

Sicherheitstechnische Unterweisung für energietechnische Labors:

1. Im Labor sind die Schutzmaßnahmen nach VDE 0100 einzuhalten, soweit die Versuchsdurchführung dies erlaubt. Erleichterungen sind gestattet.
2. Die Notausschalter müssen möglichst zentral und frei zugänglich angeordnet sein.
3. Spannung darf erst zugeschaltet werden, wenn die Schaltung geprüft und abgenommen wurde.
4. Schaltungsumbauten dürfen erst nach Ausschalten der Spannung vorgenommen werden.
5. Die Leitungen an den Klemmenbrettern der Roste und der Schaltkästen dürfen nur aus den Buchsen gezogen werden, wenn vorher an der Hauptschalttafel spannungsfrei geschaltet wurde.
6. Die Schalttafel darf nur vom Laborleiter oder dem Laboringenieur bedient werden. Ausnahmen hiervon müssen vom Laborleiter mit genauer Festlegung ausdrücklich gebilligt werden.
7. Nicht abgedeckte, blanke, spannungsführende Teile müssen so angeordnet werden, dass immer ein ausreichender Schutzabstand gewährleistet ist.
8. Bei der Aufstellung und Bedienung von Schiebewiderständen ist auf Standortisolierung zu achten.
9. Die Maschinenroste sind geerdet und damit alle darauf stehenden Teile. Die Gehäuse der übrigen Geräte sind ggf. zu erden.
10. Die Anschlüsse an den Klemmentafeln der Maschinenroste und der Versuchsstände werden über Schalter geführt. (Zusätzliche Sicherungen sind normalerweise nicht erforderlich, da die Abzweige in der Hauptschalttafel abgesichert sind.)
11. Leitungen dürfen nicht über die Maschinen geführt werden. Sie dürfen auch bei versehentlichem Zug keinesfalls mit rotierenden Wellen in Berührung kommen.
12. Die Maschinen (außer Kleinmotoren) dürfen nur mit dem Kran angehoben und transportiert werden.
13. Alle Maschinen müssen vor dem Anschließen der elektrischen Leitungen sorgfältig ausgerichtet und immer auf den Rosten befestigt sein.
14. Kupplungen und freie Wellenenden müssen mit dem Schutzschirm abgedeckt sein. Wenn diese zur Drehzahlmessung zugänglich sein müssen, ist besondere Vorsicht anzuwenden.
15. Bei losen Kleidungsstücken und langen Haaren ist ein entsprechend großer Sicherheitsabstand zu rotierenden Teilen einzuhalten.
16. Rauchen ist während der Laborveranstaltung nicht gestattet.
17. Der Weg zum Ausgang muss freigehalten werden.

Die vorstehenden Sicherheitsregeln habe ich zur Kenntnis genommen.

Datum	Name	Unterschrift

I. Hinweise zur Durchführung der Laborversuche im Labor "Leistungselektronik"

1. Versuchsvorbereitung

Die Teilnahme an den Versuchen im Labor "Leistungselektronik" bedingt wegen des teilweise komplexen Versuchsaufbaus sowie der Empfindlichkeit der verwendeten Bauteile und Meßgeräte eine besonders gründliche Vorbereitung auf den jeweiligen Versuch.

Die zum Verständnis der Versuche erforderlichen theoretischen Grundlagen sind, soweit sie nicht in den zugehörigen Vorlesungen behandelt wurden, in den jeweiligen Versuchsanleitungen enthalten.

Eine Versuchsteilnahme ohne eingehende Vorbereitung ist sinnlos ! Bei nicht ausreichender Vorbereitung kann dem Laborteilnehmer oder der Gruppe die Versuchsdurchführung an dem betreffenden Tag untersagt werden !

2. Versuchsdurchführung

Bei der Durchführung der Versuche im Labor "Leistungselektronik" sind die folgenden Punkte zu beachten:

- a. Das Einschalten zu Beginn der Messungen und nach evtl. Schaltungsumbauten erfolgt nur nach Kontrolle der Schaltung durch den Aufsichtführenden !
- b. Die NOT-AUS-Schalter dürfen nicht zugestellt werden bzw. müssen an gut zugänglicher Stelle angeordnet sein !
- c. Aufgenommene Abhängigkeiten sollen sofort grafisch aufgetragen werden, um etwaige Meßfehler erkennen und ausschalten zu können.
- d. Vor Schaltungsänderungen oder dem Schaltungsabbau sind zuerst alle Schalter auszuschalten.

Kondensatoren sind zu entladen !

Ein Versuchsabbau soll erst nach Genehmigung durch den Aufsichtführenden erfolgen.

Lassen Sie bitte die Versuchsteilnahme am Versuchstag durch den Aufsichtführenden auf Ihrer Versuchsanleitung testieren !

3. Umgang mit Oszilloskopen und Meßgeräten

a. Oszilloskope

Bei oszilloskopischen Messungen vor allem in Stromrichterschaltungen führt das Gehäuse des Oszilloskops häufig Spannung gegen Masse. Für die Stromversorgung dieser Oszilloskope bestehen im Prinzip drei Möglichkeiten:

1. Batteriebetrieb (Angewandt bes. bei Messungen auf hohem Potential, z.Bsp. in Hochspannungsanlagen)
2. Stromversorgung aus dem Wechselstromnetz über Trenntransformator
3. Stromversorgung aus dem Wechselstromnetz über Steckdosen mit nicht angeschlossenem Schutzleiter

Solche Steckdosen sind im Labor Leistungselektronik durch ein rot eingefärbtes Gehäuse als massefrei gekennzeichnet !

Vorsicht: Achten Sie darauf, daß das Oszilloskop-Gehäuse Spannung gegen Masse führen kann !

Achten Sie ferner darauf, daß die Oszilloskopgehäuse gegeneinander Spannung führen können.

Berühren Sie daher nie gleichzeitig Oszilloskop und Masse bzw. zwei Oszilloskope gleichzeitig !

Achten Sie auf ausreichenden Abstand zwischen den Oszilloskopgehäusen bzw. sehen Sie eine entsprechende Isolation vor !

Bei gleichzeitiger Darstellung mehrerer Signale auf Oszilloskopen mit gemeinsamer Masse ist streng darauf zu achten, daß das Gehäusepotential nur einmal festgelegt wird !

Bei oszilloskopischen Messungen in Stromrichterschaltungen werden oft Signale dargestellt, die aus Gleich- und Wechselspannungsanteil bestehen. Verwenden Sie daher generell die Stellung "DC" (Darstellung des gesamten Signals) und nicht die Stellung "AC" (Darstellung nur des Wechselspannungsanteils des Signals) !

b. Strom- und Spannungsmeßgeräte

1. Achten Sie darauf, daß vor dem Einschalten jeweils der größte Meßbereich eingestellt wurde.

2. In Stromrichterschaltungen weichen Wechselströme und Wechselspannungen meist stark von der Sinusform ab.

Achten Sie bei solchen Messungen daher auf die Wahl der richtigen Meßwerksart.

3. Vorsicht bei Messung von stark oberwelligen Gleichströmen und Gleichspannungen mit Meßgeräten mit Drehspulmeßwerk !

Bei hohem Oberwellengehalt der Meßgröße kann das Meßwerk trotz nur geringer Anzeige überlastet werden !

Abhilfe: Parallelschalten eines Meßgerätes mit Dreheisenmeßwerk. Die Empfindlichkeit des Drehspulgerätes sollte dann nicht größer sein als die des Dreheisengerätes !

4. Achten Sie bei allen Eingriffen in die Schaltung, die ein Vergrößern der elektrischen Größen zur Folge haben (Zurücksteuern von Stromrichterschaltungen auf Steuerwinkel 0°) darauf, daß die für die Messung dieser Größen vorgesehenen Meßgeräte vorher auf ihre unempfindlichsten Bereiche geschaltet werden !

c. Wattmeter

Wattmeter zur Wirk- und Blindleistungsmessung liefern je nach dem \cos der Schaltung ggf. nur geringe Anzeigen, obwohl Strom und Spannung im Bereich ihrer Nennwerte liegen !

Deshalb müssen bei Leistungsmessungen unbedingt auch Strom und Spannung mitgemessen werden !

Vorsicht beim Zurückschalten auf empfindlichere Meßbereiche !

Kontrollieren Sie in jedem Fall, ob Strom und Spannung dieses Zurückschalten zulassen !

Bei Verstößen gegen die Punkte 3.a bis 3.c dieser "Hinweise zur Durchführung der Laborversuche im Labor Leistungselektronik" haften die Teilnehmer für den entstehenden Schaden !

II. Besondere Hinweise zum Labor "Leistungselektronik"1. Aufgabe des Labors "Leistungselektronik"

Die im Labor "Leistungselektronik" durchgeführten Versuche sind anwendungsorientiert. Sie sollen den Studierenden mit dem Betriebsverhalten von typischen Schaltungen der Stromrichtertechnik und den für den Einsatz in solchen Schaltungen wichtigen Eigenschaften von Leistungshalbleitern vertraut machen.

Außerdem sollen die Versuche dem Studierenden die meßtechnischen Sonderprobleme in Stromrichterschaltungen aufzeigen.

Dies setzt voraus, daß einige Versuchsschaltungen ganz oder teilweise betriebsbereit aufgebaut sind. Die Aufgabe der Versuchsteilnehmer besteht bei diesen Versuchen in der Auswahl und dem Anschluß der jeweils geeigneten Meßgeräte und Oszillografen sowie der Durchführung der erforderlichen Messungen.

2. Leistungsnachweise

- a. Erfolgreiche Teilnahme an allen angebotenen Laborversuchen !
- b. Eine ausführliche Versuchsausarbeitung für einen durchgeführten Laborversuch (die vier Mitglieder einer Gruppe liefern also insgesamt vier Ausarbeitungen zu vier unterschiedlichen Versuchen ein !)

Die ausführliche Ausarbeitung soll enthalten:

Meßprotokolle

Grafische Darstellung aller aufgenommenen Abhängigkeiten

Meßergebnisse und deren Auswertung, soweit verlangt

Diskussion aller gemessener und in der Versuchsvorbereitung errechneter Abhängigkeiten.

- c. Die zu den einzelnen Versuchen ausgeteilten Aufgaben zur Versuchsvorbereitung sind von jedem Versuchsteilnehmer zu bearbeiten und während der Durchführung des jeweiligen Versuches zum Testat vorzulegen !
- d. Wird von den Teilnehmern einer Gruppe zu einem durchgeführten Versuch keine ausführliche Ausarbeitung eingeliefert, so sind die Meßprotokolle, die grafische Darstellung aller gemessener Abhängigkeiten sowie weitere Meßergebnisse und deren Auswertung - soweit verlangt - während der Versuchsdurchführung anzufertigen und zum Testat vorzulegen.
- e. Erfolgreiche Teilnahme an einem zum Semesterende stattfindenden schriftlichen Test (Hilfsmittel: Taschenrechner; Zeit: 90 Minuten).
Dieser Test soll zeigen, daß der Student die Wirkungsweise der untersuchten Schaltungen übersieht und die ermittelten Abhängigkeiten kennt und begründen kann.
Ein Übungsblatt zu diesem Test wird rechtzeitig vor Semesterende ausgegeben !

M. J. ...

FH Darmstadt	Labor Leistungselektronik	Fachbereich EE
	Wechsel- / Drehstromsteller	Datum
Gruppe	Name	Teilnahme bestätigt

0. Versuchsvorbereitung

0.1 Grundlagen zum Versuch Wechselstromsteller / Drehstromsteller

- a. Ickstadt: Vorlesungsumdruck Leistungselektronik Seiten 4 - 1 bis 4 - 10
b. Heumann: Grundlagen der Leistungselektronik Teubner - Verlag

0.2 Vorbereitende Rechnungen

- 1) Berechnen Sie die normierten Steuerkennlinien für Effektiv- und Gleichrichtwert des Laststromes bei ohmsch belastetem Wechselstromsteller für die Steuerwinkel $\alpha = 30^\circ / 60^\circ / 90^\circ / 120^\circ / 150^\circ / 180^\circ$ el.

$$\frac{I_R(\alpha)}{I_R(0)} = f(\alpha) \qquad \frac{|i_R(\alpha)|}{|i_R(0)|} = f(\alpha)$$

Stellen Sie die errechneten Abhängigkeiten graphisch dar !

- 2) Berechnen Sie die normierten Steuerkennlinien für Wirkleistung und Grundschwingungs-Blindleistung bei ohmsch belastetem Wechselstromsteller für die Steuerwinkel $\alpha = 30^\circ / 60^\circ / 90^\circ / 120^\circ / 150^\circ / 180^\circ$ el.

$$\frac{P}{U_{\text{Netz}} \times I_R(0)} = f(\alpha) \qquad \frac{Q}{U_{\text{Netz}} \times I_R(0)} = f(\alpha)$$

- 3) Ermitteln Sie beim Wechselstromsteller mit ohmscher Belastung für $\alpha = 90^\circ$ die Werte für

Verschiebungsfaktor $\cos\varphi$
Grundschwingungsgehalt g
Totalen Leistungsfaktor λ

- 4) Konstruieren Sie für den ohmsch belasteten Drehstromsteller den zeitlichen Verlauf der Strangspannung an einem der drei Lastwiderstände für einen Steuerwinkel $\alpha = 90^\circ$ bei

- a. Betrieb mit angeschlossenem Mittelleiter
b. Betrieb ohne angeschlossenem Mittelleiter

1. Wechselstromsteller

1.1 Versuchsbeschreibung

Im ersten Teil des Laborversuchs WS / DS wird eine phasenanschnittgesteuerte Antiparallelschaltung zweier Thyristoren in Verbindung mit einem ohmschen bzw. induktiven Verbraucher untersucht.

Zur Ansteuerung der Thyristoren dient ein kommerzielles Impuls-Steuergerät (MULTIPULS / AEG). Das Impulssteuergerät wird direkt aus dem Netz eingespeist. Der Steuerwinkel ist über ein POWERSCOPE-Oszilloskop vorzugeben bzw. abzulesen !

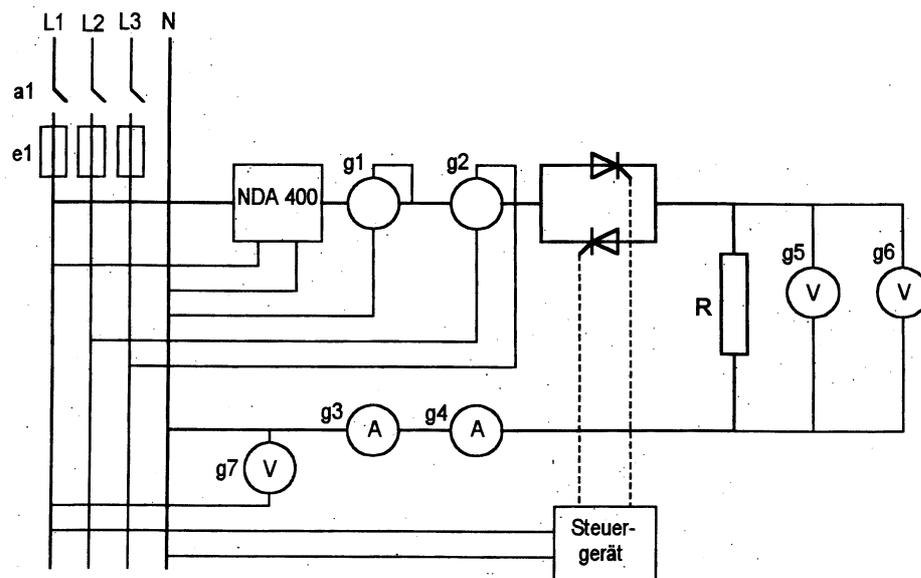


Bild 1 Wechselstromsteller mit Meßschaltung

1.2 Versuchsdurchführung

1.2.1 Wechselstromsteller mit Ohmscher Belastung

Die Schaltung gemäß Bild 1 ist aufzubauen und in Betrieb zu nehmen. Es sind jeweils als Funktion des Steuerwinkels α zu messen : (Ablesung alle 30° el.)
(Bei $\alpha = 0$ soll $I_R = 5$ A betragen, danach wird R nicht geändert !)

- Effektivwert I_R und Gleichrichtwert $\overline{|i_R|}$ des Laststromes i_R .
- Effektivwert U_R und Gleichrichtwert $\overline{|u_R|}$ der Lastspannung u_R .
- Effektivwert U der Netz-Phasenspannung.
- Grundschriftungs-Wirkleistung P_1 und Grundschriftungs-Blindleistung Q_1 über die Anzeigen P_1' und Q_1' der Wattmeter g_1 und g_2 .
- Es sind die Effektivwerte U_R und I_R sowie P , Q , S und der Oberwellengehalt des Stromes ($\gamma = 3 \dots 13$) über den Netzdaten-Analysator NDA 400 zu bestimmen und auszudrucken.

Oszillografieren

- a) Netzspannung U und Laststrom I_R bei $\alpha = 0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / 135^\circ$
 b) Netzspannung U und Stellerspannung U_A bei $\alpha = 0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / 135^\circ$

Auswertung.Während des Versuchs

- a) Auftragen der Steuerkennlinie für Gleich- und Effektivwert des Laststromes i_R als Funktion des Steuerwinkels α .
 b) Für $\alpha = 90^\circ$ sind zu ermitteln :
 Grundschwungsgehalt g
 Verschiebungsfaktor $\cos \varphi$
 Totaler Leistungsfaktor λ
 c) Die beigegeführten zugehörigen Oszillogramme sind mit Achsenbezeichnungen zu versehen und zu beschriften !

Für die Ausarbeitung

- a) Die Steuerkennlinien für Gleichricht- und Effektivwert des Laststromes i_R sind für $\alpha = 0, 30, 60, \dots, 180^\circ$ zu errechnen und in einem Diagramm zusammen mit den in 1.2.1 gemessenen Abhängigkeiten darzustellen.
 b) Für $\alpha = 90^\circ$ sind die Werte g , $\cos \varphi$ und λ aus den Messungen zu ermitteln und mit den in der Vorbereitung berechneten Werten zu vergleichen.
 c) Tragen Sie in einem gemeinsamen Diagramm auf: Wirkleistung P , Verzerrungs-(D), Grundschwungs- (Q_1) und Gesamtblindleistung (Q) als Funktion von α .
 d) Vergleichen Sie die Ergebnisse der Messungen mit dem NDA 400 mit den Messungen mit den anderen Instrumenten (P , D , Q_1 , Q).

1.2.2 Wechselstromsteller mit Induktiver Belastung

Hierbei wird der Steller mit einer Induktivität L anstelle des ohmschen Widerstandes belastet.

Messungen

Für $\alpha = \alpha_{\min}$, 120° , und 150° sind der Effektivwert des Stromes und seiner Oberschwingungen ($\gamma = 3 \dots 13$) mit dem NDA 400 aufzunehmen.

Oszillografieren:

- a) Lastspannung u_L und Laststrom i_L bei $\alpha = < 90 / 120 / 150^\circ$ el.
 b) Stellerspannung u_S und Netzspannung u_N bei $\alpha = < 90 / 120 / 150^\circ$ el.

Auswertung

Die beigefügten zugehörigen Oszillogramme sind während des Versuches mit Achsenbezeichnungen zu versehen und zu beschriften.

1.2.3 Wechselstromsteller mit ohmsch-induktiver Belastung

Schalten Sie den in 1.2.1 benutzten Lastwiderstand und die in 1.2.2 benutzte Drosselspule in Reihe und oszillografieren Sie die gleichen Größen wie in 1.2.2 !

Skizzieren Sie die Diagramme !

Ermitteln Sie den nun minimalen Steuerwinkel α_{\min} !

2. Drehstromsteller

Im zweiten Teil des Laborversuchs WS / DS wird eine vollgesteuerte Drehstromsteller-schaltung bei Aussteuerung auf $\alpha = 90^\circ$ und ohmscher Belastung hinsichtlich des Oberschwingungsgehaltes des Netzstromes i bei Betrieb mit und ohne Mittelpunktleiter untersucht.

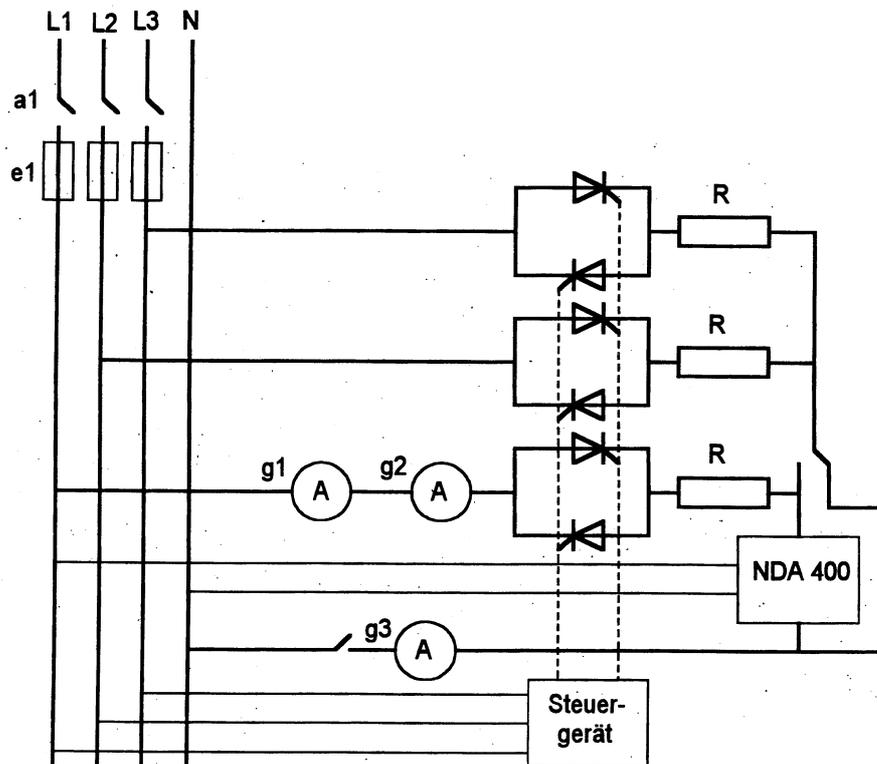


Bild 2

Drehstromsteller mit Meßschaltung

2.1 Betrieb des Drehstromstellers mit Mittelpunktleiter (ohmsche Belastung)

Die auftretenden Strom- und Spannungsverhältnisse entsprechen denen der einphasigen Wechselstromsteller-Schaltung.

Entsprechend der jeweiligen Aussteuerung können sich alle Stromoberschwingungen im Netzstrom ungehindert ausbilden.

Im Mittelpunktleiter fließen bei dieser Schaltung alle Stromoberschwingungen, für die die Bedingung $\sum i_\gamma = 0$ nicht erfüllt ist (hier $\gamma = 3, 9, 15$ usw.).

Messungen :

- a) Bei $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ el. sind zu messen :
Effektivwert I und Gleichrichtwert $\overline{|i|}$ des Netzstromes einer Phase .
- b) Mit dem Netzdaten-Analysator NDA 400 sind bei Aussteuerung auf $\alpha = 90^\circ$ zu ermitteln :
- 1) Oberschwingungen-Effektivwerte der Ordnungszahlen $\gamma = 3, 5, 7, 9, 11, 13$ im Netzstrom i einer Phase .
 - 2) Oberschwingungen - Effektivwerte der Ordnungszahlen $\gamma = 3, 5, 7, 9, 11, 13$ im Strom des Mittelpunktleiters.
 - 3) Der Strom i_M ist für $\alpha = 90^\circ$ zu oszillografieren und zu messen !

2.2 Betrieb des Drehstromstellers ohne Mittelpunktleiter (Ohmsche Belastung)

Da sich alle Netzstrom-Oberschwingungen, für die die Bedingung $\sum i_\gamma = 0$ nicht erfüllt ist, hier nicht ausbilden können, entsprechen die Strom- und Spannungsverhältnisse hier nicht mehr denen bei einphasigem Betrieb.

Messungen:

- a) Bei $\alpha = 90^\circ$ sind zu messen :
Effektivwert I und Gleichrichtwert $\overline{|i|}$ einer Phase.
- b) Bei $\alpha = 90^\circ$ sind mit dem Oberschwingungsmeßgeräte die Oberwellen der Ordnungszahlen $\gamma = 3, 5, 7, 9, 11, 13$ im Netzstrom einer Phase zu ermitteln.
- c) Oszillografieren Sie die Spannung des Sternpunktes gegen N

Auswertung :

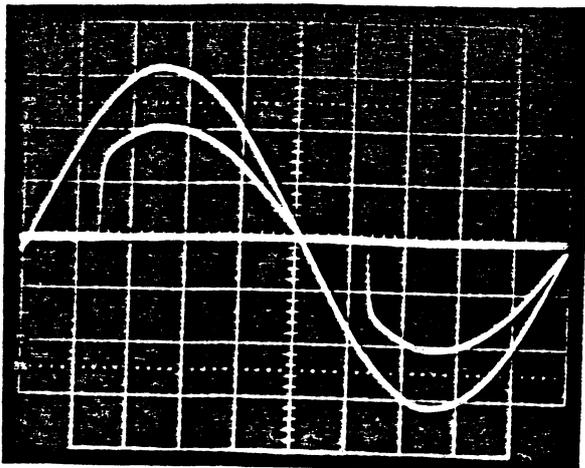
- a) Die erhaltenen Meßwerte sind zu vergleichen und kritisch zu diskutieren. Warum wird der Einsatz phasenanschnittgesteuerter Geräte im Niederspannungs-Verteilungsnetz durch die " Technische Anschlußbedingung " der Energieversorgungsunternehmen stark eingeschränkt ?
- b) Für die ideellen Effektivwerte I_γ ergibt die Fourier-Analyse für die Stromober-schwingungen des Netzstromes beim Wechselstromsteller (entspricht Drehstromsteller mit Mittelpunktleiter !) für $\alpha = 90^\circ$ und ohmsche Belastung folgende Werte : (I ist der Effektivwert des ungesteuerten Netzstromes)

γ	1	3	5	7	9	11
f(Hz)	50	150	250	350	450	550
$I_{\gamma i} / I$	0,59	0,318	0,105	0,105	0,065	0,065

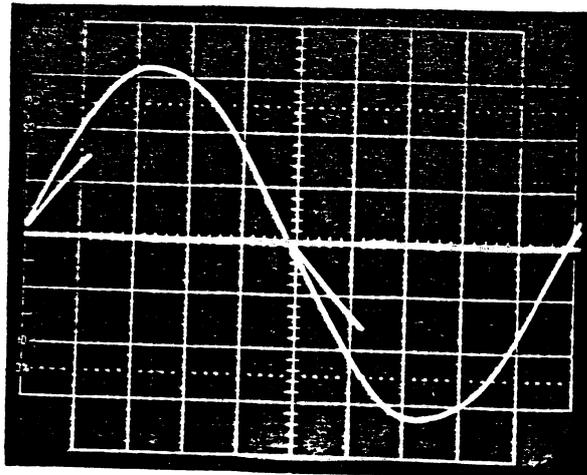
Vergleichen Sie die in 2.1 gemessenen Oberschwingungs- Effektivwerte I_γ mit den ideellen Werten und diskutieren Sie etwaige Abweichungen !

