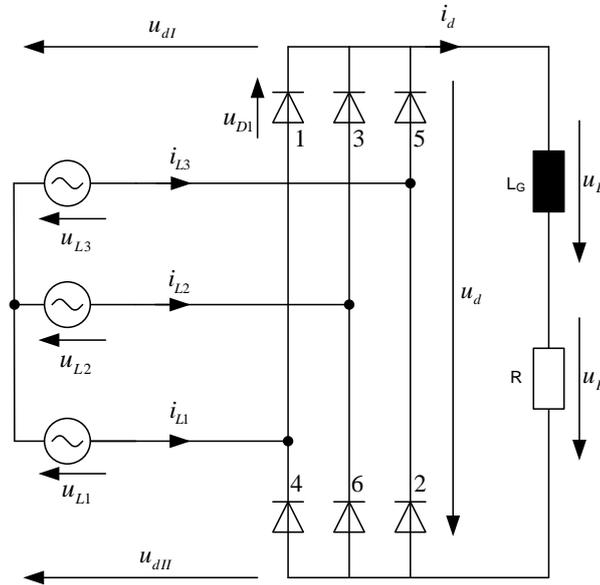


Abbildung 1.15.: Sechspuls-Brückenschaltung mit induktiver Glättung des Gleichstromes

Damit diese Art der Glättung ausreichend gut funktioniert muß die Glättungsdrossel, abhängig von der erwarteten Belastung, ausreichend groß dimensioniert werden. Das heißt, die Zeitkonstante der Last

$$\tau_L = \frac{L_G}{R} \quad (1.8)$$

muß viel größer sein, als die Zeitkonstante der Grundfrequenz der gleichgerichteten Spannung

$$\tau_{U_d} = \frac{1}{6 \cdot f_{\text{Netz}}} \cdot \quad (1.9)$$

$$\tau_L \gg \tau_{U_d} \quad (1.10)$$

Unter dieser Voraussetzung kann man annehmen, dass der Wechselanteil der gleichgerichteten Spannung an der Drossel abfällt ( $u_{L_G}$ ). Der gleichgerichtete Strom ist dann sehr glatt und die Eingangsströme werden blockförmig.

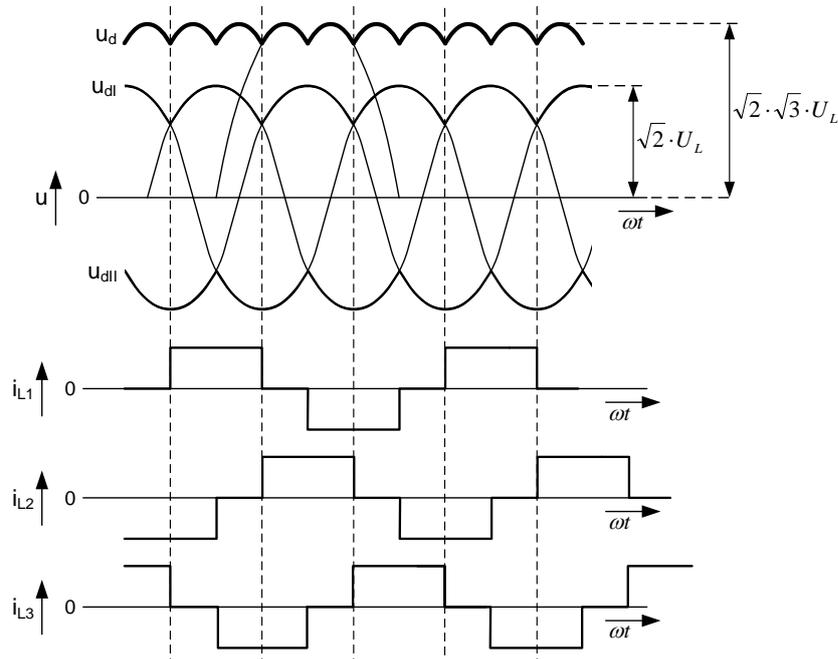


Abbildung 1.16.: Zeitverläufe der Ströme bei der Sechspuls-Brückenschaltung mit induktiver Glättung

Die Harmonischen dieser Stromblöcke lassen sich leicht berechnen und müssen ebenfalls wieder die gängigen Vorschriften einhalten. Bei größeren Leistungen können auf der Netzseite noch Kommutierungsdrosseln wie in Bild 1.17 eingebaut werden, die zu einer weiteren Reduktion der Oberschwingungen beitragen. Der zeitliche Verlauf der drei Netzströme ähnelt dann dem Beispiel in Bild 1.18.