Oszillogramme zum Versuch WS/DS

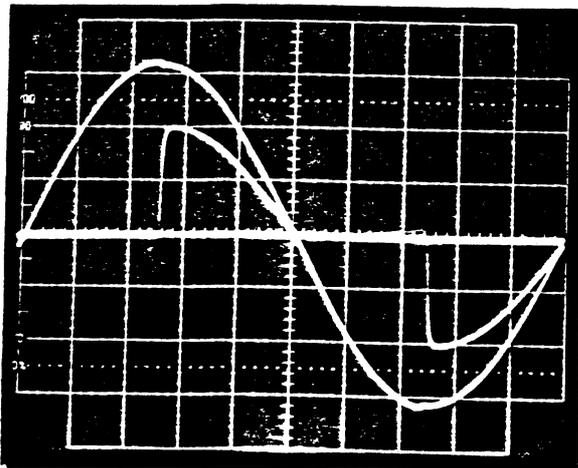
Belastung: Zeitachse: ms / RE



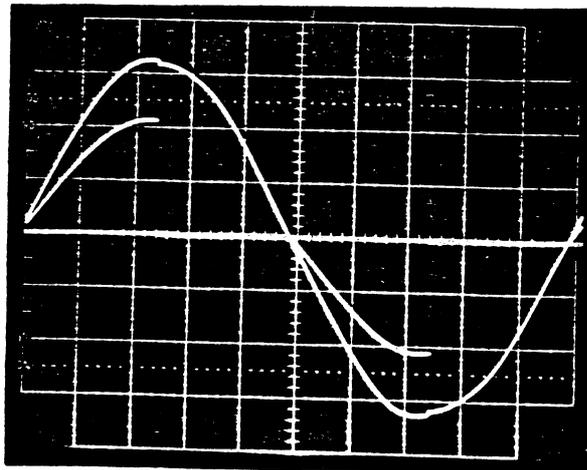
1) Y_a : $\alpha =$
 Y_b :



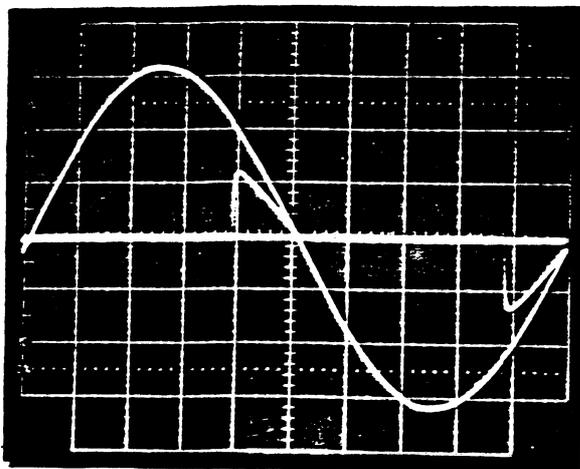
4) Y_a : $\alpha =$
 Y_b :



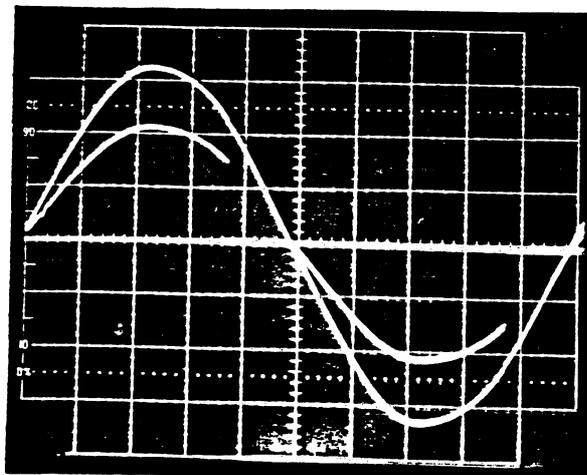
2) Y_a : $\alpha =$
 Y_b :



5) Y_a : $\alpha =$
 Y_b :



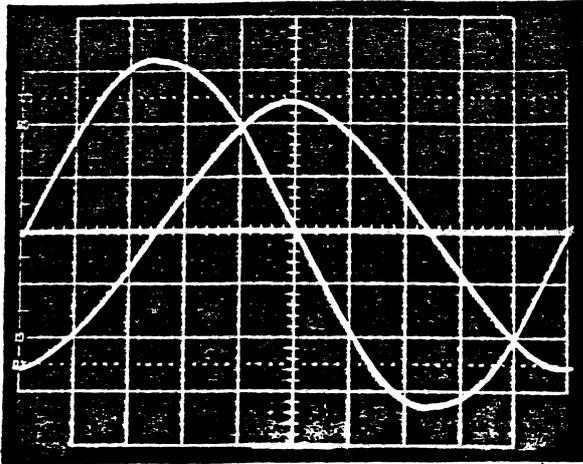
3) Y_a : $\alpha =$
 Y_b :



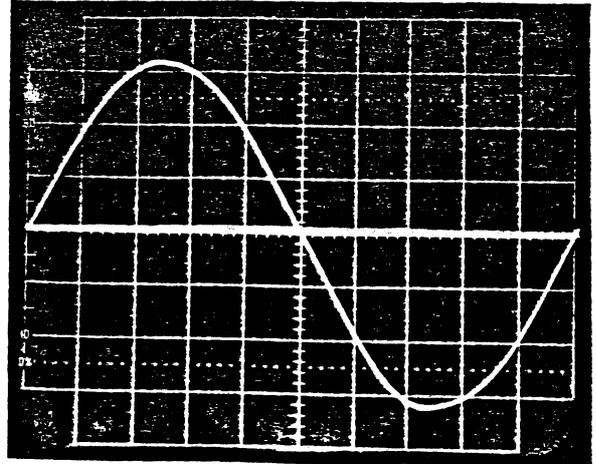
6) Y_a : $\alpha =$
 Y_b :

Oszillogramme zum Versuch WS/DS

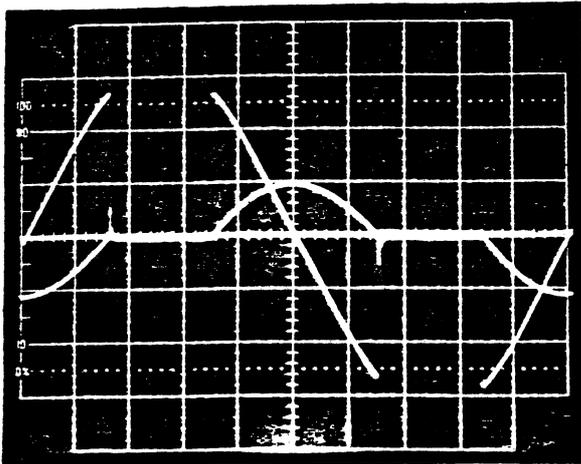
Belastung: Zeitachse: ms /RE



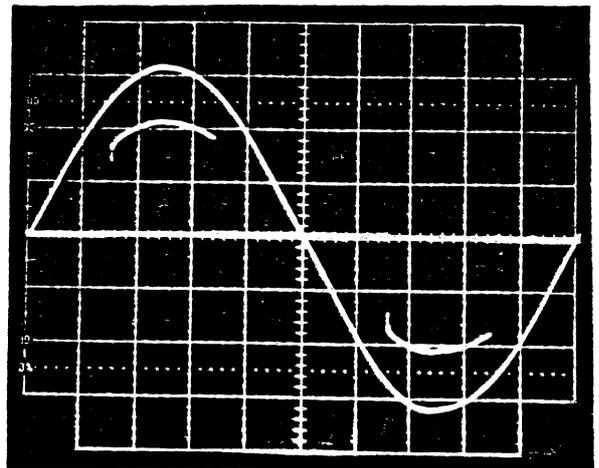
7) Y_a : $\alpha =$
 Y_b :



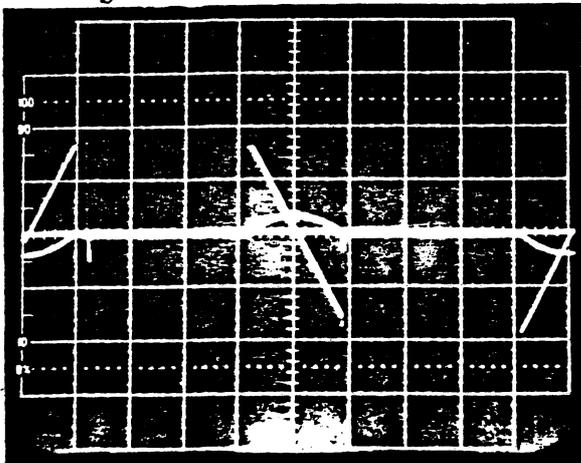
10) Y_a : $\alpha =$
 Y_b :



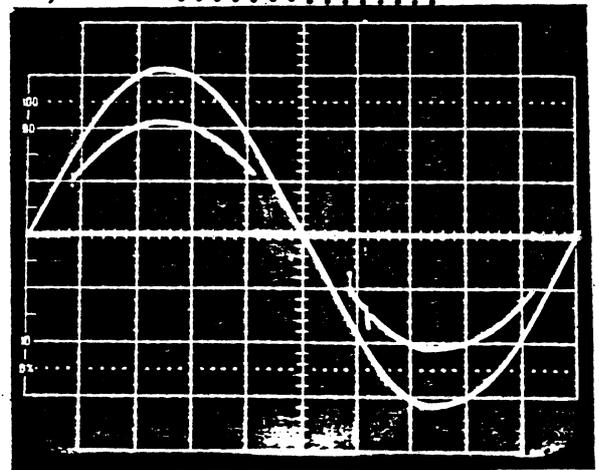
8) Y_a : $\alpha =$
 Y_b :



11) Y_a : $\alpha =$
12)



9) Y_a : $\alpha =$
 Y_b :



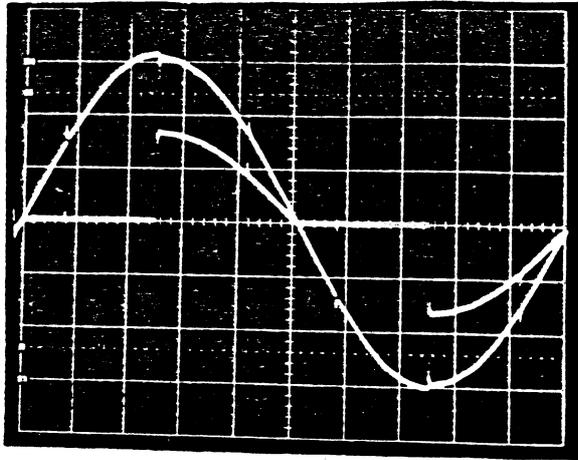
12) Y_a : $\alpha =$
 Y_b :

Oszillogramme zum Versuch WS/DS

Betriebsweise: Belastung:

Zeitachse: ms / RE

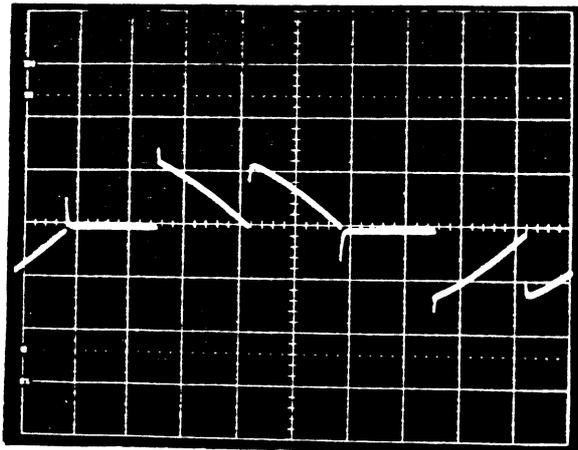
13)



$\alpha =$

Y-Achse:

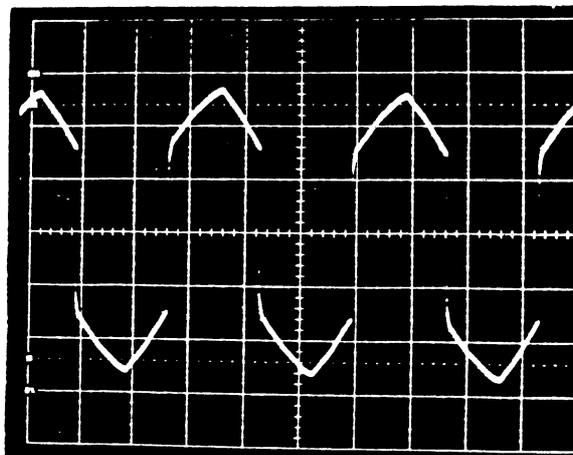
14)



$\alpha =$

Y-Achse:

15)



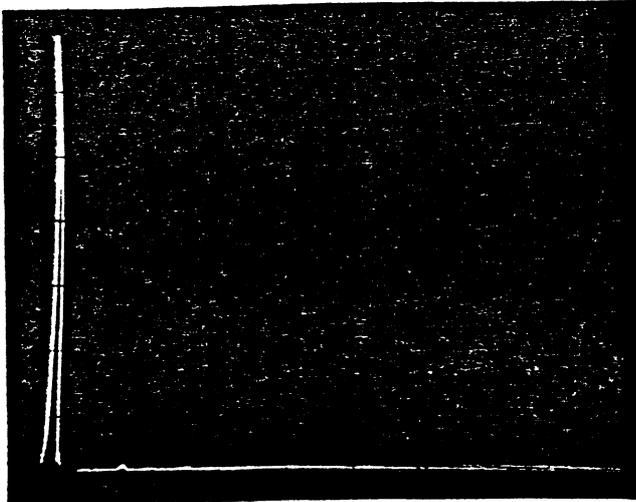
$\alpha =$

Y-Achse:

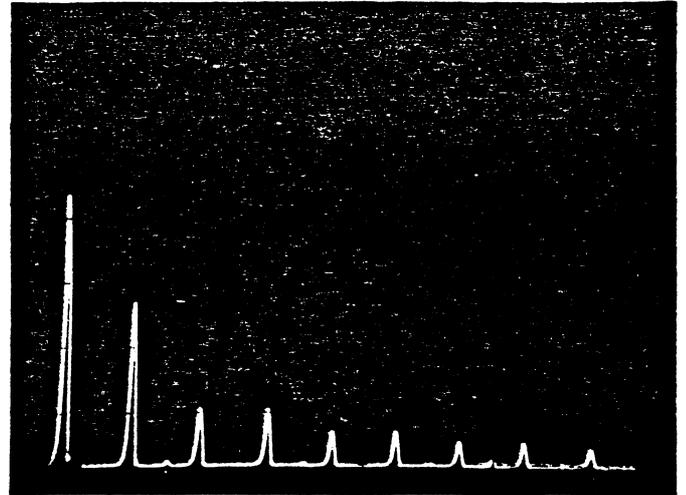
Oszillögramme zum Versuch WS/DS

Oberwellen-Spektren des Laststromes beim ohmsch belasteten WS-Steller

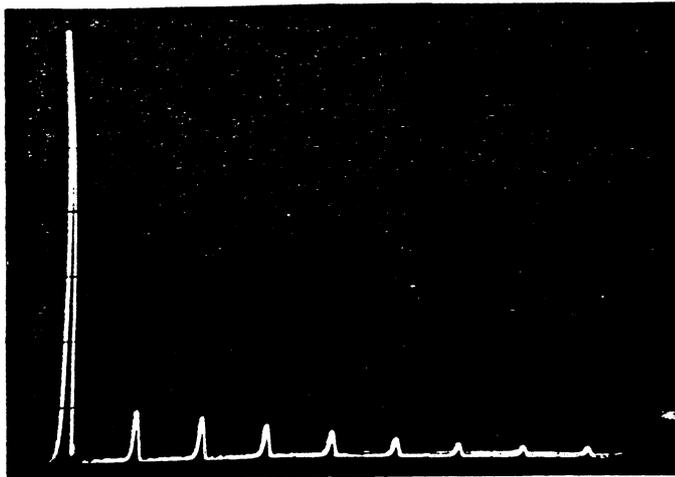
X-Achse: Frequenzabstand Hz / RE



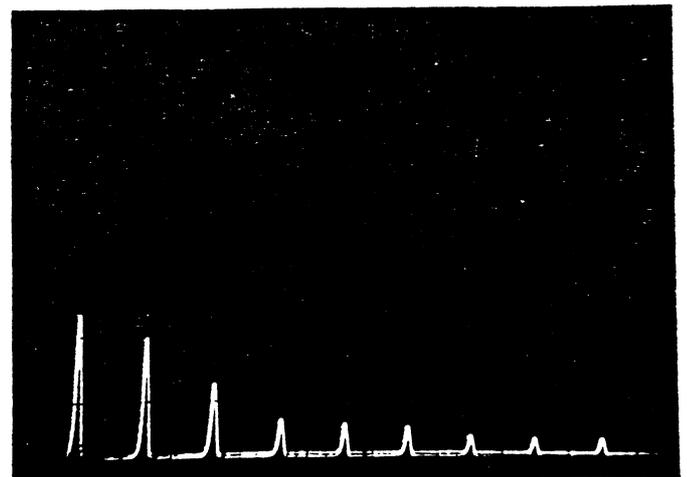
16) Steuerwinkel $\alpha =$



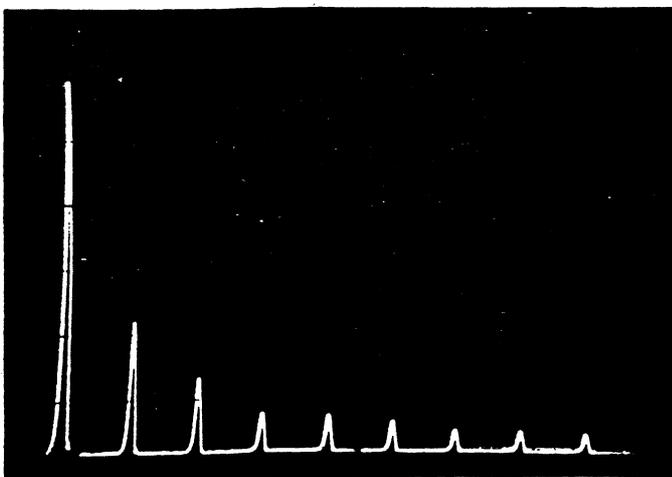
19) Steuerwinkel $\alpha =$



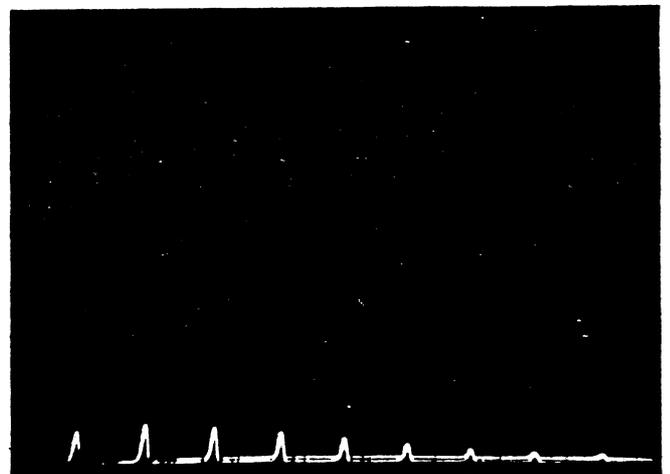
17) Steuerwinkel $\alpha =$



20) Steuerwinkel $\alpha =$



18) Steuerwinkel $\alpha =$



21) Steuerwinkel $\alpha =$

Zur Wirkungsweise des Netzdatenanalysators (Auszug)

3. ÜBERSICHT ÜBER DIE MESSARTEN UND DEREN DARSTELLUNG

Meßgröße	Einheit	Anzeigebereich	Fehler
U	V, kV	0,00 ... 9999	<±0,5% v.B.
I	A, kA	0,00 ... 9999	<±0,5% v.B.
P	W, kW, MW	0,00 ... 9999	<± 1% v.B.d.S.
S	VA, kVA, MVA	0,00 ... 9999	<± 1% v.B.
Q	Var, kVar, MVar	0,00 ... 9999	<± 1% v.B.d.S.
A	Wh, kWh, MWh	0,00 ... 9999	abhängig von P
cos phi	kap.	-0,99 ... 0,00	<± 0.02
cos phi	ind.	+0,99 ... 0,00	<± 0.02
k	%	0,00 ... 99,99	<± 1%
g	%	99,99 ... 0,00	<± 1%
OW	%	0,00 ... 99,99	<± 1%

v.B. = vom Meßbereich
v.B.d.S. = vom Meßbereich der Scheinleistung

4. DEFINITION DER MESSGRÖSSEN (nach VDE 0838, bzw. IEC 555)

Für die Berechnung des Effektivwertes (quadratischer Mittelwert) gilt die allgemeine Formel:

$$U_{\text{eff}} = U_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u(t))^2 dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{u} \quad ; \quad u(t) = \hat{u} \cdot \sin \omega t$$

Der beim NDA400 durchgeführten Signalanalyse liegen folgende Formeln zu Grunde:

4.1 Gesamt-Effektivwert des Eingangssignals

einschließlich sämtlicher überlagerter Oberwellen

$$U_{\text{rms}} = \sqrt{U_1^2 + U_0^2} = \sqrt{\frac{2}{3z} (a_0^2 + 2a_1^2 + a_2^2 + \dots + 2a_{z-1}^2)}$$

- $a_0 \dots a_z$ = Abtastwerte
- z = Zahl der Abtastungen pro Periode
- U_1 = Effektivwert der Grundwelle
- U_0 = Effektivwert der Summe aller Oberwellen

4.2 EFFEKTIVWERT DER SUMME ALLER OBERWELLEN

$$U_0 = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_{30}^2} = \frac{k}{100} U_{rms}$$

$U_2 \dots U_{30}$ = Effektivwerte einzelner Oberwellen

4.3 RELATIVER GRUNDSCHWINGUNGSGEHALT (IEV 101-04-38)

Verhältnis Effektivwert der Grundschwingung zum Effektivwert der Wechselgröße.

$$g = \frac{U_1}{U_{rms}} \cdot 100\%$$

Die Grundschwingung (U_1) ist die Teilschwingung (Harmonische) 1. Ordnung der Fourier-Reihe einer periodischen Größe.

U_1 erscheint nicht bei der Meßwertdarstellung

4.4 SUMMENKLIRREFAKTOR bzw. OBERSCHWINGUNGSGEHALT (IEV 101-04-43)

Das Verhältnis des Effektivwertes der Summe der Oberschwingungen zum Effektivwert der Wechselgröße.

$$k = \frac{U_0}{U_{rms}} \cdot 100\% = \sqrt{1 - \left(\frac{g}{100}\right)^2} \cdot 100\%$$

4.5 RELATIVES OBERSCHWINGUNGSVERHÄLTNIS

Für eine Oberschwingung der Ordnungszahl n einer verzerrten Schwingung ist das Oberschwingungsverhältnis das Verhältnis (welches auch in Prozent ausgedrückt werden kann) des Effektivwertes der Oberschwingung der Ordnungszahl n zum Effektivwert der Grundschwingung.

$$OW_n = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\%$$

$$n = 2 \dots 30$$

U_n = Effektivwert der entsprechenden Oberwelle,
erscheint nicht bei der Meßwertdarstellung.

4.6 LEISTUNG, LEISTUNGSFAKTOR, ARBEIT

$$S = U_{rms} \cdot I_{rms} \quad = \text{Scheinleistung}$$

$$P = \sum_{t=0}^T u(t) \cdot i(t) \quad = \text{Wirkleistung}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad = \text{Blindleistung}$$

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (\text{für sinusförmige Größen})$$

$$A = P \cdot t \quad = \text{Wirkarbeit}$$

4.7 MITTELUNG DES COS PHI IM MODUS 2

Die Mittelung des $\cos\phi$ im Modus 2 erfolgt nach folgender Formel:

$$\cos \psi = \pm \left(1 - \frac{|\pm(1 - \cos \psi_1) \pm (1 - \cos \psi_2) \pm \dots \pm (1 - \cos \psi_n)|}{n} \right)$$

FHD FB EuI Prof. Dr. Michel	Antriebstechnik und Leistungselektronik Labor für Mechatronik	Versuch U/Chop
Umrichter und Chopper		
Vorbereitung: Skript Leistungselektronik		

Ziel des Versuchs:

Schaltungen mit Konstantspannungszwischenkreis sollen untersucht und verstanden werden. Diese gewinnen durch verbesserte Leistungshalbleiter immer mehr Bedeutung und lösen zunehmend andere Schaltungen ab. Sie werden als Einquadranten-, Zweiquadranten- oder Vierquadrantenantrieben für hochdynamische Gleichstromantriebe, als dreiphasige Umrichter zur Ansteuerung von Bürstenlosen Gleichstromantrieben und Asynchronmaschinen und in primärseitig- und sekundärseitig getakteten Schaltnetzteilen eingesetzt.

Das Prinzip:

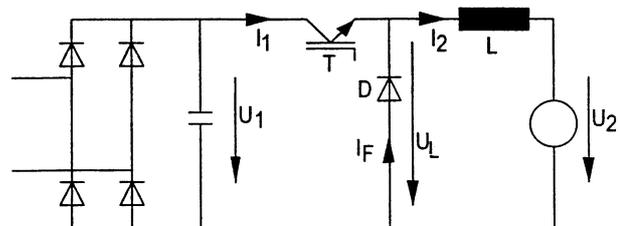
Die gewünschte Spannungshöhe an einer Last wird erzeugt, indem zwischen zwei benachbarten Zuständen mit hoher Frequenz so hin- und hergeschaltet wird, dass im zeitlichen Mittel die gewünschte Spannung entsteht. Als Schaltelemente werden bei kleinen Leistungen und insbesondere bei kleinen Spannungen meist FETs eingesetzt, bei größeren Leistungen vorwiegend IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor).

Die konstante Zwischenkreisspannung wird üblicherweise durch Gleichrichtung der Netzspannung und Verwendung eines großen Kondensators als Energiespeicher erzeugt. Am Ausgang der Schaltung wird als Filter eine Induktivität zur Glättung eingesetzt. Oft enthält die Last, z. B. bei Maschinen, die zur Glättung notwendige Induktivität. Durch die Wahl hoher Schaltfrequenzen wird der Filteraufwand geringer. Deshalb ist eine wesentliche Entwicklungsrichtung die Erhöhung der Schaltfrequenz.

Beispiel: Der Tiefsetzsteller:

Während der Ein-Zeit wird der Transistor angesteuert und verbindet die Last mit der positiven Kondensatorspannung. Während der Aus-Zeit fließt der Strom über die Freilaufdiode.

1Q-Steller Schaltbild
Tiefsetzsteller

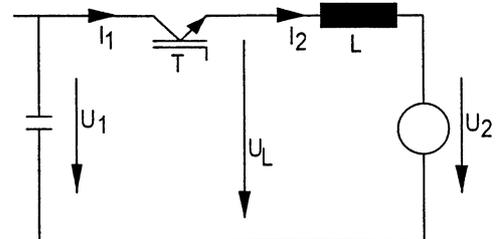


1Q-Steller
Einschaltphase

$$I_2 = I_1$$

$$I_F = 0$$

$$U_L = U_1$$

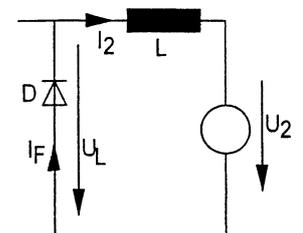


1Q-Steller
Ausschaltphase (Freilauf)

$$I_1 = 0$$

$$I_F = I_2$$

$$U_L = 0$$



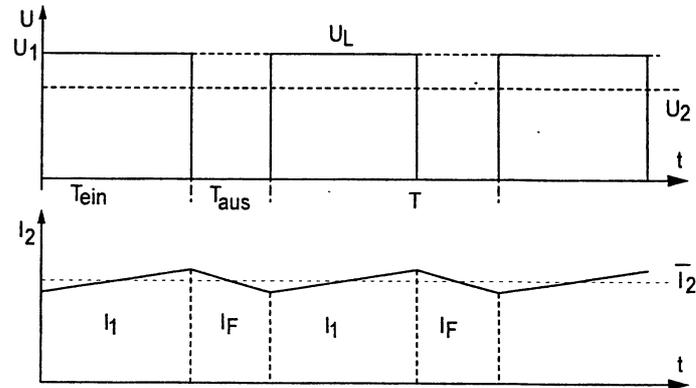
Im stationären Zustand gilt mit dem
 Tastverhältnis $\lambda = \frac{T_{ein}}{T}$ für die Mittelwerte
 der Spannungen und Ströme:

$$U_2 = \bar{U}_L = \frac{T_{ein}}{T} \cdot U_1 = \lambda \cdot U_1$$

$$I_1 = \frac{T_{ein}}{T} \cdot I_2 = \lambda \cdot I_2$$

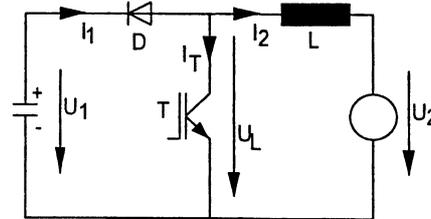
$$I_F = \frac{T - T_{ein}}{T} \cdot I_2 = (1 - \lambda) \cdot I_2$$

Spannung und Strom am
 Gleichstromsteller



Beispiel: Der Hochsetzsteller:

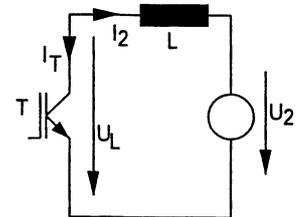
1Q-Steller Schaltbild
 Hochsetzsteller



Einschaltphase des Hochsetzstellers

$$I_1 = 0$$

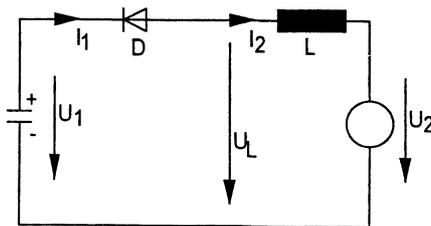
$$U_L = 0$$



Abschaltphase des Hochsetzstellers

$$I_1 = I_2$$

$$U_L = U_1$$

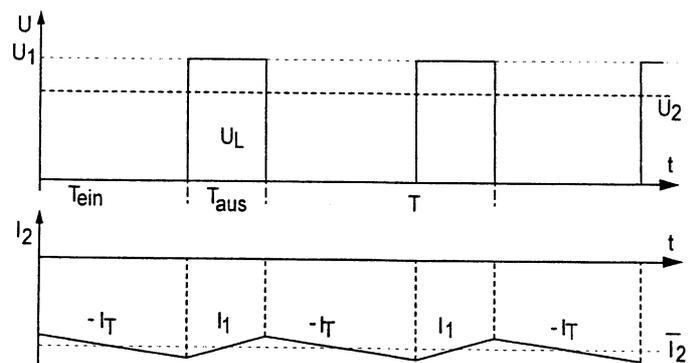


Spannungs- und Stromverlauf
 beim Hochsetzsteller

$$T_{ein} \cdot U_2 = (T - T_{ein}) \cdot (U_1 - U_2)$$

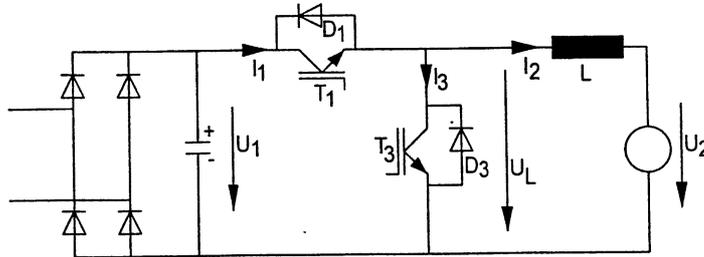
$$T_{ein} \cdot U_2 = T \cdot U_1 - T \cdot U_2 - T_{ein} \cdot U_1 + T_{ein} \cdot U_2$$

$$U_2 = \frac{(T - T_{ein})}{T} \cdot U_1$$

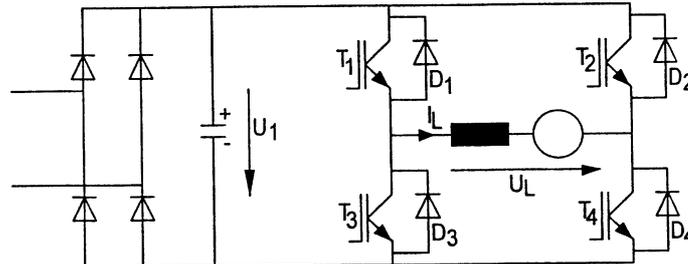


Funktionsprinzip: Während der Einschaltphase T_{ein} des Transistors wird die Spannung U_2 über die Induktivität kurzgeschlossen. Der Strom I_2 (Vorzeichen!) steigt in dieser Zeit. Wird der Kurzschluss aufgehoben, so magnetisiert die Induktivität in der Zeit $T_{aus} = T - T_{ein}$ über die Diode gegen die höhere Spannung U_1 ab. Im zeitlichen Mittel kann die Induktivität keine Gleichspannung aufnehmen.

Kombiniert man Tiefsetz- und Hochsetzsteller in geeigneter Weise, so erhält man einen 2-Quadrantensteller:



Die Kombination von zwei 2-Quadrantenstellern ergibt einen 4-Quadrantensteller.



Damit ist es möglich, jede gewünschte Strom-Spannungskombination an die Last zu legen und einen Gleichstromantrieb in jeder Drehrichtung und mit jeder Momentenrichtung zu betreiben. Ob der Mittelwert der Lastspannung positiv oder negativ ist hängt vom Taktverhältnis T_{ein} zu T ab.

Laststrom	getaktete Transistoren	Freilaufdioden	$T_{ein} > T_{aus}$	$T_{ein} < T_{aus}$
$I_L > 0$	T1, T4	D2, D3	$U_L > 0, P > 0$	$U_L < 0, P < 0$
$I_L < 0$	T2, T3	D1, D4	$U_L > 0, P > 0$	$U_L < 0, P < 0$

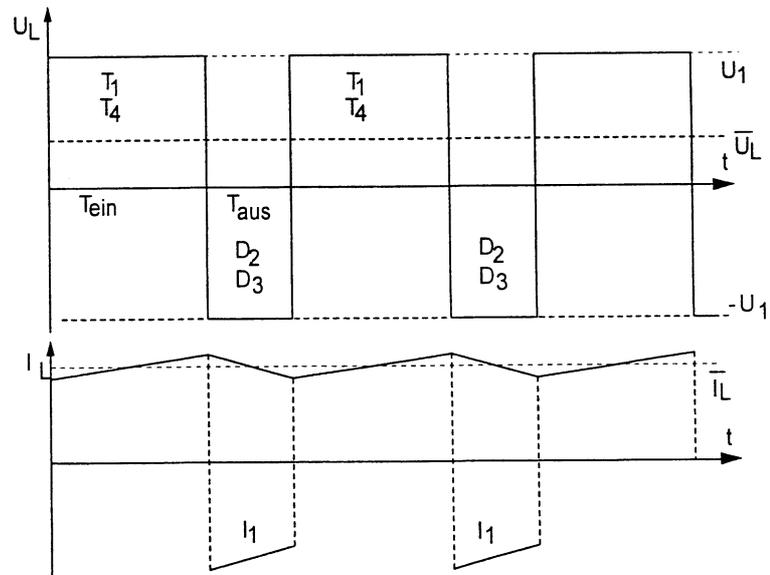
4Q-Steller
Spannungs-Stromverlauf
(im Zweipunkt-Betrieb)

$$T_{ein} \cdot (U_1 - \bar{U}_L) = T_{aus} \cdot (U_1 + \bar{U}_L)$$

$$T_{aus} = T - T_{ein}$$

$$\bar{U}_L = \frac{2T_{ein} - T}{T} \cdot U_1$$

$$\bar{U}_L = (2\lambda - 1) \cdot U_1$$



Für die umgekehrte Richtung werden die anderen Halbleiter sinngemäß genutzt.

Da der 4Q-Steller auch Hochsetz- und Tiefsetzsteller enthält, können diese Betriebsweisen ebenfalls verwirklicht werden. Sie bieten sogar große Vorteile, weil in der Aus-Zeit nicht die negative Spannung, sondern nur Spannung Null an die Last gelegt wird. Dadurch erzeugt man weniger Stromwelligkeit. (Dreipunktbetrieb)

Der Lückbetrieb:

Die oben angegebenen Gleichungen gelten nur solange, wie während der Aus-Zeit des Transistors der Laststrom nicht Null erreicht. Tritt dieser Fall ein, so leitet die Diode nicht mehr und es liegt z. B. beim Tiefsetzsteller nicht mehr Spannung Null an der Last. Bei großer Stromwelligkeit wird die Lückgrenze bei größeren Strömen erreicht als bei kleinerer Stromwelligkeit.

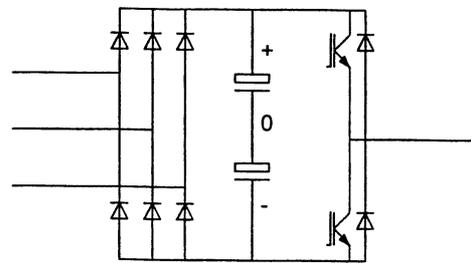
Das Rückstromproblem der Dioden:

In jeder dieser Schaltungen übernimmt der Transistor beim Einschalten den Laststrom von einer Diode. Durch den auftretenden Sperrverzug führt die Diode kurzzeitig in Rückwärtsrichtung Strom. Diesen Strom muss der Transistor zusätzlich führen.

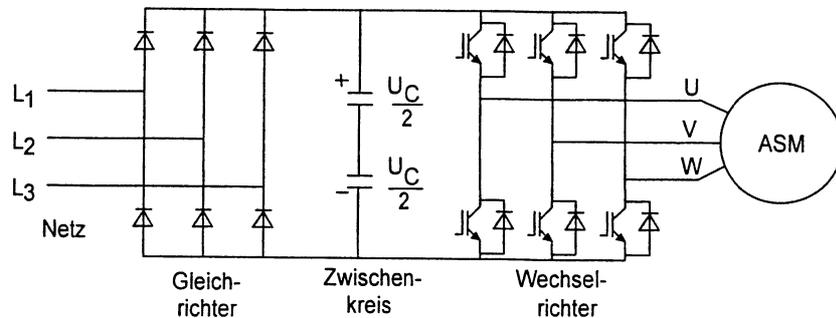
Solange die Diode noch nicht sperrt, liegt die Zwischenkreisspannung am Transistor. Dabei treten kurzzeitig extrem hohe Verlustleistungen auf. Die Sperrverzugszeit der Dioden hat wesentlichen Einfluss auf die Schaltverluste und damit auf die erreichbare Schaltfrequenz.

Verallgemeinerung:

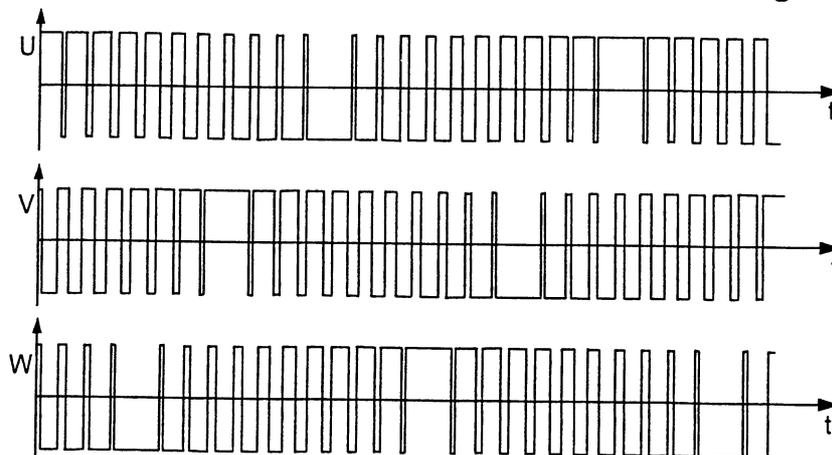
Generell kann die Zweigkombination genutzt werden, um positive oder negative Spannung bei positivem oder negativem Strom an die Last zu legen. Es ist vorteilhaft, sich den Kondensator als Reihenschaltung von zwei gleichen Kondensatoren vorzustellen. Damit kann eine beliebige Spannung in den Grenzen der Kondensatorspannung an den Anschlusspunkt gelegt werden. Bei der Erweiterung auf drei Umrichterzweige können auf diese Weise Drehstromantriebe angesteuert werden.



Drehstromumrichter:

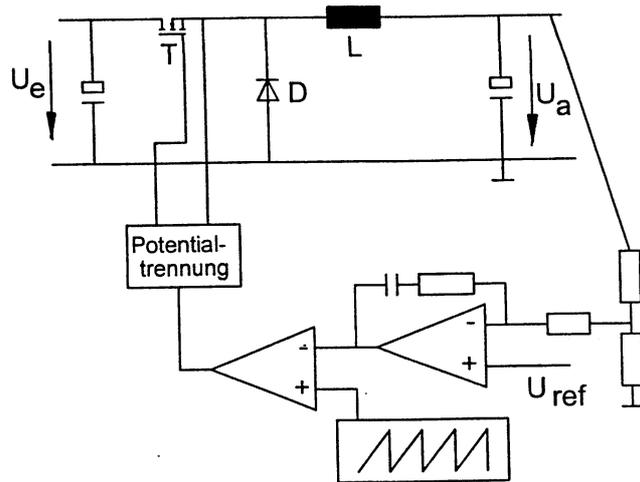


Dabei werden die drei Ausgangsspannungen um 120° versetzt sinusförmig moduliert.



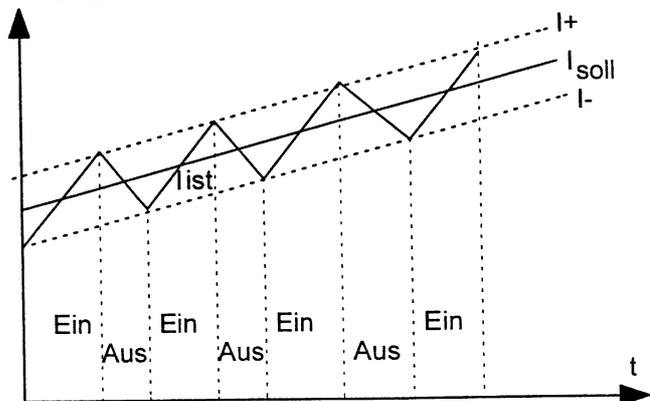
Taktverfahren und Regelung bei Stellern

Natürlich können die Stellerschaltungen über die Einstellung des Puls-Pausenverhältnisses betrieben werden (Pulsweitenmodulation PWM). Dazu wird eine Sägezahnspannung mit einer Steuerspannung verglichen. Die Steuerspannung ist üblicherweise die Ausgangsspannung eines Reglers.



Allerdings ist es insbesondere in der Antriebstechnik wünschenswert, den Strom unter Kontrolle zu haben. Deshalb werden oft Takt- und Regelverfahren verwendet, die den Strom oder zumindest den Maximalstrom unter Kontrolle halten.

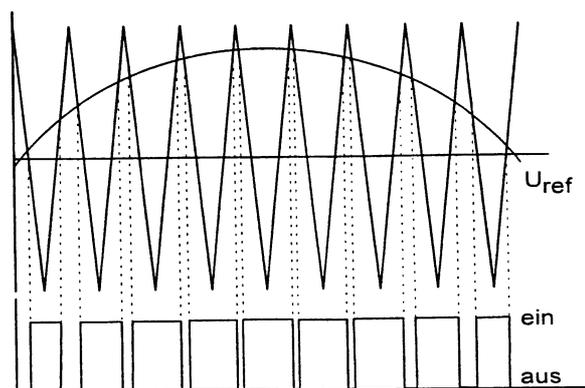
Bei der Toleranzbandregelung wird der obere Stromgrenzwert gebildet, indem zum Stromsollwert noch ein kleines Δi addiert wird. Entsprechend wird der untere Stromgrenzwert durch Subtraktion von Δi gebildet. Bei Erreichen der Grenzwerte wird ein- bzw. ausgeschaltet.



Taktverfahren bei Frequenzumrichtern:

Sinus-PWM

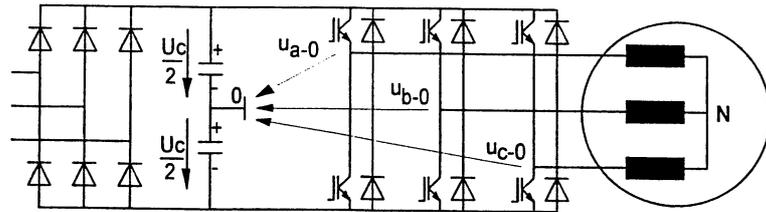
Um konstanten Fluss in der Maschine zu erhalten, muss die Ausgangsspannung proportional zur Ausgangsfrequenz verstellt werden. Außerdem müssen die drei Phasen um 120° versetzt getaktet werden. Bei der sinusbewerteten PWM wird eine Dreiecksfunktion mit den drei Spannungssollwerten verglichen. Die Schnittpunkte sind die Umschaltzeitpunkte.



Raumzeigermodulation:

Jeder Umrichterzweig kann an plus oder minus schalten. Die drei Zweige des Umrichters können damit 2^3 Zustände verwirklichen. Unterwirft man die möglichen Zustände der Transformation in ein rechtwinkliges ständerfestes $\alpha\beta$ -Koordinatensystem, so können die Zustände wie folgt dargestellt werden. Die zu verwirklichende Spannung wird als Raumvektor in das Diagramm eingetragen und die Spannung entsprechend den Beiträgen der nächstgelegenen Eckpunkte zusammengesetzt.

Maschine am Umrichter



Um die Strangspannungen der Maschine zu ermitteln, muss zunächst die Spannung des nicht angeschlossenen Sternpunkts gegenüber dem Nullpunkt berücksichtigt werden. Sie ergibt sich bei symmetrischen Wicklungen aus:

$$u_{N-0} = \frac{1}{3}(u_{a-0} + u_{b-0} + u_{c-0})$$

Damit erhält man die Strangspannungen:

$$u_a = u_{a-0} - u_{N-0}$$

$$u_b = u_{b-0} - u_{N-0}$$

$$u_c = u_{c-0} - u_{N-0}$$

oder in Matrizendarstellung:

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_{a-0} \\ u_{b-0} \\ u_{c-0} \end{pmatrix}$$

Transformiert man diese acht verschiedenen Schaltzustände ins zweiachsige ständerfeste $\alpha\beta$ - Koordinatensystem, so ergeben sich die im folgenden Diagramm markierten Punkte. Dies bedeutet, dass mit dem Umrichter entsprechend den acht Schaltmöglichkeiten acht Raumzeigerstellungen ermöglicht werden können, wobei die Zustände 000 und 111 einen Nullvektor an die Maschine legen und damit gleich wirken.

Zustand	a	b	c	u_a	u_b	u_c	u_α	u_β
000	-	-	-	0	0	0	0	0
001	-	-	+	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3\sqrt{3}}$
010	-	+	-	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
011	-	+	+	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0
100	+	-	-	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
101	+	-	+	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$
110	+	+	-	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
111	+	+	+	0	0	0	0	0

Soll bei einer Asynchronmaschine mittels Frequenzumrichter ein Drehspannungssystem mit einer wählbaren Frequenz an die Maschine gelegt werden, so bedeutet dies, dass der Spannungsvektor mit der entsprechenden Winkelgeschwindigkeit umlaufen muss.

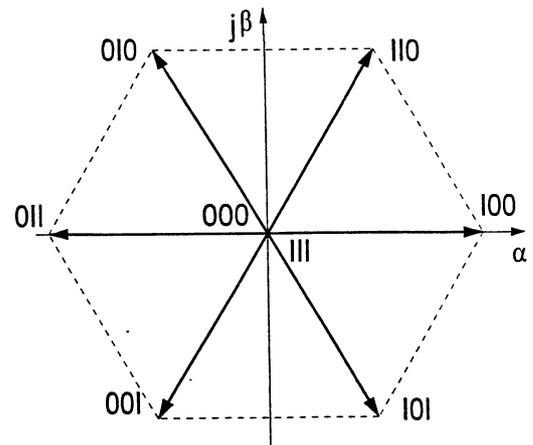
Um in der Maschine konstanten Fluss zu erhalten, muss die Länge des Spannungsvektors proportional zur Frequenz sein. Da der Umrichter nur wenige Schaltzustände verwirklichen kann, würde dies ohne weitere Maßnahmen sehr schlechte Spannungsverläufe ergeben. Deshalb werden beliebige Spannungsvektoren jeweils aus den benachbarten Zuständen aufgebaut.

Dazu wird der gewünschte Vektor u , der für eine bestimmte Zeit verwirklicht werden soll, gemäß den benachbarten Zuständen I00, II0 und einem Nullvektor zusammengesetzt. Die benachbarten Vektoren werden für eine Zeitdauer entsprechend ihrer Länge eingeschaltet. Von den zwei möglichen Nullvektoren wählt man denjenigen, der sich durch möglichst wenige Umschaltungen aus dem vorherigen Zustand ergibt. Die notwendigen Einschaltzeiten werden im Zeitraster der Vektorweitschaltung für den folgenden Zeitraum berechnet und in Timerregister geladen. Im nebenstehenden Beispiel ergeben sich für die Schaltzustände annähernd:

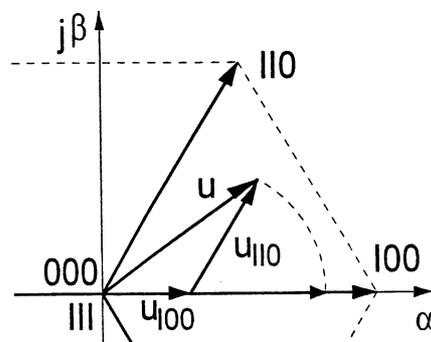
I00: 30%, II0: 50%, III: 20% der Taktzeit $1/f_s$

Versuchsvorbereitung:

1. Berechnen Sie die Ausgangsspannung eines Tiefsetzstellers an 200V Zwischenkreisspannung bei $t_{\text{ein}}/T = 0,4$.
2. Die Last eines Tiefsetzstellers kann als Spannungsquelle mit Induktivität angenommen werden. Leiten Sie die Welligkeit des Gleichstroms Δi als Funktion des Taktverhältnisses und der Frequenz her.
3. Wie hängt bei der angenommenen Last das Taktverhältnis vom Laststrom ab?
4. Der Frequenzumrichter soll mit $f = 25\text{Hz}$ und der Schaltfrequenz $f_s = 2\text{kHz}$ betrieben werden. Mit welcher Frequenz muss bei der Raumzeigermodulation jeweils die Länge der Einzelvektoren gerechnet werden?
Wie lang muss der Spannungsvektor sein, wenn er bei 50Hz gerade die Länge des Eckpunktes hat? Um welchen Winkel springt der Spannungsvektor bei jedem Schritt?
5. Begründen Sie, warum am gleichgerichteten 400V-Netz eine Asynchronmaschine mit 400V Nennspannung bei Frequenzen über ca. 50Hz in den Feldschwächbetrieb geht.
6. Wie müssen die Teile eines Tiefsetzstellers vertauscht werden, damit ein Inverswandler entsteht?



Schaltzustände in Vektordarstellung



Aufbau eines Spannungsvektors

Der Versuch:

Der Versuch findet an zwei Modellen statt:

1. Ein umbaubarer Tiefsetz- und Hochsetzsteller. Es handelt sich um ein Demonstrationsmodell für sekundärseitig getaktete Schaltnetzteile. Charakteristische Größen werden untersucht. Verschiedene Bauteile können erprobt werden. Da bei Schaltnetzteilen die zu regelnde Spannung immer konstant ist, kann auch hier nicht der Sollwert, sondern nur die Belastung variiert werden. Außerdem ist
2. Ein dreiphasiger Umrichter wird über eine Koppelkarte von einer d-space Karte angesteuert. Hier können ebenfalls die Steller-Schaltungen untersucht werden, wenn die nicht benötigten Teile der Schaltung abgeschaltet bleiben. Für den dreiphasigen Umrichterbetrieb können die Taktverfahren verwirklicht und untersucht werden. Die Koppelkarte hat folgende Funktionen: Verriegelung der Transistoren eines Zweiges gegen einander und Einfügen einer Sicherheitszeit beim Umschalten sowie die Potentialtrennung der d-space-Karte vom Rest der Schaltung.

Vorsicht:

Es ist keine Stromgrenze eingebaut.

Die Einspeisung ist jeweils ausgehend von Null auf die angegebenen Werte zu stellen.

Der einphasige Einspeisetransformator hat nur geringe Leistung. Bei Umbauten oder bei Änderung des Ansteuerprogramms ist er jeweils auf Spannung Null zu drehen. Erhöhen Sie die Spannung erst, wenn das Pulserzeugungsprogramm schon arbeitet.

Versuch Chopper / Umrichter, neue Aufgabenstellung

A: Chopper, unregelter Betrieb (Rückführung offen, Regler AUS !)