## 1.7. Leistungsdefinitionen

Während die Netzspannungen in einem starren Netz sinusförmig bleiben, setzen sich die Netzströme bei Stromrichterbetrieb aus Grundschwingung und Oberschwingungen zusammen. So treten z.B. bei Sechspuls-Schaltungen die Ordnungszahlen  $\nu = 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$  auf.

$$\nu = (n \cdot p \pm 1) \quad \text{mit } p = 6 \quad (1.11)$$

Allgemein definiert man nach DIN 40 110 (Wechselstromgrößen in Zweileiter-Stromkreisen) bei sinusförmiger Spannung und beliebigem Stromverlauf:

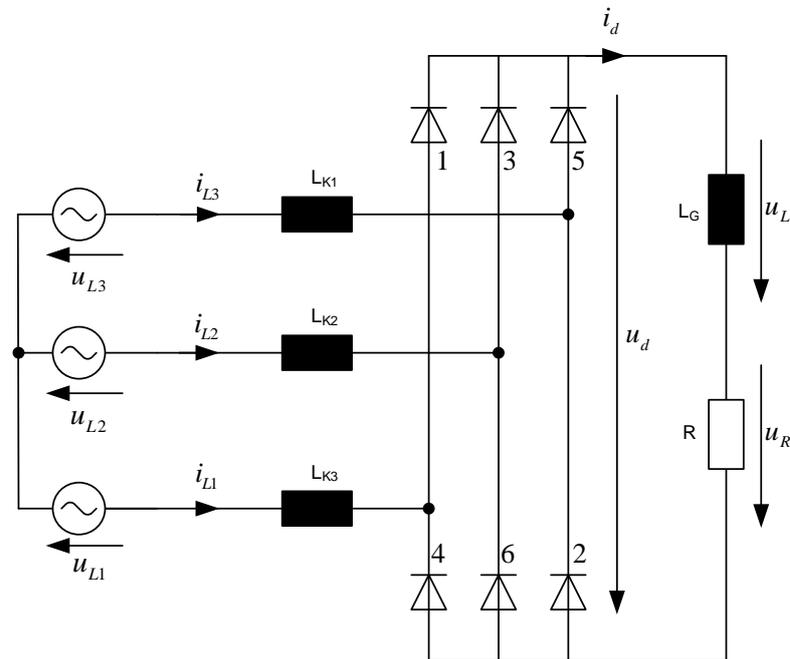


Abbildung 1.17.: Sechspuls-Brückenschaltung mit induktiver Glättung des Gleichstromes und Kommutierungsdrosseln auf der Netzseite

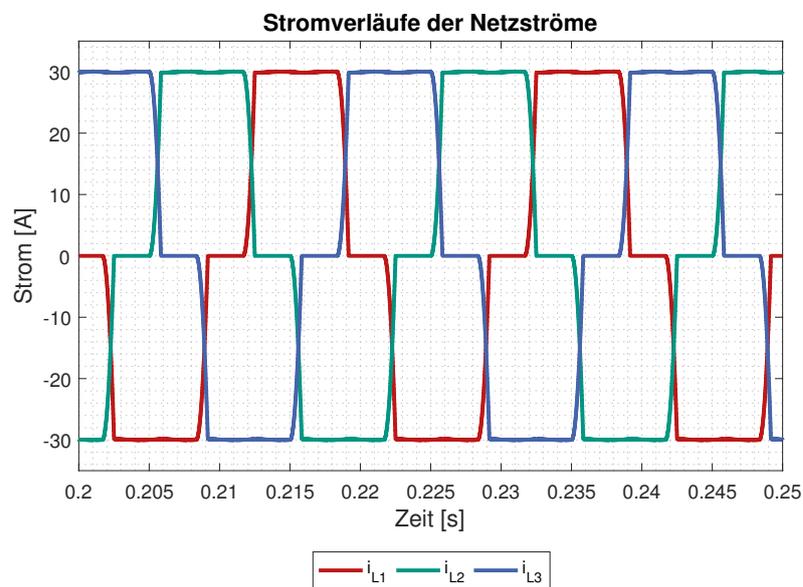


Abbildung 1.18.: Beispiel für die Stromverläufe der drei Eingangsphasen einer Sechspuls-Brückenschaltung mit induktiver Glättung des Gleichstromes und Kommutierungsdrosseln auf der Netzseite