- Bauen Sie einen Tiefsetzsteller auf für :**
 $U_e = 50 \text{ V}$, $\lambda = 0,5$, $f_s = 20 \text{ kHz}$, $\Delta i = 1 \text{ A}$, $R_{\text{Last}} = 22 \text{ Ohm}$
Berechnen Sie zunächst L und wählen dann aus den zur Verfügung stehenden Speicherdrosseln die geeignetste aus.
Speisen Sie die Steuerspannung (10 V =) aus einem Funktionsgenerator zwischen der PWM und der Potentialtrennung ein und achten Sie auf die richtige Polarität der Elektrolytkondensatoren.
Bauen Sie Messgeräte für Strom und Spannung am Eingang und an der Freilaufdiode ein, die Instrumente für Strom und Spannung am Ausgang sind vorhanden.
Vorsicht : Die Strombegrenzung ist in diesem Fall nicht wirksam !!!
- Nehmen Sie die charakteristischen Spannungs- und Stromverläufe auf und dokumentieren Sie diese.**
- Tauschen Sie nacheinander die Diode und die Spule gegen eine andere Diode bzw. Spule aus und vergleichen Sie die Ergebnisse.**
Vorsicht : Die Spulen sind für unterschiedliche Ströme ausgelegt !!!
- Messen und stellen Sie grafisch dar : $U_a = f(\lambda)$ für $I_a = 1 \text{ A}$ und $\lambda = 0 - 1$**
- Messen und stellen Sie grafisch dar : $U_a = f(I_a)$ und $U_e = f(I_a)$**
Wie groß ist der ausgangsseitige Innenwiderstand der Schaltung ?
Bei welchem Strom setzt Lückbetrieb ein ?

B: Chopper, geregelter Betrieb (Rückführung schalten, Regler EIN !)

- Klemmen Sie den Funktionsgenerator ab. Stecken Sie die Rückführung und schalten den Wahlschalter auf Tiefsetzsteller und nehmen Sie den Regler in Betrieb.
Wiederholen Sie die Messungen aus A5.
- Bauen Sie auf einen Hochsetzsteller um.** Stecken Sie die Rückführung und schalten Sie den Wahlschalter auf Hochsetzsteller. Verwenden Sie nur die externen und die für den Hochsetzsteller vorgesehenen internen Widerstände.
Oszillografieren und dokumentieren Sie die charakteristischen Strom- und Spannungsverläufe.

C: Wechseln Sie zum Versuchsaufbau Chopper / Umrichter

Nehmen Sie den Chopper / Umrichter mit ohm'sch-induktiver Last und externem Funktionsgenerator in Betrieb (Betriebsart Chopper, $F = 4 \text{ kHz}$, $U_e = 150 \text{ V}$).

- Tiefsetzsteller : Messen und dokumentieren Sie: $U_a = f(\lambda)$ für $I_a = 5 \text{ A const.}$ und $U_e = 150 \text{ V = const.}$ und ermitteln Sie hierbei die Welligkeit des Laststromes.**
- 4-Quadranten-Chopper : Wiederholen Sie die Messungen aus C1**
- Schalten Sie um auf Umrichter und Rechnerbetrieb.**
Klemmen Sie den Funktionsgenerator ab. Starten Sie den Rechner und rufen Sie das Modell der Pulserzeugung durch Raumzeigermodulation auf.
Verstellen Sie die Nutzfrequenz und oszillografieren Sie die charakteristischen Pulsmuster, Spannungen und Ströme und dokumentieren diese.

FHD FB EuI Prof. Dr. Michel	Antriebstechnik und Leistungselektronik Labor für Mechatronik	Versuch EBS
Stromrichterschaltungen		
Vorbereitung: Skripte Antriebstechnik und Leistungselektronik		

Versuchsziel:

In diesem Versuch soll beispielhaft eine netzkommutierte Stromrichterschaltung im stationären Betrieb untersucht werden. Der Versuch vermittelt Kenntnisse über den Betrieb der Einphasenbrücke als Gleich- und Wechselrichter, die Belastung der Leistungshalbleiter, Steuerblindleistung und Oberschwingungen. Die Halbsteuerung als Möglichkeit zur Blindleistungsreduktion wird untersucht.

Grundlagen der vollgesteuerten Einphasenbrücke

Eine Last wird über eine Brückenschaltung mit Dioden gemäß Bild 1 an die sinusförmige Netzspannung gelegt. Für die beiden Netzhalbwellen ergeben sich die folgenden möglichen Strompfade:

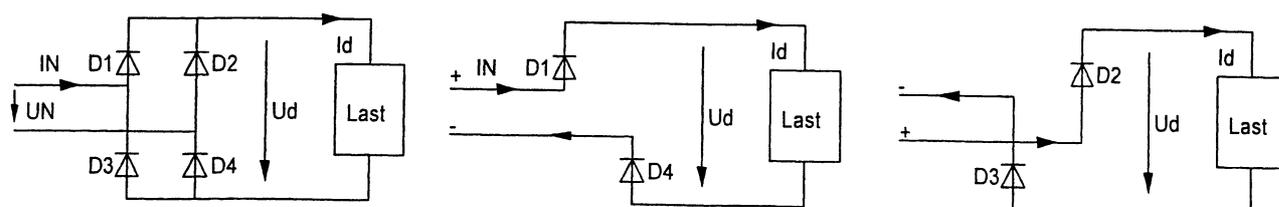
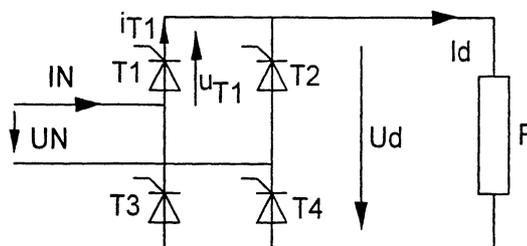


Bild 1: Diodenbrücke Stromfad pos. Halbwelle Stromfad neg. Halbwelle

Setzt man statt Dioden Thyristoren ein, so lässt sich der Einschaltzeitpunkt in jeder Halbwelle verzögern. Dazu werden jeweils die Thyristoren T1 und T4 sowie T2 und T3 gleichzeitig gezündet. Man definiert den Steuerwinkel α als den Verzögerungswinkel der Thyristorzündimpulse gegenüber dem natürlichen Zündzeitpunkt, das ist der Zeitpunkt, zu dem eine Diode durchschalten würde. Im Fall der Einphasenbrücke ist der natürliche Zündzeitpunkt der Nulldurchgang der Netzspannung. Setzt man als Last einen ohmschen Widerstand ein, so erhält man die zeitlichen Verläufe gemäß Diagramm 1.

Bild 2:

Vollgesteuerte Einphasenbrücke mit ohmscher Last

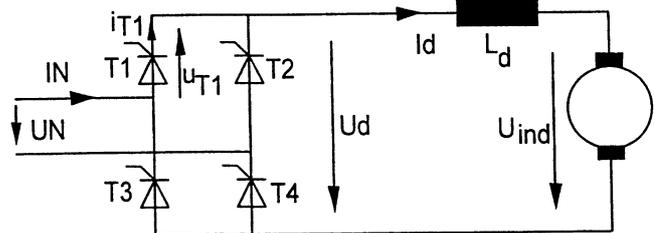


Wird die Brückenschaltung zur Speisung von Gleichstrommaschinen eingesetzt, so ist die Last wegen der Ankerinduktivität nicht mehr ohmsch, sondern ohmsch-induktiv, wobei die induzierte Spannung der Gleichstrommaschine ebenfalls in den Lastkreis eingeht. Um den Ankerstrom gut zu glätten (Momentenwelligkeit wegen $M \sim I_A$), schaltet man meist noch eine zusätzliche

Glättungsinduktivität in Reihe. Die exakte Berechnung bei welligem Gleichstrom ist sehr aufwendig. Als Näherung reicht es oft, den Gleichstrom als ideal geglättet anzusehen (Idealisierung mit $L_d \rightarrow \infty$). Damit ergibt sich Bild 3.

Bild 3:

Vollgesteuerte Einphasenbrücke mit induktiver Last



Es ergeben sich Verläufe gemäß Diagramm 2.

Der Mittelwert der Gleichspannung lässt sich berechnen gemäß

$$U_d = U_{di\alpha} - R_{ix} \cdot I_d$$

$$U_{di\alpha} = U_{di} \cdot \cos \alpha$$

$$U_{di} = 0,9 \cdot U_N$$

Daraus erkennt man, dass bei Steuerwinkeln $\alpha > 90^\circ$ die Ausgangsspannung negativ wird (Beispiel 6). Es wird also Energie von der Last in das Netz geliefert. Dazu muss die Last eine Spannungsquelle mit negativer Spannung sein, z.B. ein Motor, der in Gegenrichtung angetrieben wird. Man bezeichnet die Bereiche wie folgt:

$$0 \leq \alpha \leq 90^\circ \quad \text{Gleichrichterbetrieb}$$

$$90^\circ < \alpha < 180^\circ \quad \text{Wechselrichterbetrieb}$$

Wie aus den Bildern ersichtlich, treten durch die schaltende Betriebsweise Nebeneffekte auf:

- Die Netzströme sind Blockströme
Dies wird beschrieben durch die Überlagerung einer netzfrequenten Grundschwingung mit ganzzahligen Harmonischen.

Man muss also unterscheiden zwischen der Grundschwingung des Netzstromes und dem Effektivwert des Netzstromes
Da für die Kurvenform immer gilt:

$$i_N(t) = -i_N(t-T/2)$$

treten außer der Grundschwingung nur ungeradzahlige

Harmonische auf. Es gilt:

$$I_N = \sqrt{I_{N1}^2 + \sum_{v=3}^{\infty} I_{Nv}^2}$$

- Die Ausgangsspannung ist nicht glatt
Dies wird beschrieben durch die Überlagerung einer Gleichspannung gemäß den angegebenen Formeln mit ganzzahligen Harmonischen.

Man muss also unterscheiden zwischen dem Mittelwert der Ausgangsspannung und dem Effektivwert der Ausgangsspannung
Da für die Kurvenform immer gilt:

$$u_d(t) = u_d(t-T/2)$$

treten außer der Gleichspannung nur geradzahlige

Oberschwingungen auf. Es gilt:

$$U_{deff} = \sqrt{U_d^2 + \sum_{v=2}^{\infty} U_{dv}^2}$$

- Die Stromblöcke des Netzstromes sind gegenüber der sinusförmigen Netzspannung um den Steuerwinkel α verschoben. Dies bedingt Blindleistung durch die Betriebsweise des Stromrichters.

Für die abgegebene (und im verlustfreien Fall für die aufgenommene) Wirkleistung gilt:

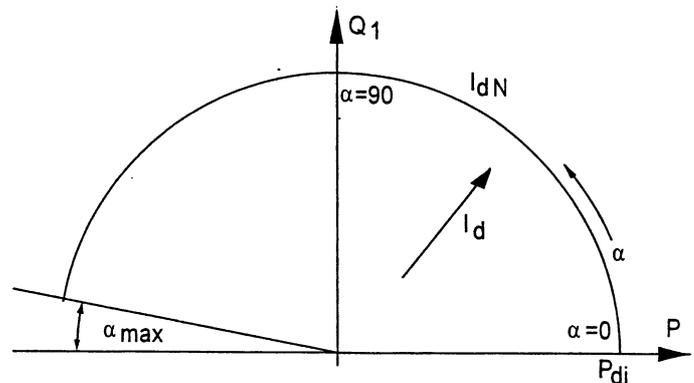
$$P = U_N \cdot I_{N1} \cdot \cos \varphi_1 = P_d = U_d \cdot I_d$$

Die Grundschwingungsblindleistung infolge der Verschiebung der Stromgrundschwingung gegenüber der Netzspannung um den Grundschwingungsverschiebungswinkel φ_1 ist:

$$Q_1 = U_N \cdot I_{N1} \cdot \sin \varphi_1$$

Dies lässt sich in folgendem Bild 4 darstellen.

Bild 4



Hinweis: Da infolge der Induktivitäten in der Zuleitung die Kommutierung eine gewisse Zeit braucht, wird der Stromblock an den Flanken etwas angeschragt und gegenüber der Netzspannung um etwas mehr als den Steuerwinkel α verschoben. Die daraus resultierende Blindleistung bezeichnet man als Kommutierungsblindleistung.

Folgesteuerung

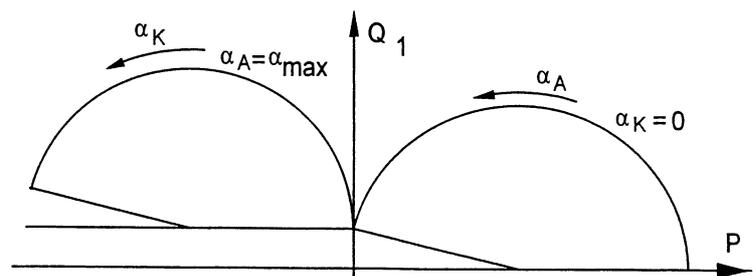
Wenn man eine Brückenschaltung als Reihenschaltung von zwei Mittelpunktschaltungen auffasst, lassen sich die Halbleiter der A-Seite und der K-Seite unabhängig voneinander steuern, z. B. indem erst die Thyristoren der A-Seite von Null bis in Wechselrichterendlage durchgesteuert werden (α_A) und anschließend die Thyristoren der K-Seite (α_K).

Man erhält

$$U_{di\alpha} = U_{di} \cdot \frac{\cos \alpha_K + \cos \alpha_A}{2}$$

Die Wirkleistungen und die Blindleistungen der beiden Halbbrücken addieren sich:

Bild 5



Halbsteuerung

Eine besonders einfache und elegante Lösung erhält man, wenn man auf die Leistungsumkehr verzichtet und sich auf positive Ausgangsgleichspannung beschränkt. Man kann dann für eine Brückenhälfte Dioden einsetzen. Die Dioden schalten im natürlichen Zündzeitpunkt, die Thyristoren sind um α verzögert.

Man erhält

$$U_{di\alpha} = U_{di} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

Dies bedeutet die Beschränkung auf den rechten Bereich des Bildes 5.

Bei der **symmetrisch halbgesteuerten Einphasenbrücke** ergeben sich die Stromwege gemäß den folgenden Bildern:

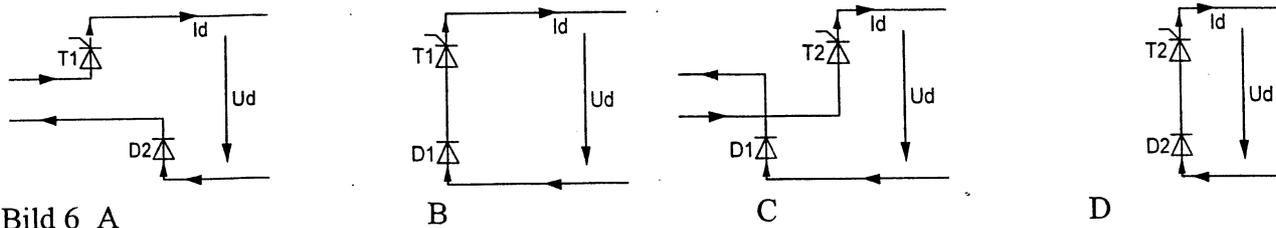


Bild 6 A

Wenn man nicht die A-Seite mit Dioden bestückt, sondern einen Brückenzweig, so ergibt sich die **unsymmetrisch halbgesteuerte** Brückenschaltung. Die Dioden schalten wieder in ihrem natürlichen Zündzeitpunkt, während die Thyristoren mit α gesteuert werden. Daraus folgt, dass die Leitauern der Halbleiter nicht jeweils 180° betragen, sondern dass sich die Leitdauer der Thyristoren mit steigendem Steuerwinkel verkürzt, während sich die Leitdauer der Dioden in gleicher Weise verlängert. Es ergeben sich die Stromwege gemäß den folgenden Bildern:

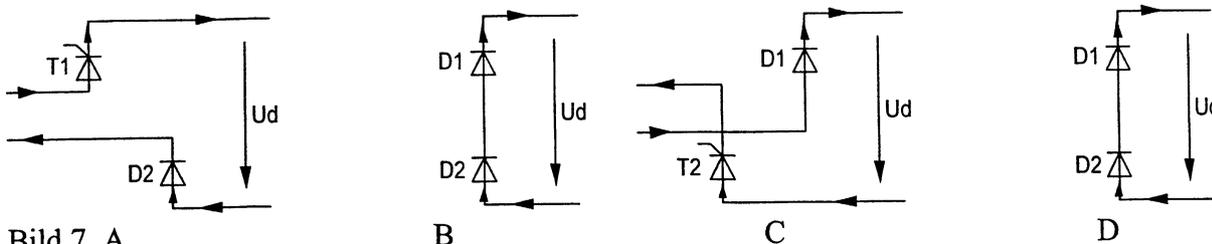


Bild 7 A

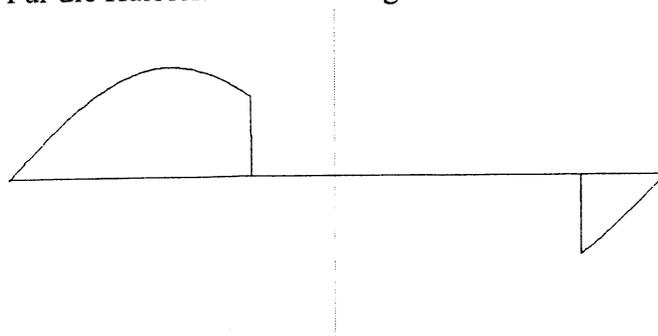
Die unsymmetrisch halbgesteuerte Brücke kann deshalb bis 180° gesteuert werden, d. h. ihre Ausgangsspannung kann bis auf Null heruntergeregelt werden. Sie wird deshalb in der Praxis gegenüber der symmetrisch halbgesteuerten Schaltung bevorzugt.

Aus den Diagrammen erkennt man, dass sich aus der Halbsteuerung sowohl für die symmetrisch halbgesteuerte als auch für die unsymmetrisch halbgesteuerte Brücke glattere Gleichspannungsverläufe ergeben als bei der vollgesteuerten Brücke, weil zu keinem Zeitpunkt negative Spannungen im Zwischenkreis auftreten.

Bei beiden Schaltungen existieren für $\alpha \neq 0$ Zeitabschnitte, in denen der Netzstrom Null ist, weil der Gleichstrom über einen Freilaufkreis fließt.

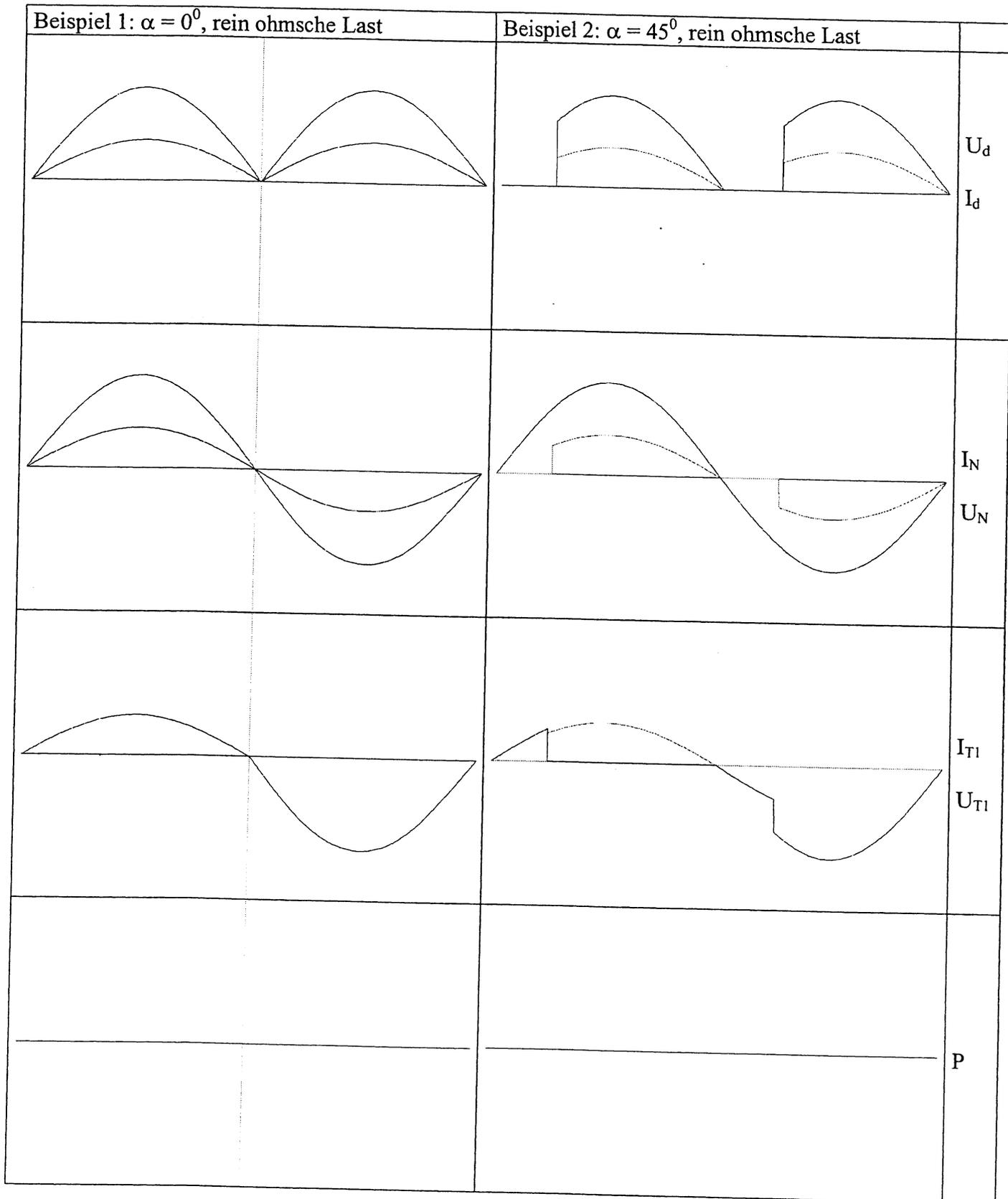
Da die Netzstromblöcke jeweils erst bei Zündung der Thyristoren beginnen, aber im Nulldurchgang der Netzspannung enden, wird der Schwerpunkt des Netzstromblocks und damit seine Grundschiwingung um $\alpha/2$ gegenüber der Netzspannung verschoben.

Für die Halbleiter werden folgende Zeitabschnitte definiert:



- α Steuerwinkel
- δ Stromführungswinkel
- γ Löschwinkel

Diagramm 1:



* Wenn alle Thyristoren sperren, liegt die Netzspannung an der Reihenschaltung von jeweils zwei Thyristoren. Die Spannungsaufteilung hängt vom Sperrverhalten der beiden Thyristoren ab.

Diagramm 2:

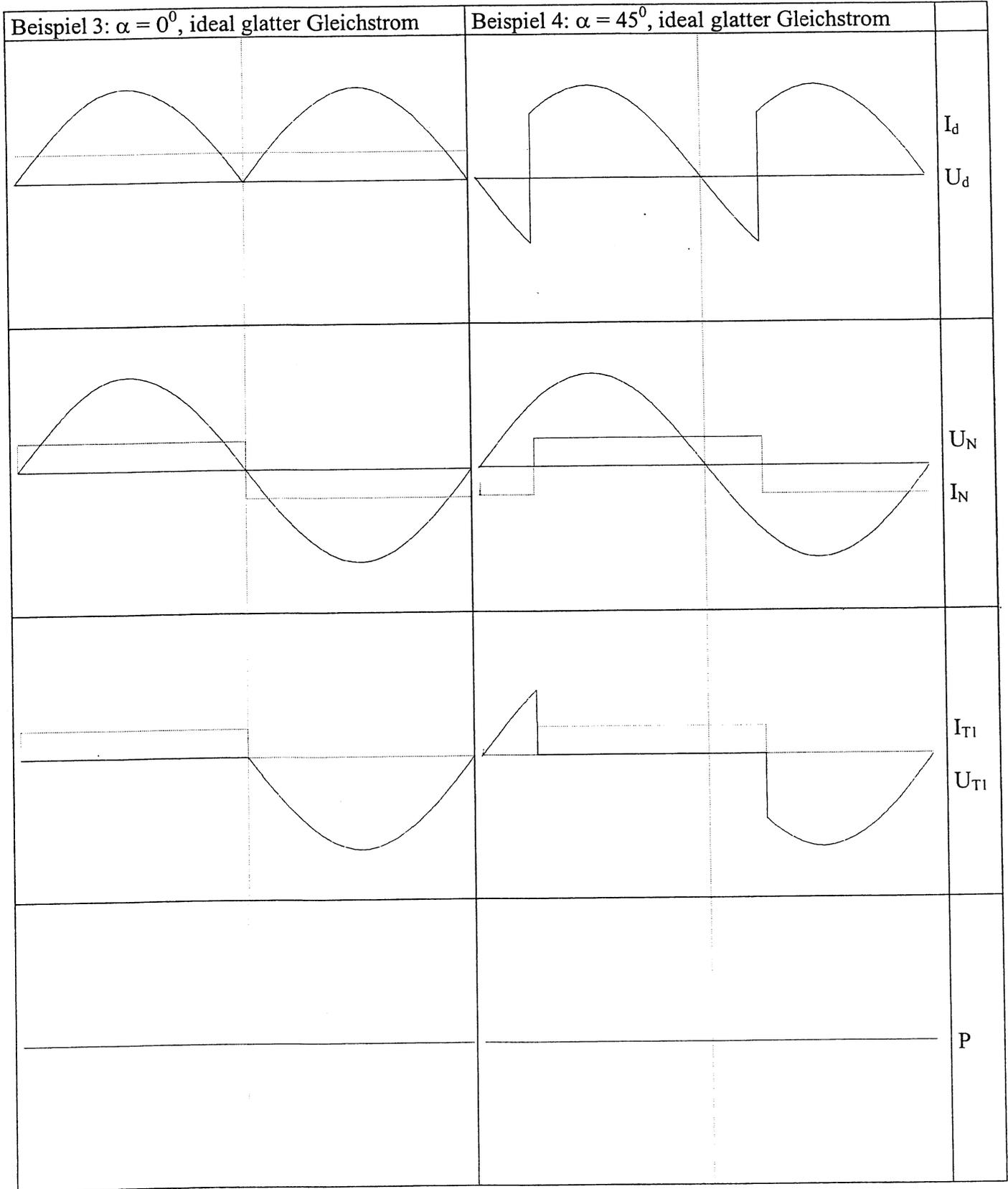


Diagramm 3:

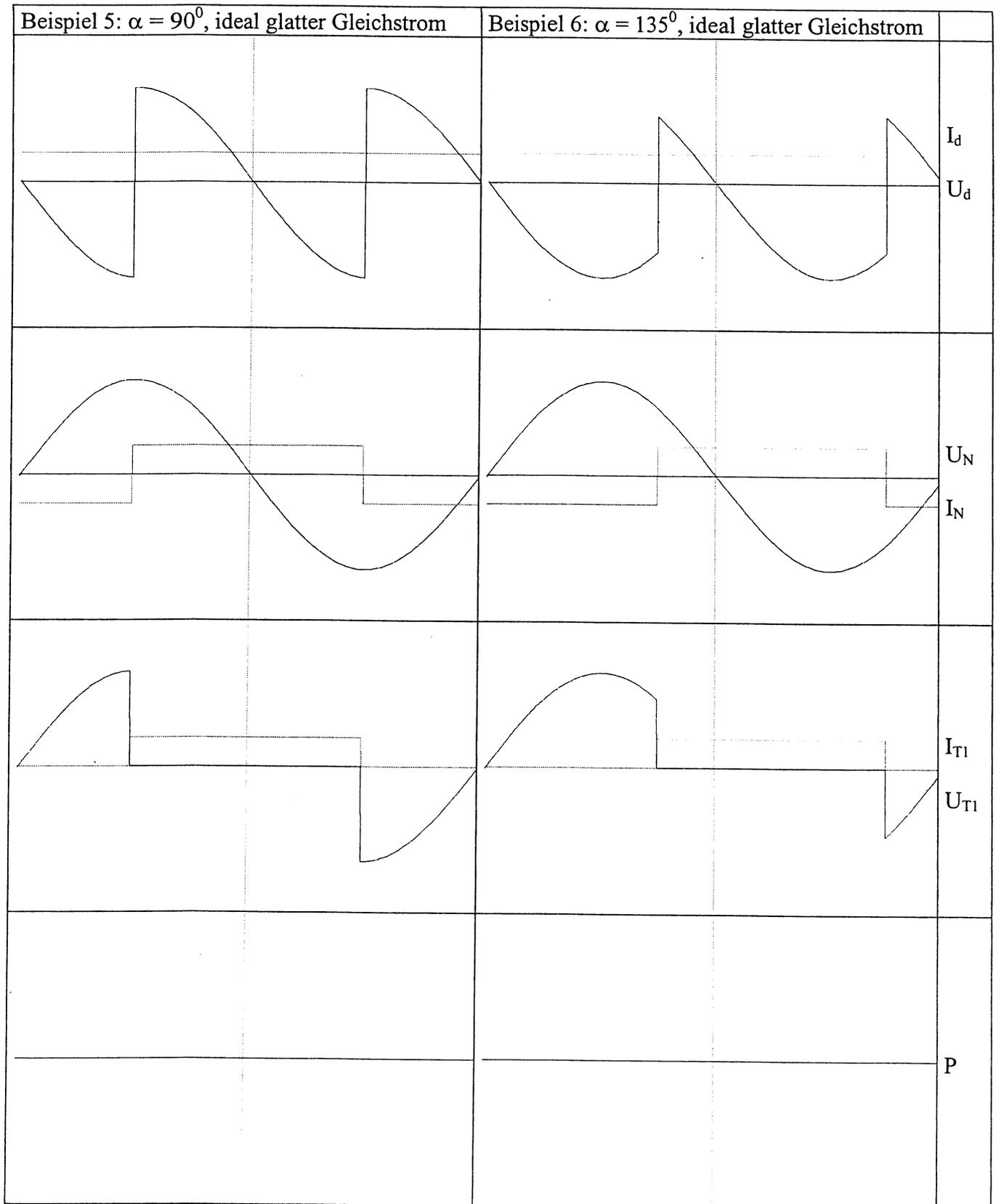
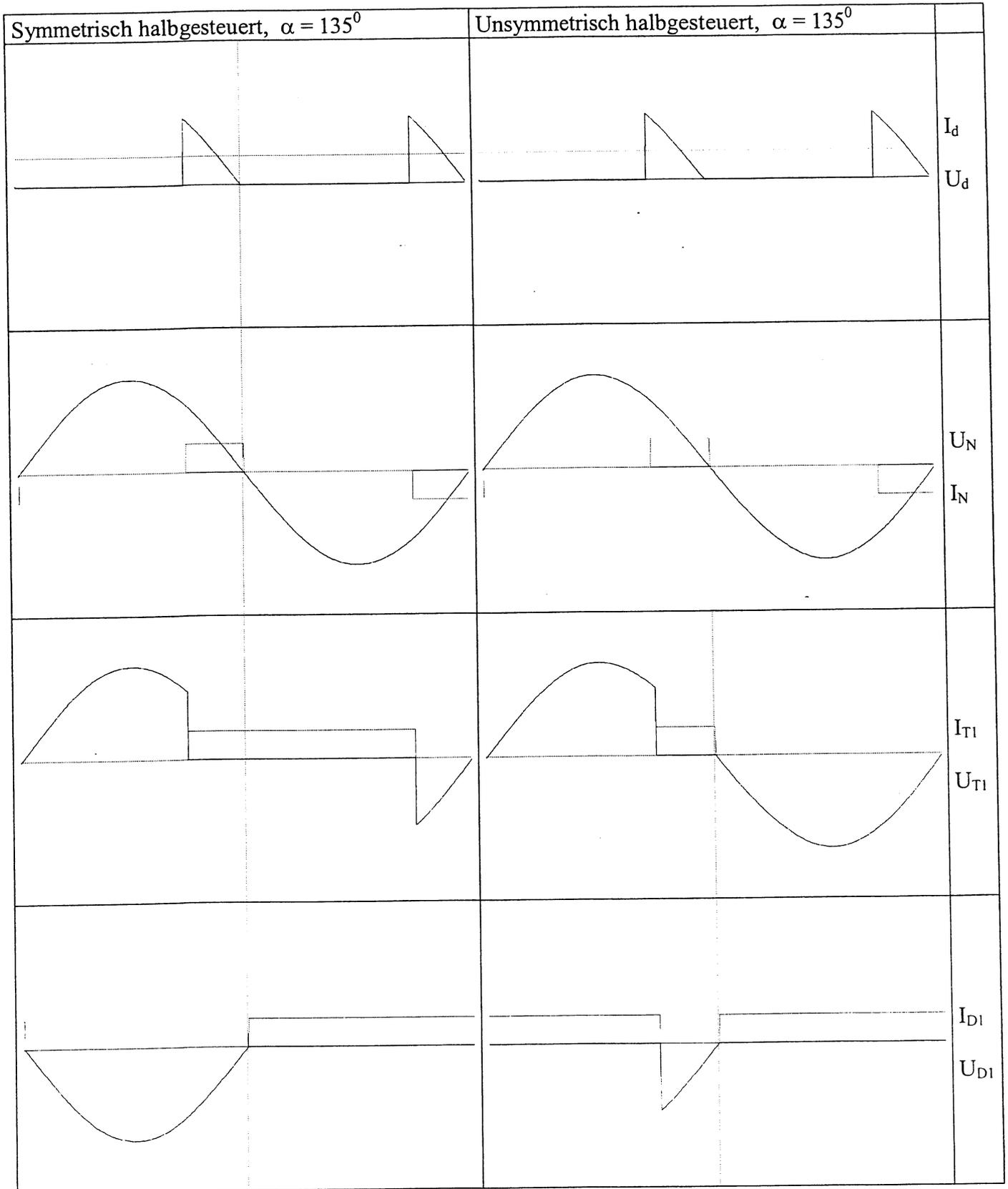


Diagramm 4:



Versuchsvorbereitung

1. Tragen Sie in den Diagrammen 1, 2 und 3 jeweils den zeitlichen Verlauf der Leistung im vorbereiteten Feld ein. Warum ist es gleich, ob Sie sich für die Leistung auf der Gleichstromseite $p_d = u_d \cdot i_d$ oder auf der Netzseite $p = u_N \cdot i_N$ entscheiden?

2. Markieren Sie in allen Diagrammen die Ströme (rot) und Spannungen (blau).

3. Ordnen Sie für die halbgesteuerten (symmetrisch und unsymmetrisch) Brücken die Stromleitphasen A – D der Bilder 6 und 7 den Zeitabschnitten im Diagramm 4 zu.

4. Der Mittelwert der einer periodischen Spannung ist definiert durch $U = \frac{1}{T} \int_0^T u dt$

Der Effektivwert ist definiert durch $U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}$

Ermitteln Sie für Diagramm 2, Beispiel 4 den Mittelwert und den Effektivwert, indem Sie die notwendigen Integrationen durchführen. ($u(t) = \sqrt{2} \cdot 230V \cdot \sin(100 \cdot \pi \cdot t)$)

Hilfe: $\sin^2 x = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos 2x)$

5. Der Effektivwert einer oberwellenhaltigen Gleichspannung lässt sich

berechnen gemäß

$$U_{eff} = \sqrt{\sum_{v=0}^{\infty} U_v^2} = \sqrt{U_0^2 + \sum_{v=1}^{\infty} U_v^2}$$

Die Welligkeit einer Oberschwingungshaltigen

Gleichspannung ist allgemein definiert als

$$w = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} U_v^2}}{U_0}$$

Da der Mittelwert der Ausgangsspannung bei Stromrichterschaltungen zu Null werden kann,

definiert man hier abweichend:

$$w = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} U_v^2}}{U_{di}}$$

Berechnen Sie für Diagramm 2, Beispiel 4 die Welligkeit.

6. Berechnen Sie für Diagramm 2, Beispiel 4 für die Werte $U_{Neff} = 230V$, $I_d = 5A$ die Wirkleistung, die Grundschiwungsblindleistung, und den Effektivwert des Netzstromes.

Ermitteln Sie auch die Grundschiwung des Netzstromes.

Hilfe: Setzen Sie Netzleistung und Gleichstromleistung gleich.

Hilfe: Wie groß ist in diesem Fall der Grundschiwungsverschiebungswinkel ϕ_1 ?

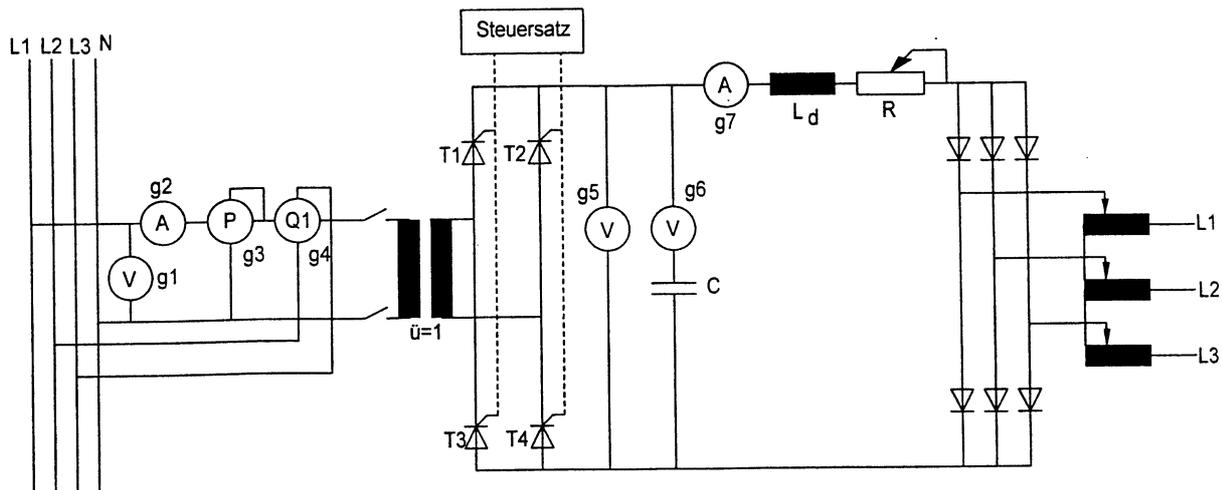
7. Entnehmen Sie aus einer Formelsammlung die Oberschwingungen des zugehörigen Netzstromes zu 6.

8. Welche Größen erfassen Sie mit den angegebenen Messgeräten? (siehe Schaltbild)

Schaltungsaufbau

Eine Brückenschaltung ist über einen Transformator $\bar{u} = 1$ an das Netz zwischen L_1 und N angeschlossen. Als Last wird die Reihenschaltung einer Induktivität mit einem ohmschen Widerstand genutzt. Damit man auch negative Ausgangsspannungen bei positivem Gleichstrom hervorrufen kann, ist eine Diodenbrücke in den Kreis geschaltet. Durch einen Stelltransformator lässt sich die Spannung variieren.

Die Schaltung lässt sich einfach in eine halbgesteuerte Schaltung überführen, indem die entsprechenden Thyristoren durch Dioden überbrückt werden.



Die Geräte g_1 , g_2 , g_6 sind Effektivwertmesser.

Die Geräte g_5 und g_7 sind Mittelwertmesser.

In Reihe zum Gerät g_6 liegt ein Kondensator ausreichender Größe, so dass der Mittelwert der Gleichspannung ausgekoppelt wird.

Die verwendeten Oszilloskope bieten eine Ablesemöglichkeit und Einstellmöglichkeit für Winkel.

Achtung: Das Gerät g_4 misst $\sqrt{3} \cdot Q_1$ weil der Spannungspfad des Wattmeters an die verkettete Spannung angeschlossen ist.

Achtung: Während Sie den Steuerwinkel verändern achten Sie unbedingt auf den Gleichstrom.

Achtung: Der Gleichspannung sind Oberschwingungen überlagert.

Versuchsdurchführung

1. Nehmen Sie die vollgesteuerte Brücke in Betrieb, stellen Sie ca. $\alpha = 45^\circ$ ein und machen Sie sich mit allen Oszillogrammen vertraut.
2. Führen Sie an der vollgesteuerten Brücke die Messungen gemäß Messprotokoll 1 mit dem Parameter α durch. Halten Sie I_d auf $I_d = 5A$.
Beobachten Sie die Oszillogramme bei den verschiedenen Steuerwinkeln und vergleichen Sie mit den vorgefertigten Oszillogrammen.
3. Führen Sie die Messungen und Beobachtungen gemäß 2. an der symmetrisch halbgesteuerten Brücke durch.
4. Führen Sie die Messungen und Beobachtungen gemäß 2. an der unsymmetrisch halbgesteuerten Brücke durch.
5. Oszillografieren Sie die entsprechenden Größen an einer B6C-Schaltung (Ausgangsspannung, Gleichstrom, Netzstrom, Thyristorstrom) und messen Sie die Steuerkennlinie.

Fachhochschule Darmstadt	Labor "Leistungselektronik"	Fachbereich Elektrotechnik
Wi/So-Sem.	W R K Kippung beim netzgeführten Wechselrichter	Versuchsteilnahme bestätigt:
Datum:	Gruppe:	
Name:		
Sem.:		

Kippung bei netzgeführten Wechselrichtern

1. Versuchs-Grundlagen:

Wechselrichter-Betrieb:

Ein im Wechselrichterbetrieb arbeitender netzgeführter Stromrichter überträgt elektrische Energie von der Gleichstromseite über den Stromrichtertransformator in das Drehstromnetz.

Beispiele für einen solchen Wechselrichterbetrieb sind :

Gleichstrom-Antriebe im Bremsbetrieb

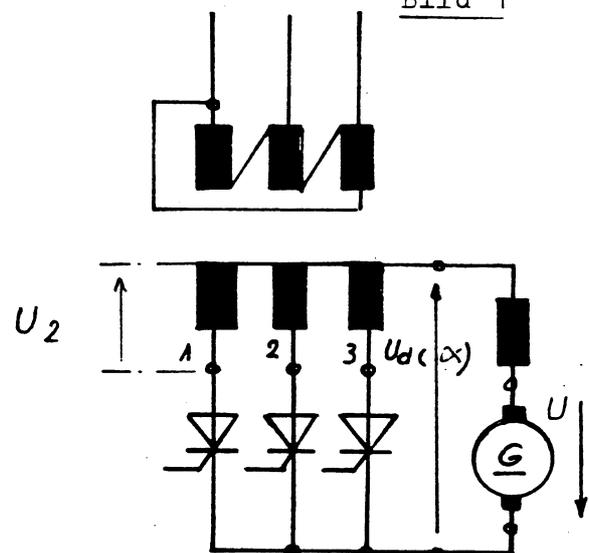
Wechselrichter-Kopfstation einer Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ).

Dabei ist die treibende Spannung U der Gleichstromquelle der Wechselrichter-Klemmenspannung $U_d(\alpha)$ entgegengeschaltet.

Die Energiequelle auf der Gleichstromseite drückt im Wechselrichterbetrieb also dem Drehstromnetz über den Stromrichter den Strom gegen die Richtung der Netzspannung auf !

Beispiel: Dreiphasen-Mittelpunktschaltung M3

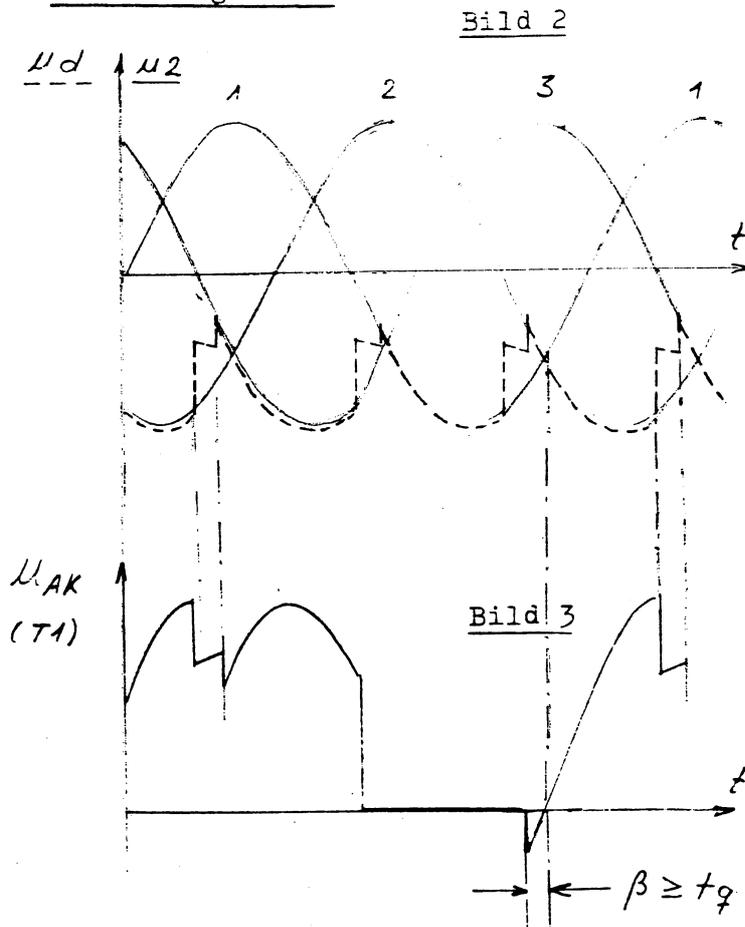
Bild 1



Liniendiagramme:

Zur Aufrechterhaltung eines sicheren Wechselrichterbetriebes muß gewährleistet sein, daß nach Zündung des Folgeventils (hier T2) die Spannung im Kommutierungskreis ausreicht, um das stromführende Ventil (hier T1) zu löschen und den Strom im Folgeventil aufzubauen.

Nach dem Löschen muß für die Dauer des Löschwinkels β ($\beta \geq t_q$) negative Sperrspannung am gelöschten Ventil anstehen, um ein Durchzünden bei positiv werdender Sperrspannung infolge der noch vorhandenen freien Ladungsträger zu verhindern.



Wechselrichter-Kippung

1.1 Kippung bei der Dreiphasen-Mittelpunktschaltung)

Vorgang:

Es werde angenommen, der Wechselrichter habe bis zum Zeitpunkt t_1 gearbeitet. Im Zeitpunkt t_1 setzt dann die Kommutierung des Stromes vom stromführenden Ventil T1 auf das Folgeventil T2 ein. Durch unzulässig weite Aussteuerung sei dieser Kommutierungsvorgang im Zeitpunkt t_2 ($u_{22} = u_{21}$) noch nicht beendet.

Die im Zeitpunkt t_2 positiv werdende Kommutierungsspannung u_k bewirkt von t_2 an ein Abklingen des Stromes in T2, während der Strom in T1 wieder ansteigt.

Die Gleichspannung U des Generators arbeitet von t_2 an also auf eine Transformator-Phasenspannung u_{21} , die im Zeitpunkt t_3 Null wird und von da an über 180° el. die gleiche Richtung besitzt wie U selbst. Dadurch kommt ein kurzschlußartig ansteigender Strom i_k über die Gleichstromquelle, das nicht gelöschte Ventil (T1) und die angeschlossene Transformator-Phase (1) zum Fließen.

Dieser Strom i_k besteht aus:

Gleichstromglied:

$$I_{k(-)} = \frac{U}{R_k}$$

Wechselstromglied 50 Hz:

$$I_{k(\sim)} = \frac{U_2}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

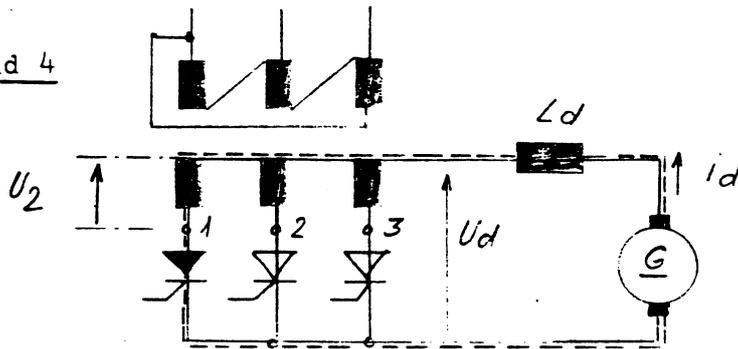
Dabei ist: U Generator-Klemmenspannung
 R_k Gesamter ohmscher Widerstand des Kurzschlußkreises
 X_k Gesamter induktiver Widerstand des Kurzschlußkreises
 $X_k = 2 \cdot f \cdot L_1$ $f = 50 \text{ Hz}$ (Netzfrequenz)

Der Scheitelwert \hat{i}_k dieses Kurzschlußstromes ergibt sich somit zu:

$$\hat{i}_k = I_{k(-)} + \sqrt{2} \cdot I_{k(\sim)} = \frac{U}{R_k} + \sqrt{2} \frac{U}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

Schaltung:

Bild 4



Kurzschlußkreis
bei WR-Kippung
wenn Stromüber-
gabe von T1 auf
T2 mißlingt.

Liniendiagramme:

u_2 ———
 u_d - - - -

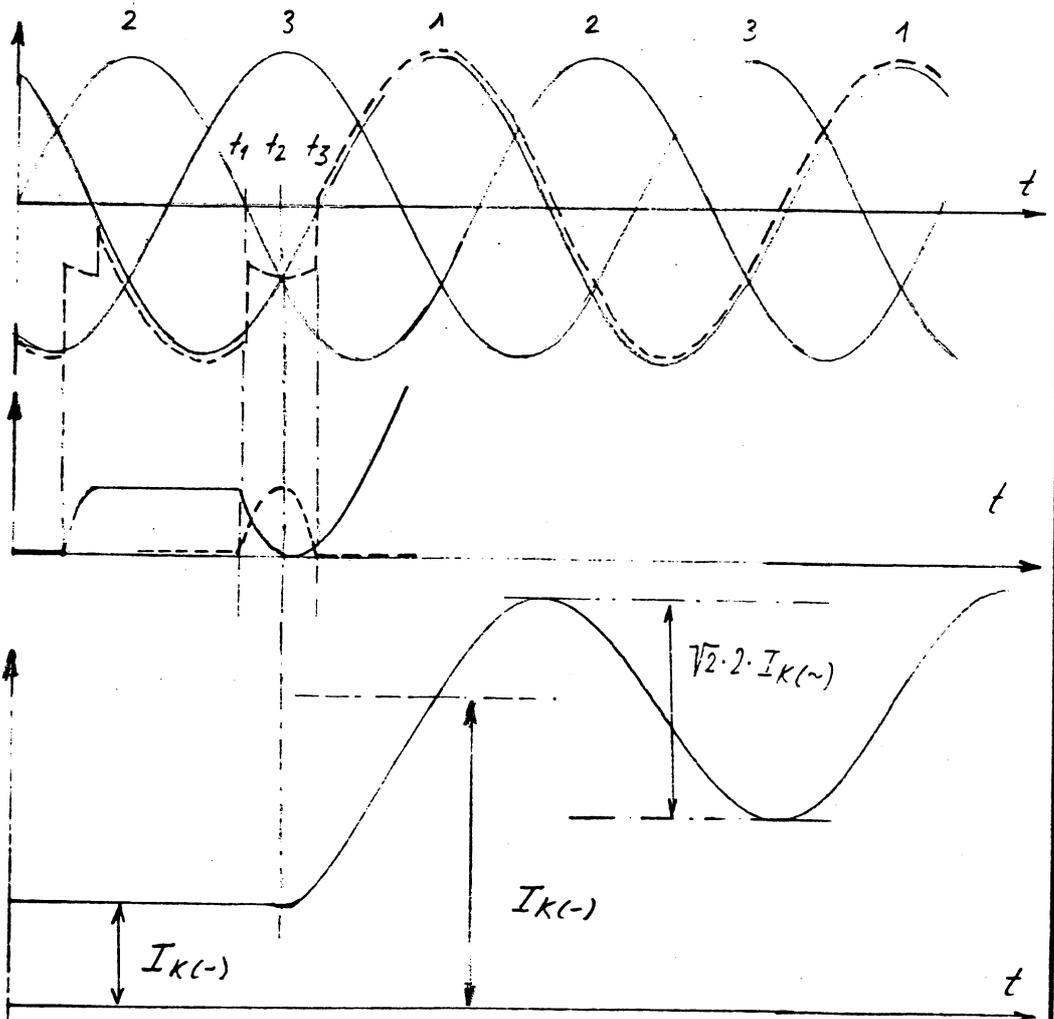
Bild 5

i_{T1} ———
 i_{T2} - - - -

Bild 6

$i_k = 0$

Bild 7



Auslösen der Wechselrichter-Kippung:

1. Vergrößern des Steuerwinkels α auf Werte $\alpha \geq \alpha_{\max}$

Folge: Der Kommutierungsvorgang ist nicht abgeschlossen, wenn die Spannung U_k im Kommutierungskreis ihr Vorzeichen wechselt.

Dadurch wird das bis dahin stromführende Ventil nicht mehr gelöscht, es kommt zur Kippung des Wechselrichters.

2. Vermindern der Spannung U des gespeisten Drehstromnetzes bei $\alpha \leq \alpha_{\max}$

Folge: Die niedrigere Spannung im Kommutierungskreis bewirkt bei konstantem Gleichstrom I_d eine Vergrößerung des Überlappungswinkels u .

Dadurch sinkt der Löschwinkel β auf Werte $\beta \leq t_q$ ab.

Das bis dahin stromführende Ventil wird nicht gelöscht, der Wechselrichter kippt.

3. Erhöhen des Gleichstromes I_d bei $\alpha \leq \alpha_{\max}$

Folge: Der höhere Gleichstrom bewirkt ein Ansteigen des Überlappungswinkels u . Dadurch wird - wie im Fall 2 - der Löschwinkel β auf Werte $\beta \leq t_q$ abgesenkt.

Das bis dahin stromführende Ventil wird nicht gelöscht, der Wechselrichter kippt.

4. Ausfall eines Zündimpulses (z.Bsp. durch Leiterbruch) bei $\alpha \leq \alpha_{\max}$

Folge: Das Folgeventil, dessen Zündimpuls ausfällt, kann den erforderlichen Kommutierungsvorgang nicht einleiten.

Das bis dahin stromführende Ventil wird nicht gelöscht, der Wechselrichter kippt.

Auswirkungen der Wechselrichter-Kippung:

1. Gleichstromseitig:

Hier kommt ein kurzschlußartiger Strom i_k über die Gleichstromquelle, das nicht gelöschte Ventil und die angeschlossene Transformator-Phase zum Fließen.

Abhilfe: Halbleiter-Sicherungen bzw. Schnellschalter auf Gleichstrom-Seite.

Wechselrichter-Fangschaltung:

Das Kommutierungsversagen im Zeitpunkt t_2 wird erfaßt und löst ein vorzeitiges Zünden des Folgeventils T3 unmittelbar nach t_2 aus. Da die Spannung an T3 in diesem Zeitpunkt positiv ist, kann der Strom von T1 auf T3 kommutieren, der Wechselrichter "fängt sich".

Gleichzeitig müssen die Zündimpulse für alle Ventile auf Werte $\alpha \leq \alpha_{\max}$ zurückgenommen werden.

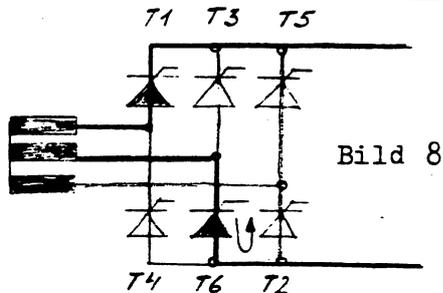
2. Netzseitig:

- a) Der hohe Wechselstromanteil $I_{k(\sim)}$ des Kurzschlußstromes i_k wird in das Drehstromnetz übertragen.
- b) Der Gleichstromanteil $I_{k(-)}$ des Kurzschlußstromes i_k bewirkt einen Gleichfluß im gestörten Transformator-Schenkel, der sich über die beiden anderen Transformator-Schenkel schließt.

Dadurch verschiebt sich der magnetische Arbeitspunkt des Transformators in allen drei Phasen in Richtung Sättigung.

Der Transformator nimmt in allen Phasen einen hohen stark verzerrten Magnetisierungsstrom mit einem großen Gehalt an ungeradzahligem Oberschwingungen auf.

1.2 Kippung bei der Drehstrom-Brückenschaltung

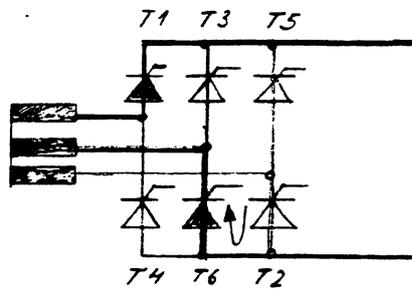


Annahme:

Die nebenstehende Schaltung arbeite mit $\alpha \leq \alpha_{max}$.

Im Zeitpunkt t_1 führen die Ventile T1 und T2 Strom.

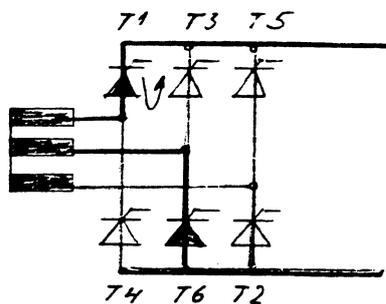
t_1 : Thyristor T2 zündet, die Kommutierung von T6 nach T2 beginnt.



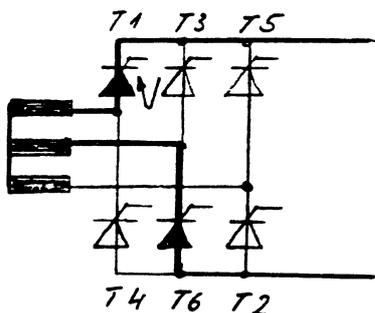
t_2 : Die Spannung im Kommutierungskreis T6-T2 wird Null und kehrt ihre Richtung um, bevor der Kommutierungsvorgang abgeschlossen ist.

Dadurch bleibt T6 stromführend, der Strom in T2 klingt wieder ab (Pfeil !)

t_3 : Thyristor T2 erlischt.



t_4 : Thyristor T3 zündet, die Kommutierung von T1 nach T3 beginnt. (Pfeil!)



t_5 : Die Spannung im Kommutierungskreis T1-T3 wird Null und kehrt ihre Richtung um, bevor der Kommutierungsvorgang abgeschlossen ist.

Dadurch bleibt T1 stromführend, der Strom in T3 klingt wieder ab (Pfeil !)

t_6 : Thyristor T3 erlischt wieder.

Liniendiagramme für Wechselrichter-Kippung bei der Drehstrom-Brückenschaltung

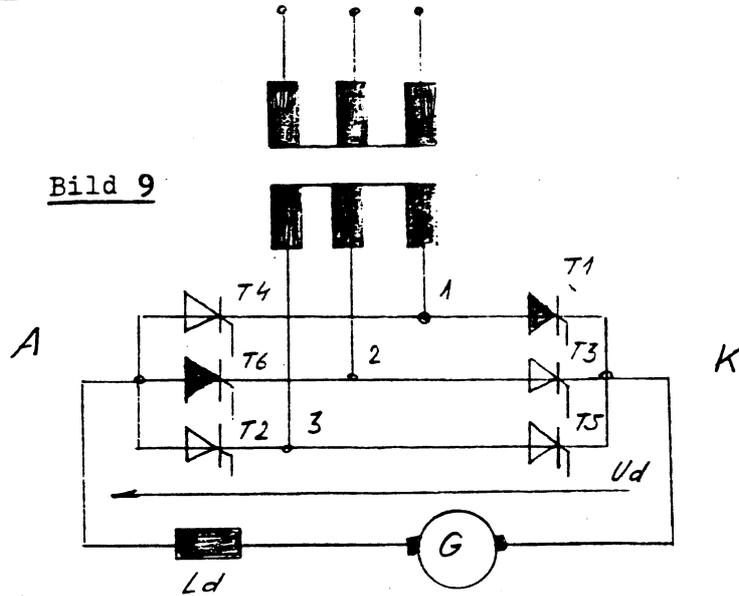


Bild 10

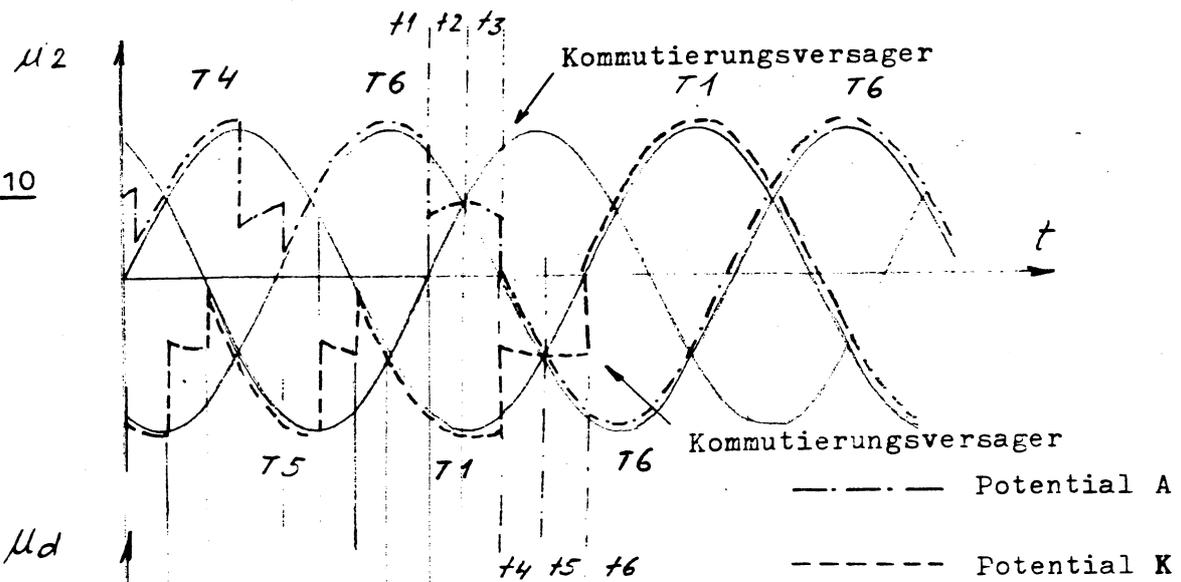
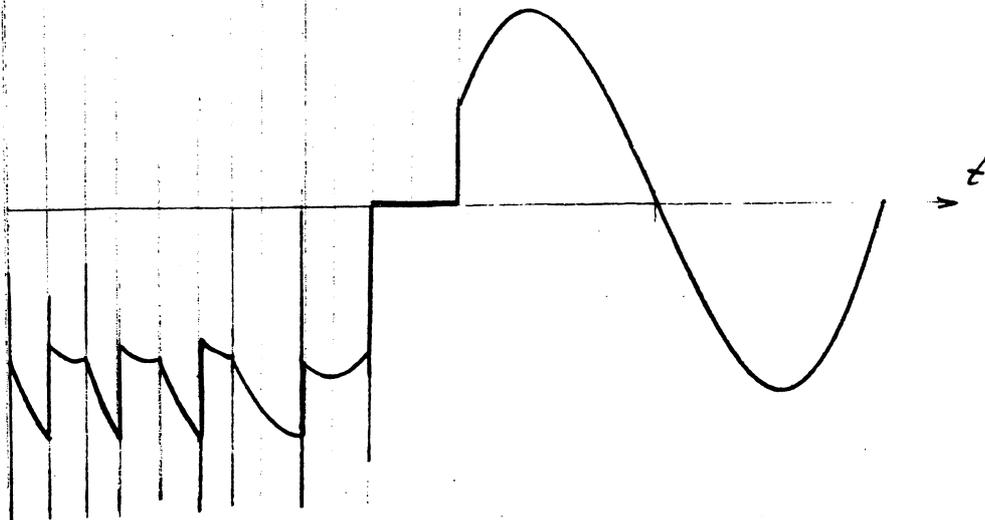


Bild 11



Auswirkungen der Wechselrichterkipfung bei der Drehstrom-Brückenschaltung

1. Gleichstromseitig

Auf der Gleichstromseite tritt nach erfolgter Kippung ein Kurzschlußstrom über die Gleichstromquelle, die beiden nicht gelöschten Ventile und die mit diesen Ventilen verbundenen Transformator-Phasen auf.

Dieser Kurzschlußstrom wird getrieben von der Summe aus Gleichspannung U (z.B. Klemmenspannung des Generators) und verketteter (!) Transformatorspannung $3 U_2$!

Abhilfe: Vgl. M3 !

2. Netzseitig

a) Der hohe Wechselstromanteil $I_{k(\sim)}$ des Kurzschlußstromes I_k wird zweiphasig in das Drehstromnetz übertragen.

b) Der Gleichstromanteil $I_{k(-)}$ des Kurzschlußstromes I_k bewirkt einen Gleichfluß über beide gestörte Transformator-Schenkel in entgegengesetzter Richtung.

Durch die daraus resultierende starke Verschiebung des magnetischen Arbeitspunktes in Richtung Sättigung nimmt der Transformator netzseitig in den beiden gestörten Phasen einen großen Magnetisierungsstrom mit hohem Gehalt an ungeradzahligen Oberwellen auf.

2. Versuchsbeschreibung

Der Versuch "Kippung beim netzgeführten Wechselrichter" wird an einem Versuchsaufbau gemäß Bild 12 durchgeführt.

Der Wechselrichter besteht dabei aus den Thyristoren T1 - T6, die über das Impulssteuergerät u1 gezündet werden.

Der Steuerwinkel α kann dabei über das Potentiometer r1 im Steuergerät oder über den Schwenktransformator m3 eingestellt werden.

Die gleichstromseitige Spannungsquelle wird über die Diodenbrücke n1 in Verbindung mit dem Stelltransformator m2 gebildet.

Zur Begrenzung des bei der Wechselrichter-Kippung einsetzenden Kurzschlußstromes I_k auf für die Schaltung ungefährliche Werte ist der Last-Stellwiderstand r2 vorgesehen.

Mit dem Wechselschalter a2 kann der gesteuerte Stromrichter wahlweise in M3- oder B6-Schaltung betrieben werden.

Die dem Stromrichtertransformator m1 vorgeschalteten Drosselspulen k1.1 .. k1.3, die eine höhere Streuinduktivität des Transformators nachbilden sollen, können durch den dreipoligen Schalter a3 überbrückt werden.

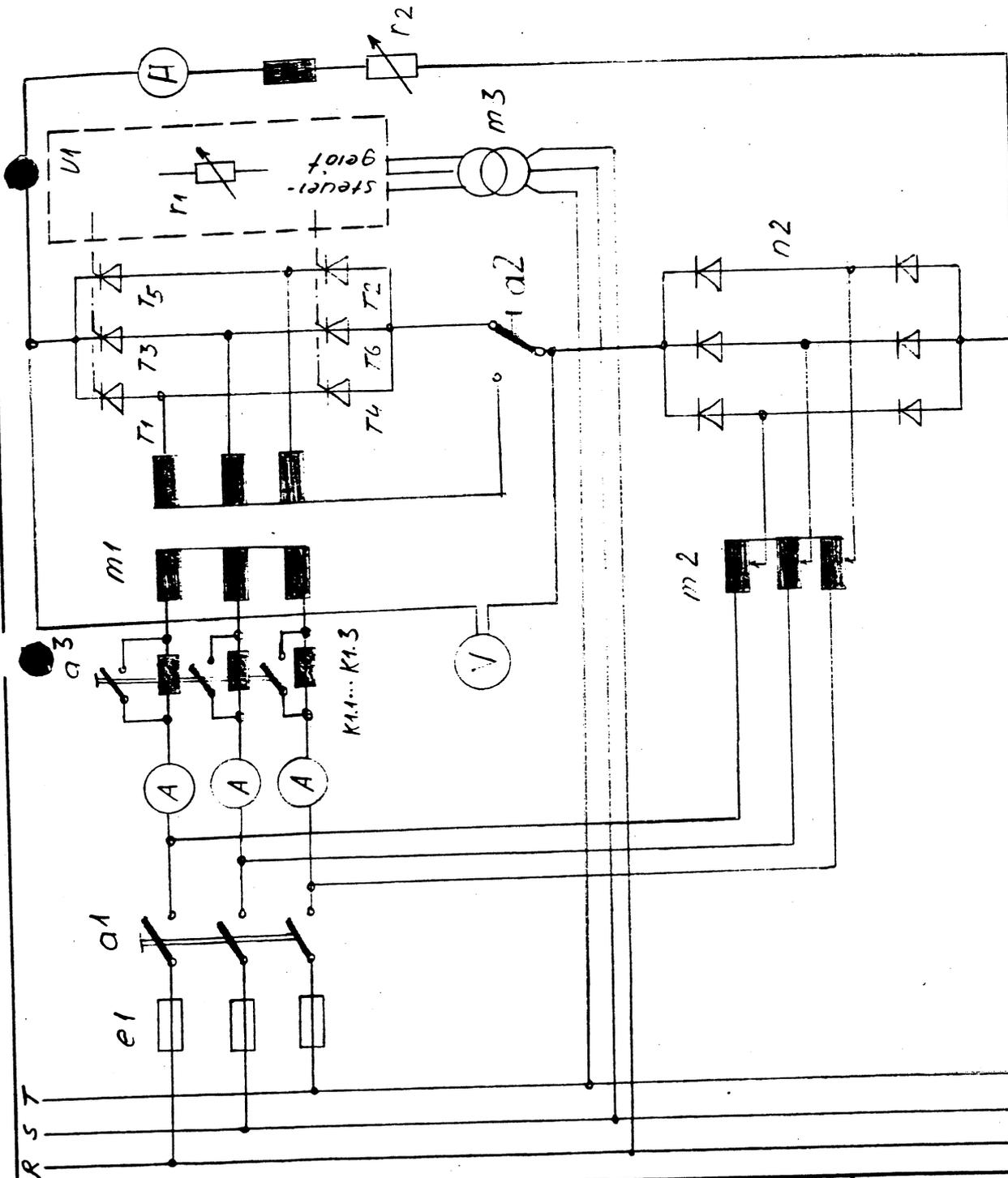
"Fangen" des gekippten Wechselrichters

Das Fangen des gekippten Wechselrichters ist in der Versuchsschaltung wegen des durch r2 auf unkritische Werte begrenzten Kurzschlußstromes I_k durch Vermindern des Steuerwinkels α auf Werte $\alpha < 150^\circ$ el. möglich.

Wenn der Steuerwinkel α soweit vermindert wurde, daß der Scheitelwert des Stromes im Kommutierungskreis (z. Bsp. zwischen T2 und T1 in Bild 4) größer wird als der Kurzschlußstrom-Momentanwert, dann wird der bis dahin stromführende Thyristor T1 gelöscht, der Wechselrichter arbeitet wieder normal.

In der Praxis wäre ein Fangen eines gekippten Wechselrichters auf diese Weise nicht möglich, da der Kurzschlußstrom unzulässig hohe Werte annehmen würde.

Bild 12: Versuchs- und Meßschaltung



3. Versuchsdurchführung

3.1 Der Versuch ist gemäß Schaltung Bild 12 aufzubauen.

3.2 Aufnahme der Steuerkennlinie $\frac{U_d(\alpha)}{U_d(0)} = f(\alpha)$ von $\alpha = 0^\circ$ bis α_{\max} .

Die Messung ist nur für die Drehstrom-Brückenschaltung B6 durchzuführen ($I_d = 5 \text{ A} = \text{const}$).

Wie groß ist der Grenzwinkel α_{\max} , wenn die Vordrosseln

- a) überbrückt
- b) eingeschaltet sind ?

3.3 Untersuchung der Wechselrichterkipfung bei der Drehstrom-Brückenschaltung

3.3.1 Auswirkung der Kippung auf der Gleichstromseite

Betreiben Sie den Wechselrichter an seiner Trittgrenze und leiten Sie die Kippung ein durch:

- a) Vergrößern von α über α_{\max} bei $I_d = 5 \text{ A}$
- b) Vergrößern des Gleichstromes I_d über 5 A hinaus bei $\alpha = \alpha_{\max}$
- c) Absenken der Netzspannung (simuliert durch Zuschaltuen der Vordrosseln) !

Oszillografieren Sie dabei vor und nach der Kippung (Speicheroszillograf im single-sweep-Betrieb):

Gleichstrom I_d und Gleichspannung U_d
Ventilstrom I_T und Ventilspannung U_T

3.3.2 Bestimmende Größen für den Kurzschlußstrom

Ermitteln Sie für die Drehstrom-Brückenschaltung aus dem Versuchsaufbau:

Treibende Gleichspannung bei Kippung
Treibende Wechselspannung bei Kippung
Gesamtwiderstand des Kurzschlußkreises (ohmsch)
Gesamtinduktivität des Kurzschlußkreises

3.3.3 Auswirkung der Kippung auf die Netzseite

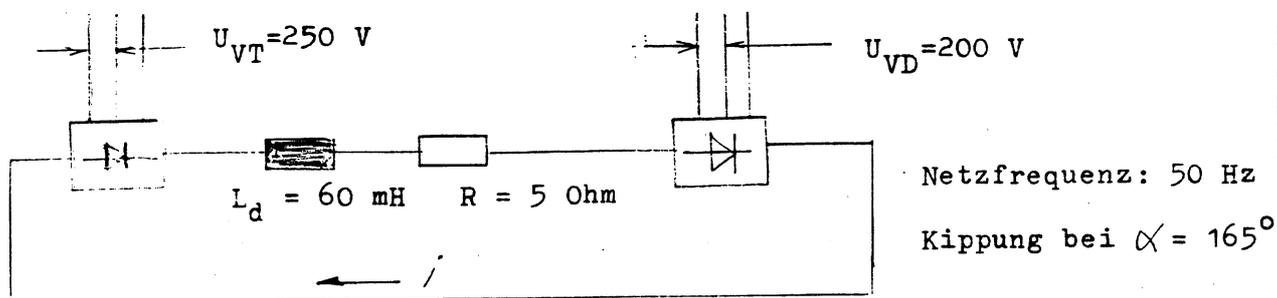
Die Ströme in den drei Netzzuleitungen des Stromrichtertransformators sind für die Schaltungen M3 und B6 vor und nach der Kippung zu messen !

4. Auswertung

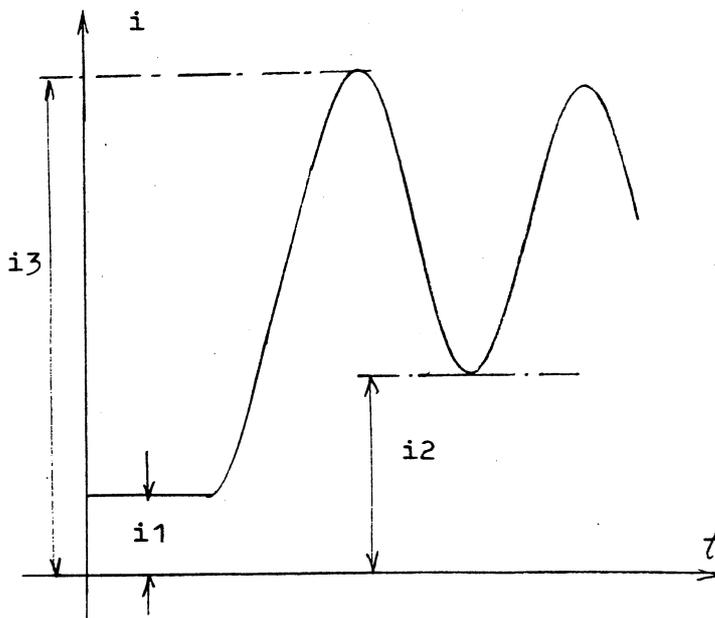
- 4.1 Diskutieren Sie die in 3.2 gemessenen Steuerkennlinien !
Bei welchem Steuerwinkel geht die Steuerkennlinie durch Null ?
(Begründung !)
- 4.2 Begründen Sie den Verlauf der in 3.3.1 oszillografierten Größen !
- 4.3 Berechnen Sie aus den in 3.3.2 ermittelten Größen den Verlauf des Kurzschlußstromes nach der Wechselrichterkipung und vergleichen Sie den so ermittelten Stromverlauf mit dem in 3.3.1 oszillografierten Verlauf !
Begründen Sie etwaige Abweichungen !
- 4.4 Begründen Sie die in 3.3.3 gemessenen unterschiedlichen Stromwerte in den Netzzuleitungen des Stromrichtertransformators bei den Schaltungen M3 und B6 und erläutern Sie den stark von der Sinusform abweichenden Verlauf dieser Ströme !

5. Ergänzung zur Versuchsanleitung (Versuchsvorbereitung !)

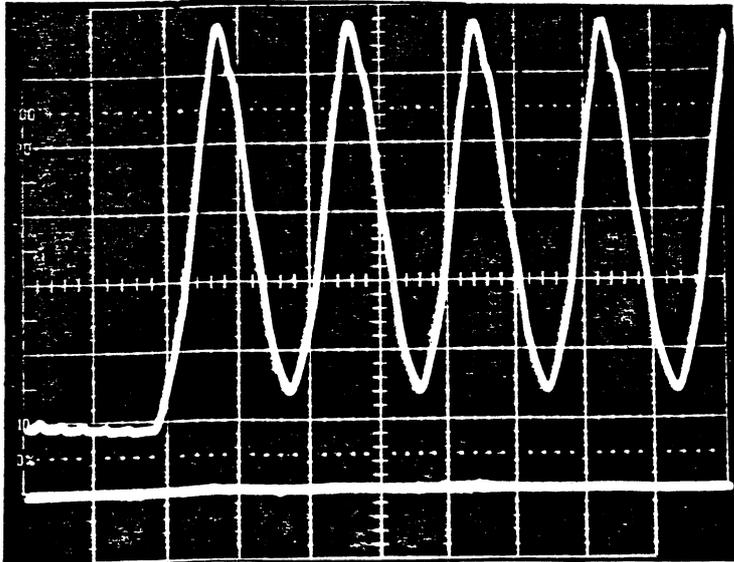
- a. Wie wirkt sich ein Zuschalten von Kommutierungsdrosselspulen auf den Grenzwinkel α_{max} aus, bei dem die Wechselrichterkipung einsetzt ?
- b. In dem Versuchsaufbau seien folgende Daten vorgegeben:



Ermitteln Sie die Werte i_1 , i_2 und i_3 für das nebenstehende Diagramm !