- Effektivwert des Stromes

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (1.12)$$

- Wirkleistung

$$P = U \cdot I_1 \cdot \cos(\phi_1) \quad (1.13)$$

- Grundswingungs-Scheinleistung

$$S_1 = U \cdot I_1 \quad (1.14)$$

- Grundswingungs-Blindleistung

$$Q_1 = U \cdot I_1 \cdot \sin(\phi_1) \quad (1.15)$$

- Scheinleistung

$$S = U \cdot I \quad (1.16)$$

- Blindleistung

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{Q_1^2 + D^2} \quad (1.17)$$

- Verzerrungsblindleistung

$$D = U \cdot \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (1.18)$$

- Leistungsfaktor

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos(\phi_1) = g \cdot \cos(\phi_1) \quad (1.19)$$

- Grundswingungsgehalt des Stromes

$$g = \frac{I_1}{I} \quad (1.20)$$

Dabei ist zu beachten, daß in Drehstromsystemen die Leistungen um das  $\sqrt{3}$ -fache größer sind. Folgende Definitionen sind darüber hinaus verbreitet.

- Klirrfaktor

$$k = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I} \quad (1.21)$$

- Total Harmonic Distortion

$$\text{THD} = \frac{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}{I_1^2} \quad (1.22)$$

## 1.8. Beispiel der Kenndaten einer Diode (1N5408G)

- Sperrrichtung

Periodische Spitzensperrspannung	$U_{\text{RRM}}$	1000 V	
Sperrstrom	$I_{\text{R}}$	$5 \mu\text{A}$	$\vartheta_{\text{j}} = 25^\circ\text{C}$
		$100 \mu\text{A}$	$\vartheta_{\text{j}} = 125^\circ\text{C}$

- Durchlassrichtung

Dauergrenzstrom	$I_{\text{FAV}}$	3,0 A	$\vartheta_{\text{C}} = 59^\circ\text{C}$ , f=40 bis 1000 Hz
Stoßstrom	$I_{\text{FSM}}$	125 A	(Sinushalbwellen, 50 Hz)
Betriebs- und Lager- temperaturbereich	$\vartheta_{\text{j}}$	-65°C bis +150°C	
Maximale Vorwärtss- pannung	$U_{\text{F}}$	1,0 V	bei 3,0 A

## 2. Versuche

Die wesentlichen Komponenten zu diesem Versuch sind in einem 19 Zoll Einbauschrank untergebracht (Bild 2.1). Sie haben direkten Zugriff auf die zu messenden Spannungen über die Buchsen im Blindschaltbild auf der Frontplatte. Beachten Sie bitte, daß diese Spannungen direkt über Kabel herausgeführt werden und nicht potentialgetrennt sind. Verwenden Sie also passende Messeinrichtungen und berühren Sie keine unter Spannung stehenden Teile. Da sich Ströme in fertigen Schaltungen sonst nur schlecht messen lassen, wurden in die Schaltungen schon passende Wandler mit Verstärkerschaltungen integriert. Diese liefern an den BNC-Buchsen ein Spannungssignal, bei dem gilt  $1A \hat{=} 2V$ . Die Anlage verfügt über eine Dreifarbenampel mit folgenden Bedeutungen

**Blau** Die Anlage kann wegen Übertemperatur nicht weiterbetrieben werden. Sie steht wieder zur Verfügung, wenn sie ausreichend abgekühlt ist.

**Rot** Die Steuerspannung ist eingeschaltet, der Aufbau ist betriebsbereit.

**Gelb** Das Versorgungskabel der Anlage ist eingesteckt, die Steuerspannung ist ausgeschaltet.

Im unteren Bereich der Anlage erkennen Sie die Glättungsdrosseln für die Drehstrombrückenschaltung. Die im Schaltplan eingezeichnete Induktivität ist durch die Reihenschaltung dieser Drosseln realisiert. Zur Belastung der Drehstrombrückenschaltung sind an der Rückwand der Anlage mehrere Leistungswiderstände verbaut. Diese erzeugen im Betrieb erheblich viel Wärme. Rechnen Sie also damit, daß der Aufbau stellenweise heiß werden kann.