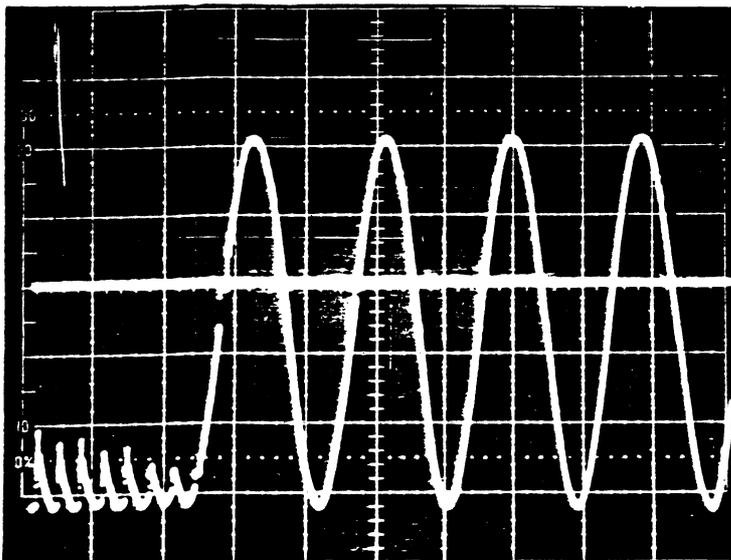
Oszillogramme zum Versuch WRK



1) Gleichstrom I_d bei Kippung des Wechselrichters

Zeitachse: ms / RE

Strom: A / RE

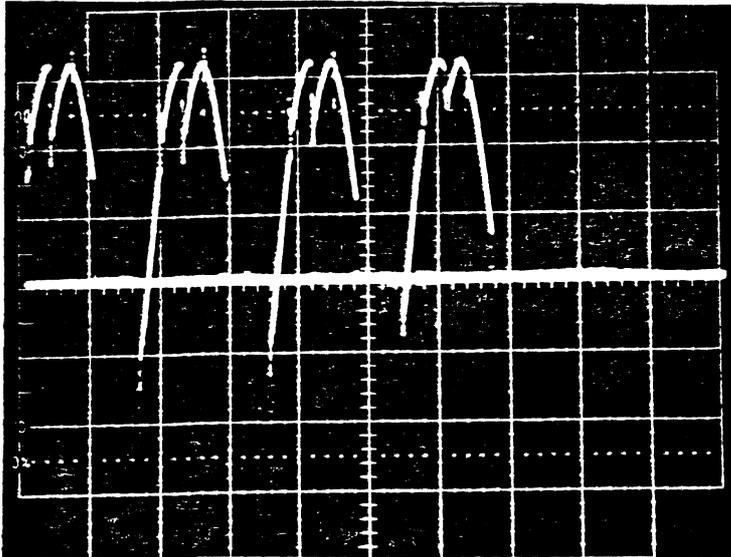


2) Gleichspannung U_d bei Kippung des Wechselrichters

Zeitachse: ms/ RE

Spannung: V/ RE

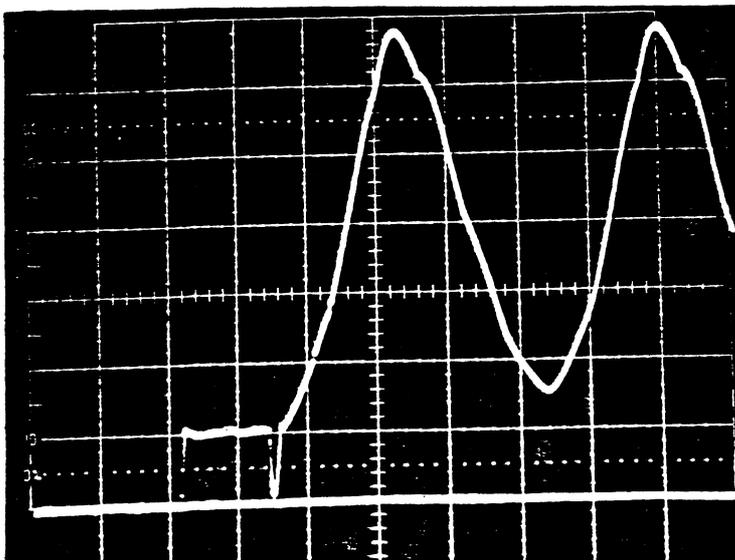
Oszillogramme zum Versuch WRK



3) Ventilspannung U_T bei Kippung des Wechselrichters

Zeitachse: ms / RE

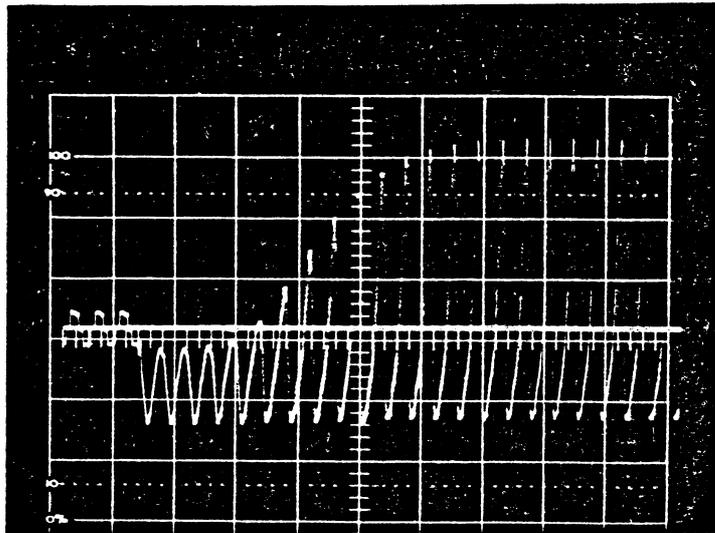
Spannung: V / RE



4) Ventilstrom bei Kippung des Wechselrichters

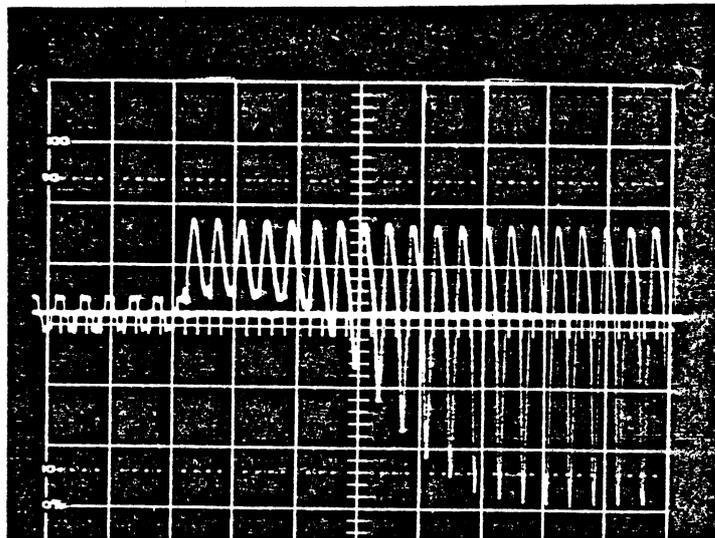
Zeitachse: ms / RE

Strom: A / RE



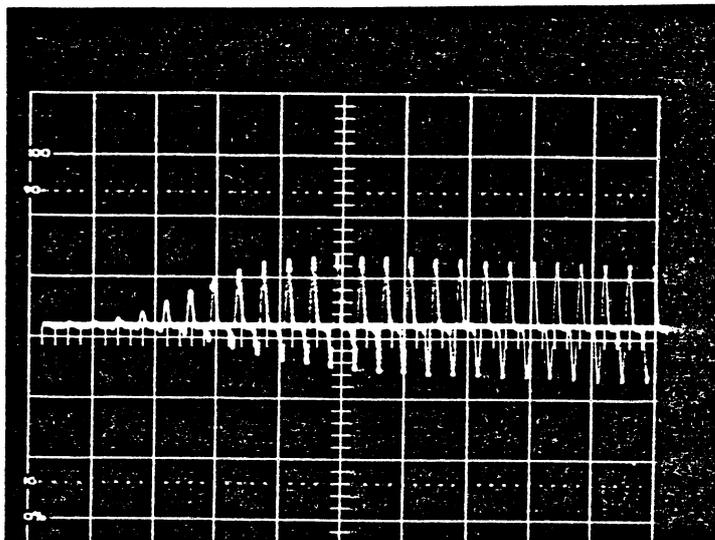
Strom in Zulei-
tung zu gestör-
ter Transforma-
torphase

(Fall 1)



Strom in Zulei-
tung zu gestör-
ter Transforma-
torphase

(Fall 2)



Strom in Zulei-
tung zu nicht
gestörter Trans-
formatorphase

Fall 3

6. Ergänzung zur Versuchsanleitung (Versuchsdurchführung)

- a. Der Versuch wird nur für die Drehstrom-Brückenschaltung durchgeführt !
- b. Zu Punkt 3.3.3 der Versuchsanleitung:

Oszillografieren Sie den Strom in einer der drei Zuleitungen des Transformators der Thyristor-Brückenschaltung vor und nach der Kippung (Digitalspeicher-Oszilloskop) und begründen Sie den gemessenen Verlauf !



1. Versuchsziel:

Untersuchung eines modernen, drehzahlgeregelten Drehstromantriebs im Betrieb unter Last von:

Stillstand (0 Hz) ----> Eckfrequenz (50 Hz) ----> Grenzfrequenz (70 Hz)

2. Verwendete Geräte:

1.1 Pulsumrichter, Typ AEG Microverter D 4,5/380 N:

Nennleistung = 4,5 kVA, $P_{\text{MOTOR}} = 3 \text{ kW}$

$U = D \text{ 380 V}$, $I = 12 \text{ A}$, $f = 2,5 - 110 \text{ Hz}$

1.2 Drehstrommotor:

$P = 7,5 / 2,5 \text{ kW}$

$660 / 380 \text{ V} - 9,8 / 18,2 \text{ A}$, geschaltet 380 V Y , --->

$P = 4,5 \text{ kW}$, $U = 380 \text{ V}$, $I = 9,8 \text{ A}$

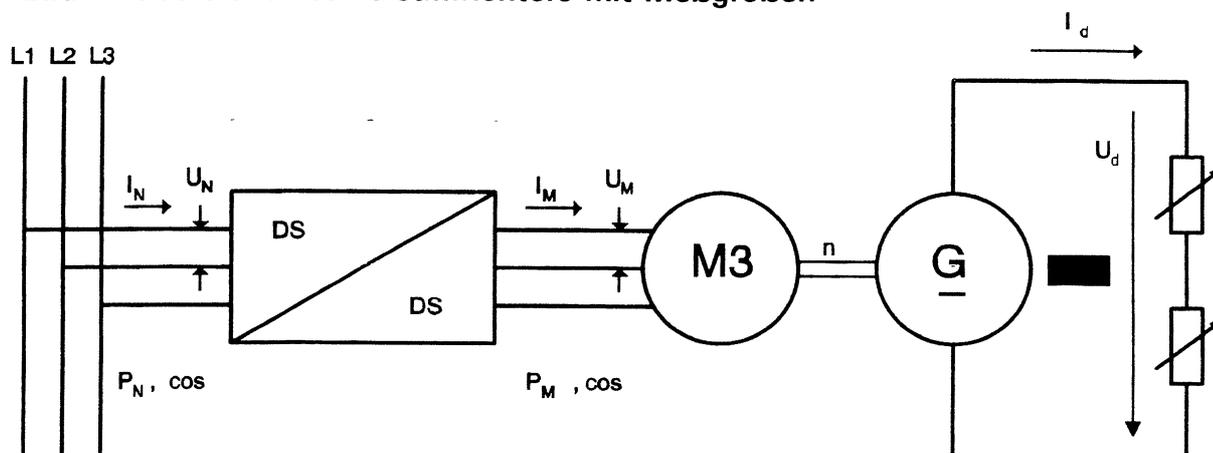
1.3 Gleichstrom-Bremsgenerator :

$P = 7,5 \text{ kW}$, $I_A = 36 \text{ A}$, $U_A = 220 \text{ V}$, $I_E = 1,67 \text{ A}$, $U_E = 310 \text{ V}$

3. Beschreibung des Pulsumrichters

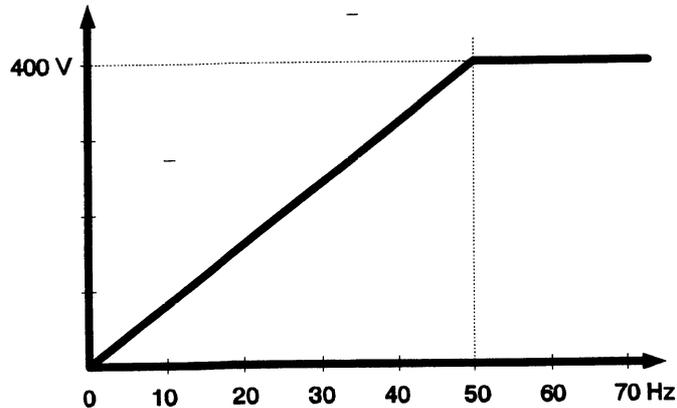
Der verwendete Pulsumrichter Microverter D arbeitet nach dem Prinzip der asynchronen, sinuswerteten Pulsweitenmodulation ($\text{PWM}_{\text{SIN, ASYNCHRON}}$). Asynchron bedeutet hier, daß zwischen der Pulsfrequenz f_p und der Frequenz f_0 der Spannungsgrundwelle kein festes Verhältnis besteht. Bei diesem Betrieb soll das Verhältnis f_p/f_0 stets > 10 sein, um niederfrequente Schwebungen in der Ausgangsspannung zu vermeiden, die sich sonst störend auf das Motormoment auswirken könnten. Mit $f_{\text{PMIN}} = 2,9 \text{ kHz}$ und $f_{\text{OMAX}} = 70 \text{ Hz}$ wird diese Forderung hier eingehalten. Der Leistungsteil des Microverter D ist mit IGBT- Bauelementen bestückt. Durch Wahl einer hohen Pulsfrequenz f_p erreicht man einen oberwellenarmen Motorstrom, muß aber andererseits höhere Schaltverluste in den IGBTs in Kauf nehmen und ggf. die Motorbelastung entsprechend reduzieren. Bei einer niedrigen Schaltfrequenz f_p sinken die Schaltverluste, andererseits steigt hierbei der Oberwellengehalt des Motorstromes.

Bild 1: Übersicht des Pulsumrichters mit Meßgrößen



4: Messungen am Pulsumrichter

4.1 Aufnahme der Kennlinien $U_M = f(f)$



a.: Bereich $f = 0 \rightarrow 50$ Hz
mit $I_d = 20$ A = const.
($M_{Last} = \text{const.}$)

b.: Bereich $f = 50 \rightarrow 70$ Hz
mit $I_M = 7$ A = const.
($P_{Motor} = \text{const.}$)

Messen Sie in Abhängigkeit von der Frequenz:

Bremsgenerator: Ankerstrom I_d und Ankerspannung U_d .

Drehstrommotor: Motorstrom I_M , Außenleiterspannung U_M , aufgenommene Motorleistung P_M , Leistungsfaktor $\cos \varphi_M$ und Drehzahl n .

Versorgungsnetz: Netzstrom I_N , Leistung P_N und Leistungsfaktor $\cos \varphi_N$.

Stellen Sie folgende Abhängigkeiten grafisch dar:

$$U_M = f(f), \quad U_M/f = f(f) \quad \text{und} \quad n = f(f).$$

4.2 Aufnahme der Kennlinien $n = f(\text{Last})$ bei 30/50/70Hz

Belastung: Bei 30 und 50 Hz mit $I_d = 20/10/0$ A,

bei 70 Hz mit den bei 50Hz ermittelten Motorströmen.

4.3 Messungen mit dem Oszilloskop:

Oszillografieren Sie für die Frequenzen $f_0 = 30, 50$ und 70 Hz
und die Taktfrequenzen $f_p = 2,9$ und $11,8$ kHz:

Drehstrommotor: Außenleiterspannung U_M und Motorstrom I_M (Verlauf und Linienspektrum)

Netz: Zuleitungsstrom (Verlauf und Linienspektrum bzw. Oberwellengehalt mit dem Netzdatenanalysator NDA).

Messprotokoll 1, zur Aufnahme der Kennlinien $U_n = f(f)$

Frequenz f (Hz)	Last = GS-Gen.		Motor = DSU-Ausgang							Netz = DSU-Eingang					
	I _d (A)	U _d (V)	I _{Mot} (A)	U _{Mot} (V, Grw)	U _{Mot} (V, eff)	P _{Mot} (W)	Q _{Mot} (VA)	cos φ _M	U _{Tacho} (V)	I _{Netz} (A, Grw)	I _{Netz} (A, eff)	U _{Netz} (V)	P _{Netz} (W)	Q _{Netz} (VA)	cos φ _N
15															
20	20														
30	20														
40	20														
50	20														
60															
70															

Die Meßwerte für cos φ sind aus den jeweiligen Werten für P und Q zu ermitteln und mit den Direktanzeigen der digitalen Vielfachinstrumente zu vergleichen !

Menübedienung zur Ermittlung der Fast Fourier-Transformation von einem Signal mit dem Philips Oszilloskop PM 3320A

Das periodische Signal ist mit einigen Perioden auf dem Bildschirm dargestellt.

- Taste "COUPLING" drücken und DC wählen
- Menütaste "HORIZONTAL MODE" drücken
- "SING.ARMD" drücken (Signal wird in Register R0 gespeichert)
- Menütaste "CURSOR/ANALYSE" drücken
- Im Menü "CURSORS SELECT" die Curser einschalten
- "MATHEMATICS" drücken
- "MORE" drücken
- "F.F.T" drücken
- Fourier-Transformation über "START STOP" starten und wieder STOP aktivieren.
- Menütaste "MAGNIFY" drücken
- Über "EXPAND" im Menü "MAGNIFY" die Auflösung wählen

Drucken des Bildschirminhaltes

Das Oszilloskop PM 3320A ist über eine serielle Schnittstelle RS232 mit dem Drucker brother M-1209 verbunden.

Grundeinstellung des PM3320A:

- Über Menütaste "Display" Option Interface RS232 einstellen
- Über "FRAME" 2 Stop Bit, 8 Daten Bit, No Parität wählen.
- Über "Output Speed" Baudrate 4K8 einstellen
- Über "Input Speed" Baudrate 1k2 einstellen
- Über "Printers" Drucker FX 80 wählen
- Über "Plot Print" Print wählen

Drucken des am Bildschirm gespeicherten Signals:

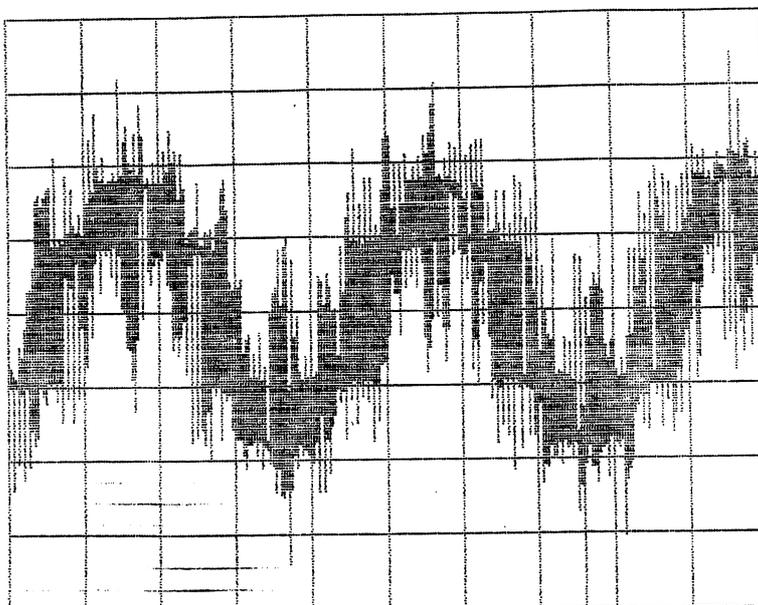
- Menütaste "DISPLAY" drücken und im Menü "Full" wählen
- Im Menü "DISPLAY FULL TEXT" R0 wählen
- "Return" drücken
- "POS R0" wählen
- "Plot" drücken
- "Digital" drücken

Der Drucker beginnt nach ca. 30s ^{bis 3 min} zu drucken. Soll der Druckvorgang unterbrochen werden, kann im Menü "Stop" gedrückt werden

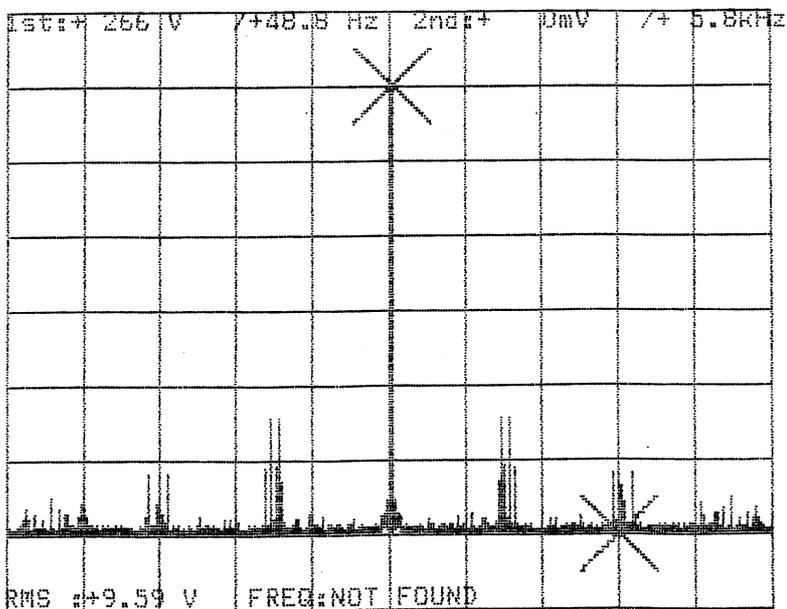
- Menü "HORIZONTAL MODE" wählen
- "Recurrent" drücken (Das Eingangssignal wird wieder gemessen)

Motorspannung (Strang - Zeitlicher Verlauf und Spektrum)

Parameter: Pulsfrequenz $f_p = 2,9 \text{ kHz}$ Grundfrequenz $f_0 = 50 \text{ Hz}$
 Motorstrom $I_M = 7 \text{ A}$



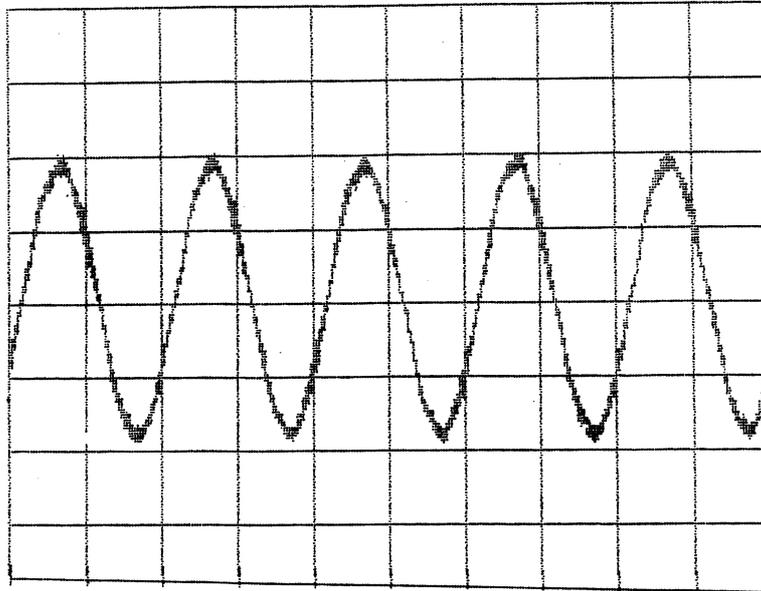
REGO A: 200 V B: 500mV 0mV T: 5ms SNG AUTO 92-04-08
 D: + ODIV / B 15:01:38



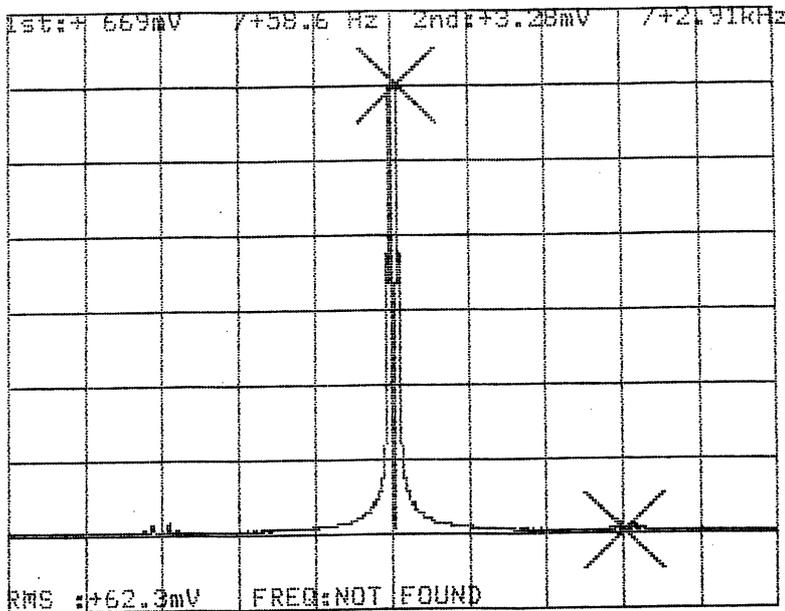
REG1 is result of FOURIER TRANSFORM function. 92-04-08
 VER: +44.4 V HOR: +1.95kHz 14:37:52

Motorstrom (Zeitlicher Verlauf und Spektrum)

Parameter: Pulsfrequenz $f_p = 2,9 \text{ kHz}$ Grundfrequenz $f_0 = 50 \text{ Hz}$
 Motorstrom $I_M = 7 \text{ A}$



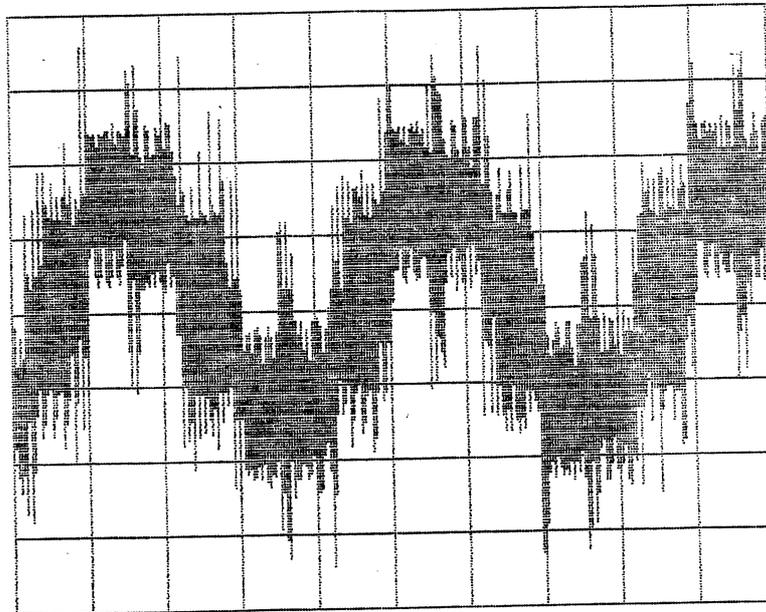
REG0 A: 500 V + 0mV I: 10ms SNG AUTO 92-04-08
 B: 500mV + 0mV D:- 1DIV / B 14:28:35



REG1 is result of FOURIER TRANSFORM function. 92-04-08
 VER: + 112mV HOR: + 977 Hz 14:23:41

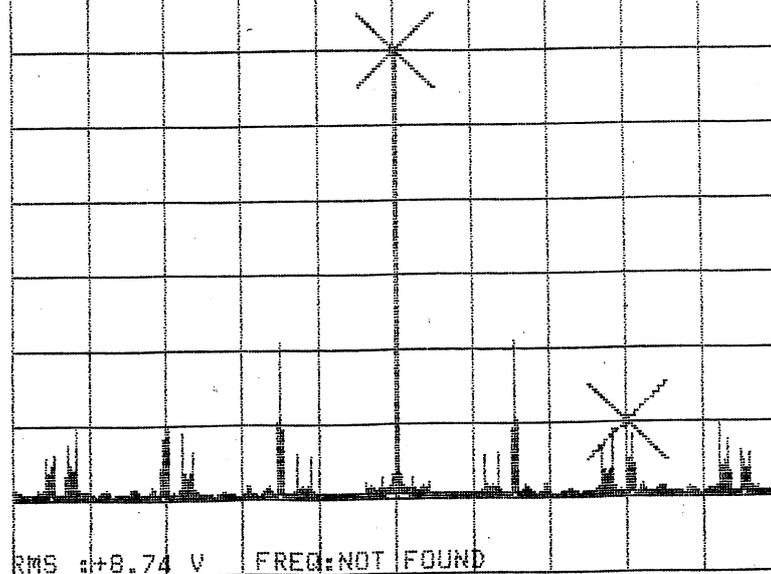
Motorspannung (Strang - Zeitlicher Verlauf und Spektrum)

Parameter: Pulsfrequenz $f_p = 11,7 \text{ kHz}$ Grundfrequenz $f_0 = 50 \text{ Hz}$
 Motorstrom $I_M = 7 \text{ A}$