Für die Messungen stehen Ihnen hier folgende Geräte zur Verfügung:

- Oszilloskop mit Differenzastköpfen
- Leistungsmessgerät
- Tischmessgerät

- Computer mit Drucker

Beachten Sie, daß Oszilloskope üblicherweise zum Betrachten von zeitlichen Verläufen benutzt werden und nicht auf höchste Genauigkeit bei der Messung optimiert sind. Verwenden Sie daher dort wo es möglich ist für die Messungen das Tischmessgerät oder das Leistungsmessgerät. Sie können die Messergebnisse auch mit denen des Oszilloskops vergleichen, um einen Eindruck von der Genauigkeit zu bekommen.

Die Schaltpläne der aufgebauten Gleichrichterschaltungen sind in den ../Bildern 2.2 und 2.3 mit den notwendigen Angaben dargestellt.

## 2.1. Wechselstrombrückenschaltung

Messen Sie

- Den Netzspannungseffektivwert  $U_{L1}$
- Die Leerlaufspannung auf der Gleichspannungsseite  $U_{d0}$
- Die Spannung auf der Gleichspannungsseite  $U_d$  bei  $4,7k\Omega$  und  $9,4k\Omega$

$$U_{L1} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \quad U_{d0} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$$

$$U_{d,9k4\Omega} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \quad U_{d,4k7\Omega} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$$

Berechnen Sie die Ausgangsleistung der Schaltung:

$$P_{9k4\Omega, \text{real}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W} \quad P_{4k7\Omega, \text{real}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$$

und vergleichen sie diese mit den idealerweise zu erwartenden Werten. Berechnen sie dazu:

- Die erwartete Leerlaufspannung auf der Gleichspannungsseite  $U_{di}$
- Die erwartete Ausgangsleistung bei  $U_{di}$

$$U_{di} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \quad P_{9k4\Omega, \text{ideal}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W} \quad P_{4k7\Omega, \text{ideal}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$$

Die folgenden Versuche mit einem Lastwiderstand von  $9,4k\Omega$  durchgeführt. Betrachten Sie die Zeitverläufe der folgenden Größen und nehmen Sie diese als png- und csv - Datei auf. Danach lassen Sie sich die Verläufe plotten und legen Sie diese für ihre kleine Dokumentation ab. Beachten Sie die Reihenfolge für die automatisierte Auswertung.

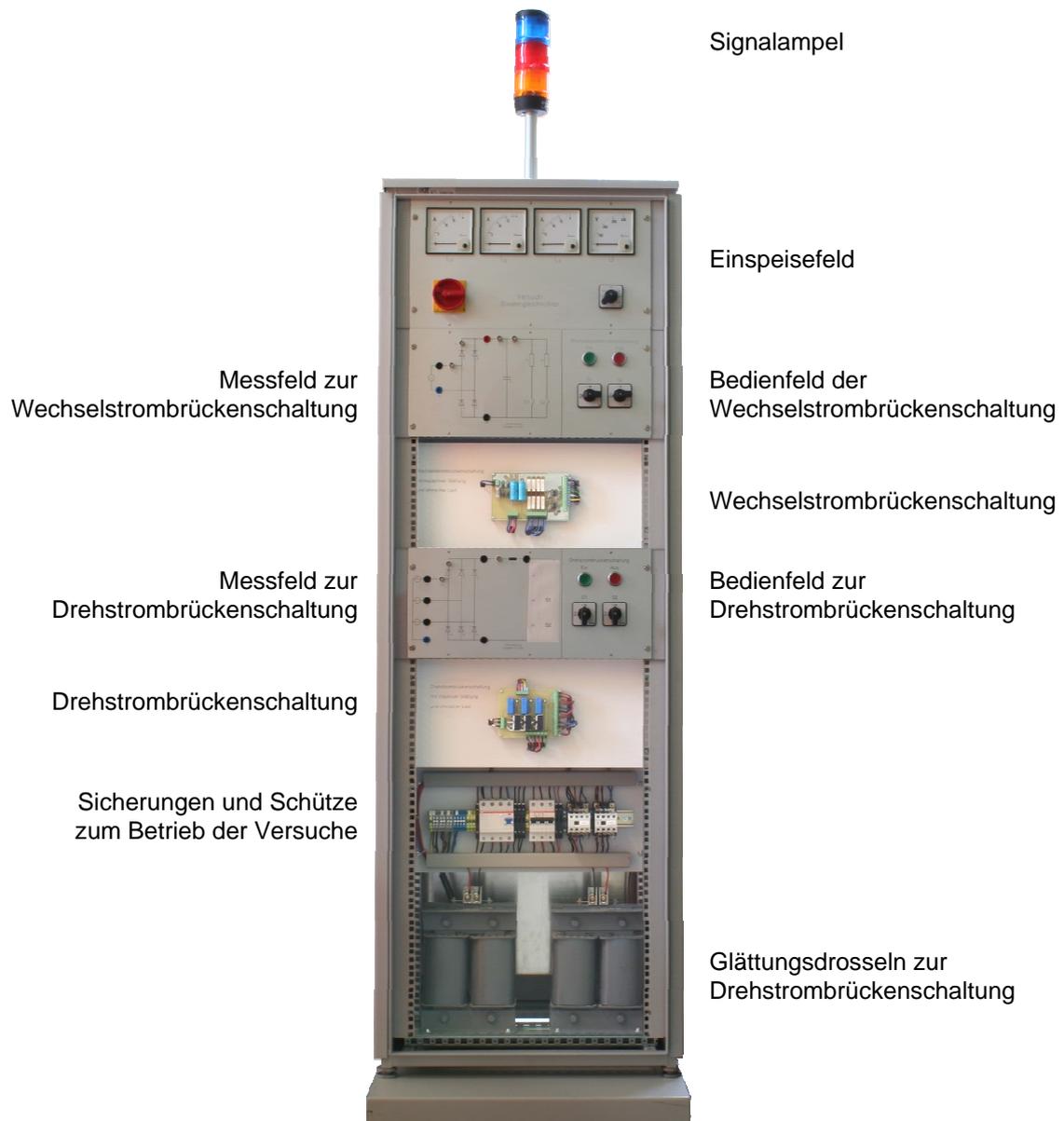


Abbildung 2.1.: Leistungselektronik zum Versuch „Ungesteuerte Gleichrichterschaltung“

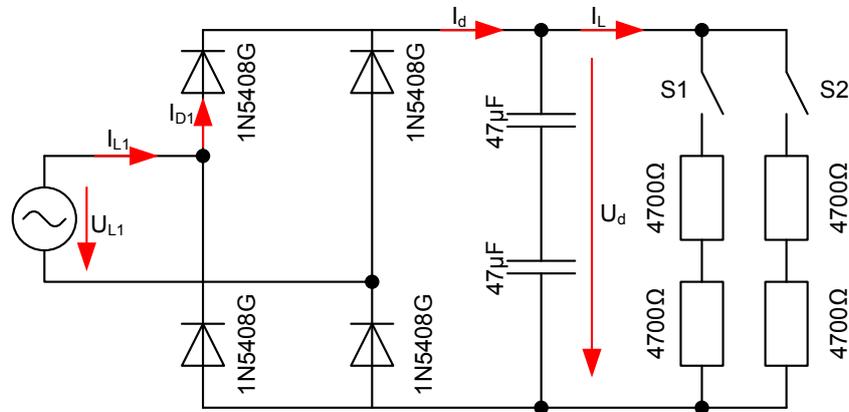


Abbildung 2.2.: Schaltplan der aufgebauten Wechselstrombrückenschaltung

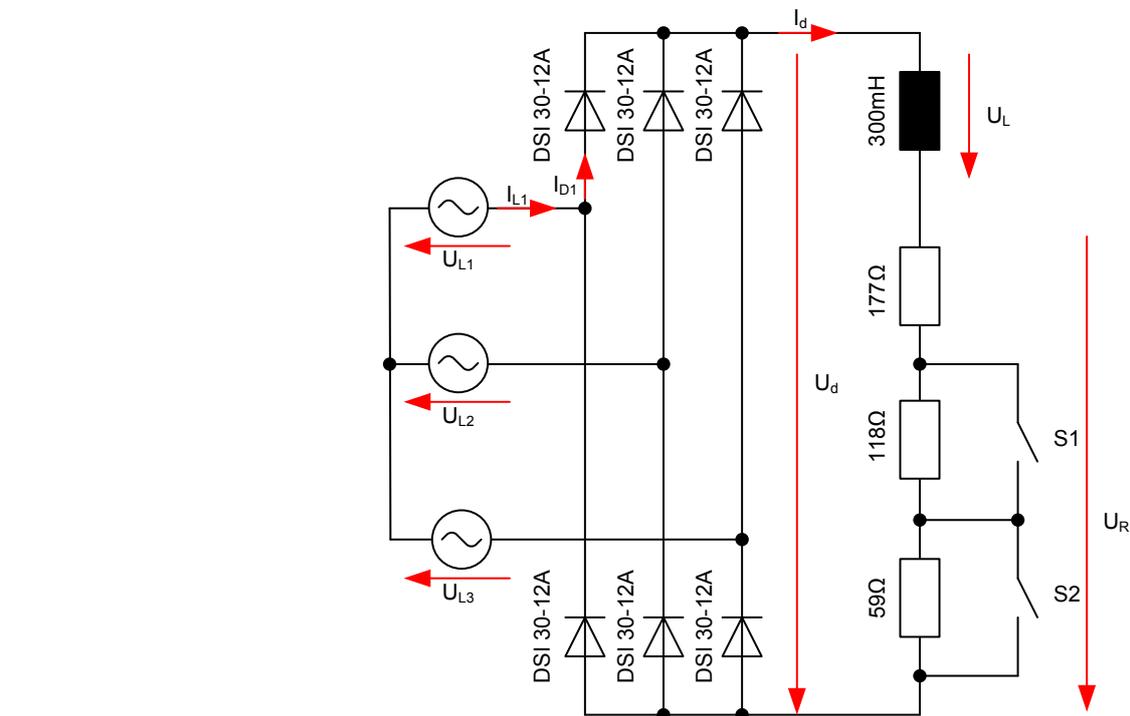


Abbildung 2.3.: Schaltplan der aufgebauten Drehstrombrückenschaltung

- Die Ausgangsspannung  $u_d$
- Den Netzstrom  $i_{L1}$
- Den Diodenstrom  $i_{D1}$
- Den gleichgerichteten Netzstrom  $i_d$
- Den Laststrom  $i_L$

Bestimmen Sie durch Messung und aus den Zeitverläufen

- Den Ausgangsspannungsmittelwert  $\overline{U_d}$
- Den Wechselspannungseffektivwert der Ausgangsspannung  $u_{d,AC}$
- Die Brummspannung  $U_{\text{Brumm}}$
- Die maximale Sperrspannung an einer Diode  $\hat{u}_{D1}$
- Den Strommittelwert durch eine Diode  $\bar{i}_{D1}$
- Den Maximalstrom durch eine Diode  $\hat{i}_{D1}$
- Den Leitwinkel  $\phi$
- Die Effektivwerte der 1. bis zur 14. Harmonischen des Netzstroms  $I_{L1_x}, x \in \{1, 14\}$
- Den Laststrom  $I_L$

$\overline{U_d} =$	_____ V	$u_{d,AC} =$	_____ V	$U_{\text{Brumm}} =$	_____ V
$\hat{u}_{D1} =$	_____ V	$\bar{i}_{D1} =$	_____ A	$\hat{i}_{D1} =$	_____ A
$\phi =$	_____ °	$I_{L1_1} =$	_____ A	$I_{L1_2} =$	_____ A
$I_{L1_3} =$	_____ A	$I_{L1_4} =$	_____ A	$I_{L1_5} =$	_____ A
$I_{L1_6} =$	_____ A	$I_{L1_7} =$	_____ A	$I_{L1_8} =$	_____ A
$I_{L1_9} =$	_____ A	$I_{L1_{10}} =$	_____ A	$I_{L1_{11}} =$	_____ A
$I_{L1_{12}} =$	_____ A	$I_{L1_{13}} =$	_____ A	$I_{L1_{14}} =$	_____ A
$I_L =$	_____ A				

Welche Werte der Ausgangsspannung können mit dem Tischmessgerät gemessen werden und welche mit dem Oszilloskop?

Berechnen Sie

- Den Ausgangsspannungseffektivwert  $U_d$
- Den Effektivwert des Eingangstroms  $I_{L1}$
- Den Klirrfaktor  $k$
- Das Verhältnis vom Spitzenwert des Diodenstromes  $\hat{i}_{D1}$  zum Laststrom  $I_L$

$$U_d = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \quad I_{L1} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A} \quad k = \underline{\hspace{2cm}} \quad \frac{\hat{i}_{D1}}{I_L} = \underline{\hspace{2cm}}$$

## 2.2. Drehstrombrückenschaltung

Messen Sie

- Die Netzspannungseffektivwerte  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$ ,  $U_{L3}$
- Die Spannung an der Last  $U_R$  bei einem Lastwiderstand von  $177\Omega$

$$U_{L1} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \quad U_{L2} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \quad U_{L3} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$$

$$U_R = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$$

Berechnen Sie die Ausgangsleistung der Schaltung:

$$P_{177\Omega} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$$

und vergleichen sie diese mit den idealen Werten. Berechnen Sie dazu

- Die erwartete Spannung auf der Gleichspannungsseite  $U_{di}$
- Die erwartete Ausgangsleistung  $P_{177\Omega,ideal}$

$$U_{di} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \quad P_{177\Omega,ideal} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$$

Die folgenden Versuche werden mit einen Lastwiderstand von  $177\Omega$  durchgeführt. Betrachten Sie folgenden Größen und nehmen Sie diese wieder als png- und csv - Datei auf. Danach lassen Sie sich die Verläufe ploten und legen Sie diese für ihre kleine Dokumentation ab. Beachten Sie wieder die Reihenfolge für die automatisierte Auswertung. :

- Die Ausgangsspannung  $u_d$  der Gleichrichterschaltung vor der Drossel
- Die Ausgangsspannung  $u_R$  an der Last
- Den Spannungsabfall an der Drossel  $u_L$
- Den Eingangsstrom  $i_{L1}$
- Den Diodenstrom  $i_{D1}$
- Den Ausgangsstrom  $i_d$

Bestimmen Sie durch Messung

- Den Ausgangsspannungsmittelwert  $\overline{U_R}$
- Den Wechselspannungseffektivwert der Ausgangsspannung  $u_{R,AC}$
- Die maximale Sperrspannung an einer Diode  $\hat{u}_{D1}$
- Den Strommittelwert durch eine Diode  $\bar{i}_{D1}$
- Den Maximalstrom durch eine Diode  $\hat{i}_{D1}$
- Die Effektivwerte der 1. bis zur 14. Harmonischen des Netzstroms  $I_{L1_x}, x \in \{1, 14\}$
- Die Brummspannung  $U_{Br,R=177\Omega}, U_{Br,R=295\Omega}, U_{Br,R=354\Omega}$  am Widerstand
- Den Laststrom  $I_d$

$\overline{U_R} =$ _____ V	$U_{R,AC} =$ _____ V	$\hat{u}_{D1} =$ _____ V
$\bar{i}_{D1} =$ _____ A	$\hat{i}_{D1} =$ _____ A	$I_{L1_1} =$ _____ A
$I_{L1_2} =$ _____ A	$I_{L1_3} =$ _____ A	$I_{L1_4} =$ _____ A
$I_{L1_5} =$ _____ A	$I_{L1_6} =$ _____ A	$I_{L1_7} =$ _____ A
$I_{L1_8} =$ _____ A	$I_{L1_9} =$ _____ A	$I_{L1_{10}} =$ _____ A
$I_{L1_{11}} =$ _____ A	$I_{L1_{12}} =$ _____ A	$I_{L1_{13}} =$ _____ A
$I_{L1_{14}} =$ _____ A	$U_{Br,R=177\Omega} =$ _____ V	$U_{Br,R=295\Omega} =$ _____ V
$U_{Br,R=354\Omega} =$ _____ V	$I_d =$ _____ A	

Welche Werte können mit dem Tischmessgerät und welche mit dem Oszilloskop gemessen werden?

Berechnen Sie

- Den Ausgangsspannungseffektivwert  $U_R$
- Den Effektivwert des Eingangstroms  $I_{L1}$
- Den Klirrfaktor  $k$
- Das Verhältnis vom Spitzenwert des Diodenstromes  $\hat{i}_{D1}$  zum Laststrom  $I_d$

$$U_R = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V} \quad I_{L1} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A} \quad k = \underline{\hspace{2cm}} \quad \frac{\hat{i}_{D1}}{I_L} = \underline{\hspace{2cm}}$$

### 2.3. Vergleich der Harmonischen im Eingangsstrom der beiden Schaltungen

Tragen Sie in Bild 2.4 das Verhältnis des Effektivwertes aller gemessenen Harmonischen des Eingangsstroms zur 1. Harmonischen des Eingangsstroms über der Frequenz für die Wechselstrombrückenschaltung und die Drehstrombrückenschaltung ein. Zur Berechnung können Sie die automatisierte Auswertung verwenden.

Warum werden für größere Bauleistungen nur Drehstrombrückenschaltungen verwendet?

### 2.4. Wirkungsgrad der Schaltungen

Messen sie mit dem Leistungsmessgerät LMG 500 die Ein- und Ausgangsleistung der Wechselstrombrückenschaltung bei maximaler Belastung:

$$P_{\text{in,BS}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W} \quad P_{\text{out,BS}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$$

Berechnen sie daraus den Wirkungsgrad der Schaltung:

$$\eta_{\text{BS}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

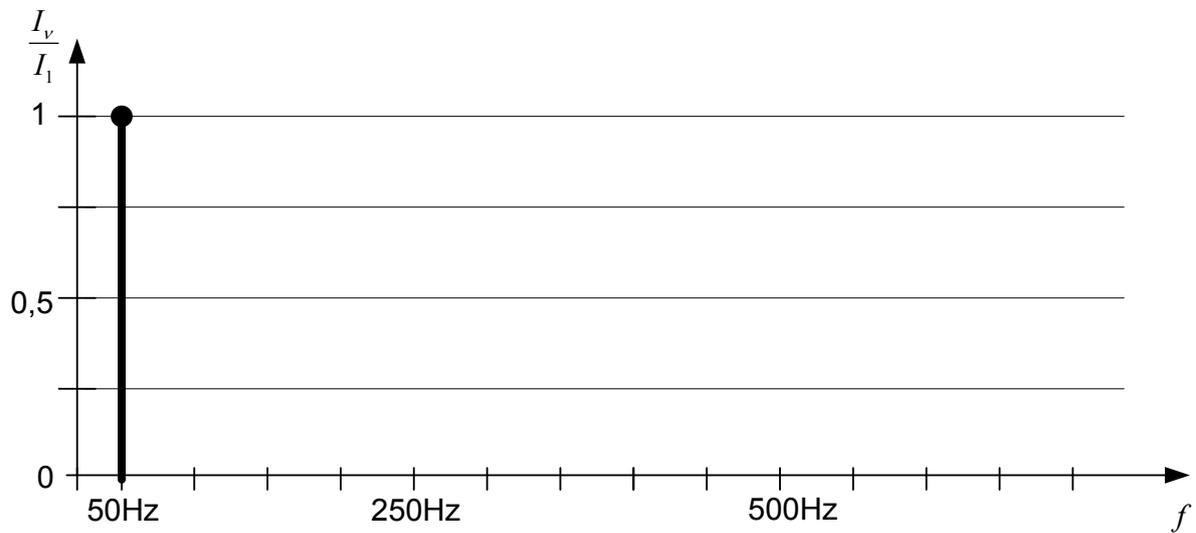


Abbildung 2.4.: Verteilung der Harmonischen bei den Gleichrichterschaltungen

Messen sie anschließend mit dem Leistungsmessgerät LMG 500 die Ein- und Ausgangsleistung der Drehstrombrückenschaltung bei maximaler Belastung:

$$P_{\text{in,DBS}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W} \quad P_{\text{out,DBS}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$$

Berechnen sie daraus den Wirkungsgrad der Schaltung:

$$\eta_{\text{DBS}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

## A. Abkürzungen in dieser Anleitung

$U$  Spannung, Effektivwert

$u$  Spannung, Zeitwert

$\bar{U}$  Spannung, Mittelwert

$\hat{U}$  Spannung, Spitzenwert

$U_{AC}$  Spannung, Wechselanteil

$U_{DC}$  Spannung, Gleichanteil

$I$  Strom, Effektivwert

$i$  Strom, Zeitwert

$\bar{I}$  Strom, Mittelwert

$\hat{I}$  Strom, Spitzenwert

$P$  Wirkleistung

$S$  Scheinleistung

$Q$  Blindleistung

$\omega$  Kreisfrequenz  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

## B. Indices

*d* Gleich- (z.B.  $u_d$  Zeitwert der Gleichspannung)

*R* Widerstand (z.B.  $u_R$  Zeitwert der Spannung am Widerstand)

*L* Drossel (z.B.  $u_L$  Zeitwert der Drosselspannung)

*D* Diode (z.B.  $u_D$  Zeitwert der Diodenspannung)

*L* Leiter- (z.B.  $U_L$  Leiterspannung)

**max** Maximalwert (z.B.  $U_{\max}$  Maximale Amplitude der Spannung)

*G* Glättung- (z.B.  $L_G$  Glättungsinduktivität)

*k* Kommutierung- (z.B.  $L_k$  Kommutierungsinduktivität)