REG0 A: 200 V + 0mV T: 5ms SNG AUTO 92-04-09
 B: 500mV D:++ ODIV / B 07:51:42

1st: +229 V 7+58.6 Hz 2nd: +38.5 V /+28.3kHz

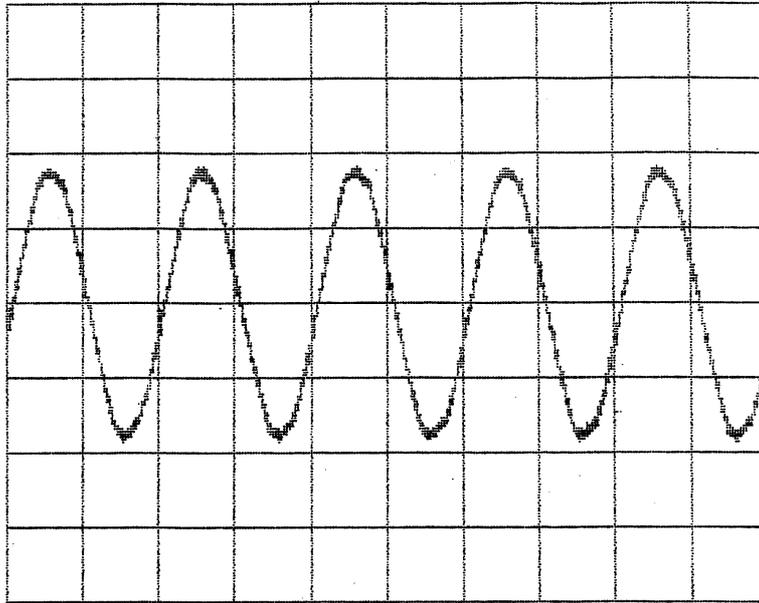


RMS :+8.74 V FREQ:NOT FOUND

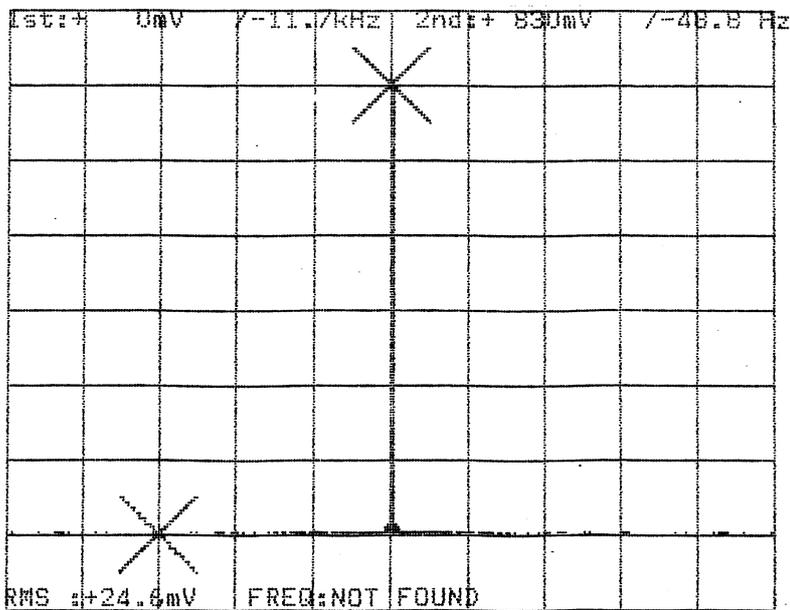
REG1 is result of FOURIER TRANSFORM function. 92-04-09
 VER: +38.2 V HOR: +7.81kHz 07:37:52

Motorstrom (Zeitlicher Verlauf und Spektrum)

Parameter: Pulsfrequenz $f_p = 11,7\text{kHz}$ Grundfrequenz $f_0 = 50\text{ Hz}$
 Motorstrom $I_M = 7\text{ A}$



REG0 A: 500 V + 0mV T: 10ms SNG AUTO 92-04-08
 B: 500mV D: + 0DIV / B 15:09:19

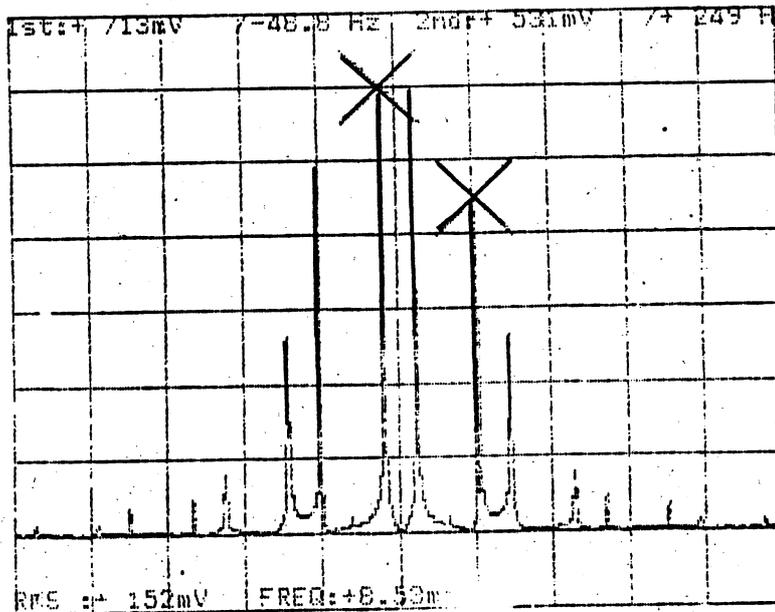
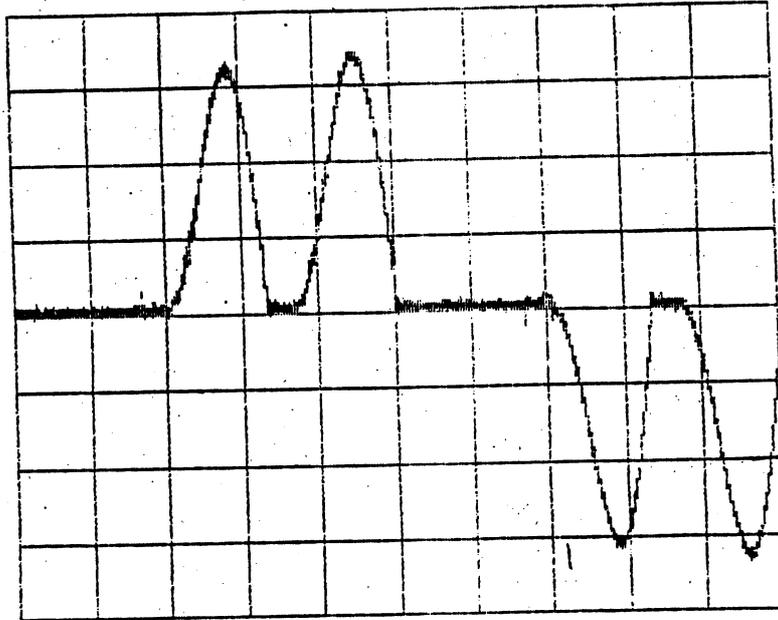


REG1 is result of FOURIER TRANSFORM function. 92-04-08
 VER: + 139mV HOR: + 3.91kHz 15:09:19

Netzstrom (Zeitlicher Verlauf und Spektrum)

Parameter: Pulsfrequenz $f_p = 2,9 \text{ kHz}$
Motorstrom $I_M = 7 \text{ A}$

Grundfrequenz $f_0 = 50 \text{ Hz}$



.REQ1 is result of FOURIER
VER: + 119mV

NSFORM function.92-04-02
244 Hz 09:17:02

Fachhochschule Darmstadt	Labor Leistungselektronik	Fachbereich Elektrotechnik
Wi-/So-Semester	Digitalisierter, mikroprozessorgesteuerter Umkehrstromrichter	Gruppe:
Name: Semester:	Labor-Klausur am:	Versuchsteilnahme bestätigt:

Untersuchungen an einem Umkehrstromrichter unter Verwendung des digitalisierten, mikroprozessorgesteuerten Stromrichtergerätes MINISEMI D von AEG.

1. Versuchsgrundlagen

Literatur: Heumann, K.; Grundlagen der Leistungselektronik, Teubner Studienbücher.

Langhoff, J., Raatz, E.; Geregelte Gleichstromantriebe, AEG-Telefunken-Handbuch Band 19.

Ickstadt, A.; Vorlesungsumdruck "Leistungselektronik"

1.1 Einführung

Stromrichter wandeln ein Wechsel- bzw. Drehstromnetz mit konstanter Spannung und Frequenz in ein Gleichspannungsnetz mit veränderbarer Spannung um (siehe Bild 1.1). Der wichtigste Anwendungsbereich liegt in der Regelung von Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen.

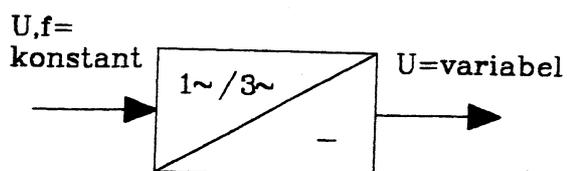


Bild 1.1: Blockschaltbild Stromrichter

Umkehrstromrichter bestehen aus einer Parallelschaltung zweier einfacher Stromrichter mit entgegengesetzter Ventilrichtung. Da jeder der beiden gegenparallel geschalteten Stromrichter wechselweise in den Gleich- und Wechselrichterbetrieb gesteuert werden kann, ist Spannungsumkehr wie bei einem einfachen Stromrichter möglich. Außerdem kann der Strom auf der Gleichstromseite seine Richtung ändern, da für jede Stromrichtung ein eigener Stromrichter vorhanden ist (siehe Bild 1.2). Dadurch ist es möglich, Gleichstrommotoren ohne Betätigung mechanischer Ankerschalter in beiden Drehrichtungen zu betreiben sowie elektrisches Bremsen mit Energierücklieferung in das Drehstromnetz durchzuführen.

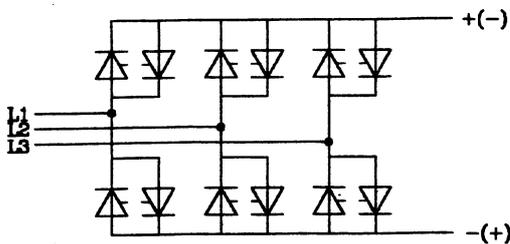


Bild 1.2: Vollgesteuerte
Drehstrombrücke in
Gegenparallelschaltung

Alle Möglichkeiten der Kombination von Drehzahl und Drehmoment zeigt das nachstehende Drehzahl-/Drehmomentdiagramm.

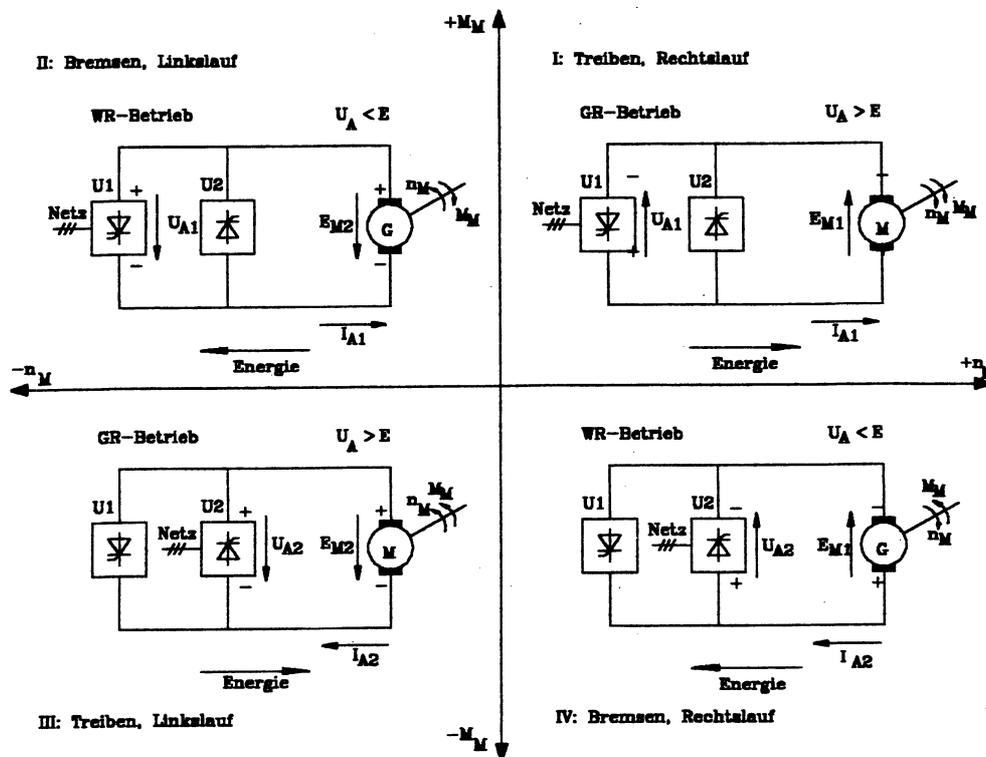


Bild 1.3:: Drehzahl-/Drehmomentdiagramm

Im I. und III. Quadranten nimmt die Maschine Energie aus dem speisenden Netz auf und formt sie in mechanische Energie um. Diese Betriebsart wird Gleichrichterbetrieb genannt. In den Quadranten II. und IV. kehrt sich die Energieflußrichtung um. Die in der Arbeitsmaschine vorhandene mechanische Energie wird in der elektrischen Maschine in elektrische Energie umgewandelt, die entweder in das Netz zurückgespeist wird (Nutzbremsung) oder in Widerständen in Wärme umgesetzt wird. Diese Betriebsart wird Wechselrichterbetrieb genannt.

Bei elektrischen Antrieben ist die Energieflußrichtung gleichbedeutend mit der Stromflußrichtung. Bei unterschiedlichen Energieflußrichtungen muß demnach das Stromrichtergerät für den Motor für zwei Stromrichtungen vorgesehen sein.

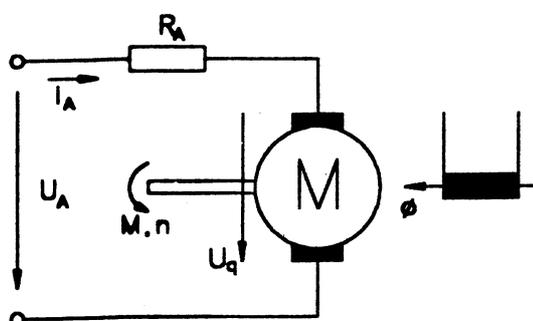
Innerhalb der Vierquadrantenstromrichter gibt es zwei Gruppen von Schaltungen:

- kreisstromfreie Schaltungen
- kreisstrombehaftete Schaltungen

Bei der kreisstromfreien Schaltung entsteht beim Wechsel der Drehmomentrichtung eine Umschaltpause, um einen Kurzschluß zwischen den beiden Stromrichtern zu vermeiden. Während dieser stromlosen Pause, die einige Millisekunden dauert, kann die Maschine kein Drehmoment aufbringen. Eine Umschaltautomatik sorgt dafür, daß der Stromrichter II erst zugeschaltet wird, wenn die Freiwerdezeit der Thyristoren des Stromrichters I abgelaufen ist.

Kreisstrombehaftete Schaltungen ermöglichen einen pausenfreien Drehmomentwechsel und somit eine schnellstmögliche Momentenumkehr. Da hierbei beide Stromrichter gleichzeitig angesteuert werden, entsteht aufgrund der unterschiedlichen Gleichspannungsmomentanwerte ein interner Kreisstrom zwischen beiden Stromrichtern, der durch Kreisstromdrosseln begrenzt werden muß. Desweiteren sind in dieser Schaltungsart galvanisch getrennte Einspeisungen notwendig. Anwendung findet diese Schaltung vorwiegend dort, wo Antriebe stationär um das Drehmoment = Null arbeiten müssen.

1.2 Grundgleichungen der Gleichstrommaschine



Gleichungen:

$$1. M = c_2 * \phi * I_A$$

$$2. U_q = c_1 * \phi * n$$

$$3. U_A = U_q + I_A * R_A \quad (\text{Motor})$$

$$4. U_A = U_q - I_A * R_A \quad (\text{Generator})$$

Bild 1.4: Ersatzschaltbild im stationären Betrieb

Fachhochschule Darmstadt	Labor: Leistungselektronik Digitalisierter, mikroprozessorgesteuerter Umkehrstromrichter	Fachbereich Elektrotechnik
-----------------------------	--	-------------------------------

Zu 1.: Bei konstanter Erregung Φ ist ein Bremsen oder eine Drehrichtungsumkehr nur durch Umkehrung des Ankerstromes möglich. Dies wird erreicht, indem ein zweiter Stromrichter zum ersten antiparallel geschaltet wird.

Zu 2.: Die Drehzahl ist unter Vernachlässigung des inneren Spannungsabfalls $I_A \cdot R_A$ proportional zur Ankerspannung U . Die Drehrichtung ist demzufolge im stationären Betrieb proportional dem Vorzeichen der Ankerspannung U .

1.3 Digitale Antriebsregelung

Bei digitalen Antriebsgeräten werden alle Funktionen für die Regelung, Steuerung und Diagnose in einem digitalen Antriebsregelgerät abgelegt. Die Realisierung der Funktion übernimmt dabei ein Mikroprozessor. Die Antriebsregelgeräte besitzen ein digitales Interface zu einem überlagerten Leit- oder Steuersystem sowie eine konventionelle Schnittstelle für analoge und binäre Ein- und Ausgänge. Die Anwendungen werden durch Software gelöst und von dem gleichen Mikroprozessor ausgeführt, der auch die Standard-Funktionen bearbeitet. Die Ansteuerung der Schütze und der Hilfbetriebe wird von dem Antriebsregelgerät direkt übernommen, wodurch im Vergleich zur analogen Technik Hardwarekomponenten eingespart werden können.

Der Einsatz von Mikroprozessoren bei digitalen Antriebsregelgeräten ermöglicht, unter anderem, eine verbesserte Diagnosemöglichkeit, da z.B. Fehlermeldungen unmittelbar chronologisch gespeichert werden können und somit die Fehlererkennung und die Beseitigung der Störung erleichtert werden.

Die Reglerstruktur des Regelkreises besteht aus einem Drehzahlregler mit PI-Verhalten und einem unterlagerten Ankerstromregler mit PI-P-Verhalten und sind durch Algorithmen in Form eines Software-Programmes realisiert.

Bei dem im Stromrichtergerät MINISEMI D verwendeten Prozessor handelt es sich um den Micrcontroller 8097BH von Intel zu dessen Leistungsumfang unter anderem eine 16-Bit CPU, acht 10-Bit A/D-Wandler, zwei 16-Bit Timer und ein pulswertenmodulierter Ausgang gehören.

2. Versuchsbeschreibung

2.1 Versuchsaufbau

Der zu diesem Versuch verwendete Aufbau ist auf Seite 6 und die dazugehörigen elektrischen und mechanischen Daten bzw. Nennwerte sind auf Seite 7 aufgeführt.

Prof., Dipl.-Ing. A. Ickstadt	Mai 1991	USR - Seite 4
----------------------------------	----------	---------------

Fachhochschule Darmstadt	Labor: Leistungselektronik Digitalisierter, mikroprozessorgesteuerter Umkehrstromrichter	Fachbereich Elektrotechnik
-----------------------------	--	-------------------------------

2.2 Belastung, Sollwertvorgabe

Zur Nachbildung der Arbeitsmaschine dient ein fremderregter Gleichstrommotor, der über einen veränderlichen Belastungswiderstand belastet wird.

Die Sollwertvorgabe des Ankerstromes erfolgt über das Potentiometer I_{ASoll} oder anlegen von 0 - 10 V Gleichspannung an den Analog-Eingang.

Folgende Sollwertvorgaben der Drehzahl sind möglich:

- a) stetig über das Potentiometer n_{Soll}
- b) Sollwertsprung über Schalter "Sollwert-Freigabe"

$+n$	-->	0
$-n$	-->	0
$+n$	-->	$-n$
- c) Sollwertsprung als Rechteck über Schalter "Re/Li":

$+n$	<->	$-n$
------	-----	------

2.3 Laden eines Parametersatzes vom PC in das Stromrichtergerät

Da das Verändern von Regelparametern einzig durch das Verändern Bitmustern innerhalb der Software des Microcontrollers geschieht und die Eingabe der zu ändernden Regelparameter nicht ohne grundlegendes Wissen über die PC-Handhabungssoftware zu realisieren ist, wurden Datensätze angelegt, welche die benötigten Abweichungen von der Standard-Datei beinhalten und bei Bedarf in den Mikrorechner des Stromrichtergerätes geladen werden können.

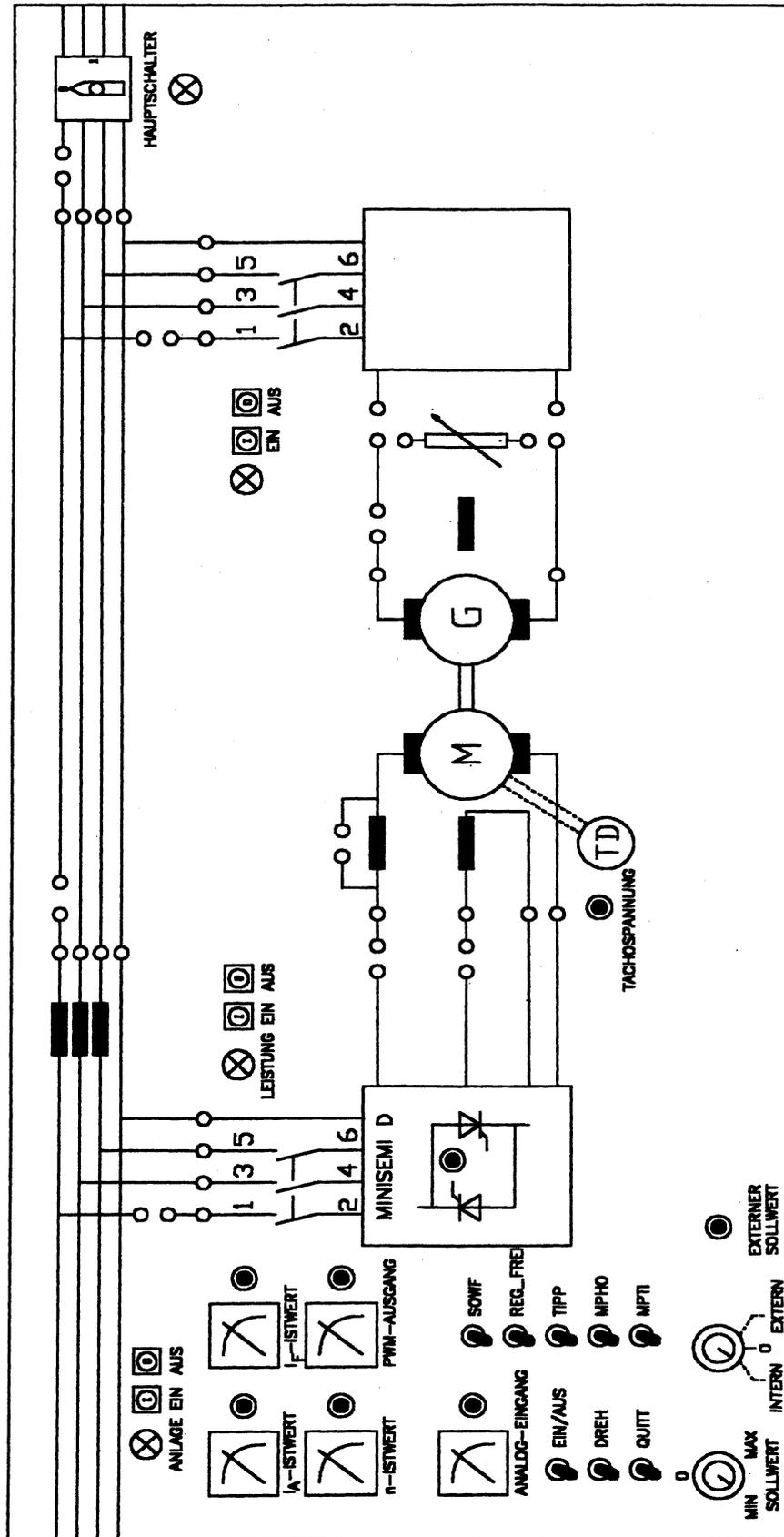
Die jeweils benötigten Parametersätze werden mit einem Laptop in das Stromrichtergerät übertragen. Die oben angesprochenen Dateien sowie das Benutzerprogramm finden Sie unter folgendem Pfad auf Laufwerk D:

D:\DAT*.DAT

Das Laden eines Parametersatzes ist nur im ONLINE-Betrieb, d.h. bei bestehender Verbindung zwischen PC und eingeschaltetem Stromrichter, durchführbar und geht folgendermaßen vor sich:

- Eingabe des Befehls "IMRA96" und mit der ENTER-Taste ausführen.
- Drücken einer beliebigen Taste, um in das Menue der IMRA96-PC-Handhabungssoftware zu gelangen.
- Durch Drücken der Funktionstaste "F1" gelangen Sie in die erste dem Benutzer zugängliche Funktionsebene.
- Durch Drücken der Funktionstaste "F6" leiten Sie den Übertragungsvorgang ein und werden aufgefordert, den von Ihnengewünschten Dateinamen einzugeben. (Laufwerk\Pfad\Programmname.Dat)
- Durch Drücken der ENTER-Taste wird der Ladevorgang ausgeführt.

Meßtafel: Digitalisierter, mikroprozessorgesteuerter USR



Elektrische und mechanische Daten bzw. Nennwerte

Stromrichtergerät

Typ : Minisemi-D 380/40/+ GO

Leistungsteil

Nennanschlußspannung : 3 AC 380 V

Motoranschlußspannung : 400 V

Elektronik

Nennanschlußspannung : 3 AC 380 V

Erregung

Nennanschlußspannung : 2 AC 380 V

Netzfrequenz : 48-62 Hz

Glättungsdrossel

Spulenwiderstand : 0,06 Ohm

Spuleninduktivität : 11,8 mH

Kommutierungsdrossel

Spulenwiderstand : 0,9 Ohm

Spuleninduktivität : 1,57 mH

Gleichstrommotor

Nennleistung : 6,0 kW

Nennspannung : 346 V

Nennstrom : 22,1 A

Nennerreggerstrom : 2,39 A bei 310 V

Nenndrehzahl : 1000 1/min

Ankerwiderstand : ___ Ohm

Ankerinduktivität : ___ mH

Nenndrehmoment : 84,1 Nm

Bremsgenerator

: 6,0 kW

: 220 V

: 35,8 A

: 1,67 A bei 310 V

: 1000. 1/min

: ___ Ohm

: ___ mH

: 84,1 Nm

Fachhochschule Darmstadt	Labor: Leistungselektronik Digitalisierter, mikroprozessorgesteuerter Umkehrstromrichter	Fachbereich Elektrotechnik
-----------------------------	--	-------------------------------

3. Versuchsbeschreibung

3.1. Aufnahme der Drehzahl-Spannungs-Kennlinie $n = f(U)$.

bei $I_d = 10 \text{ A}$, Ankerstromsollwert $> 10 \text{ A}$, einstellbar mit Potentiometer I_{ASoll} .
Die gemessene Abhängigkeit soll während des Versuchs dargestellt werden.

3.2. Antriebsart: Treiben und Bremsen

a) Geben Sie bei unbelasteter sowie belasteter Maschine folgende Drehzahl-Sollwert-sprünge vor und oszillografieren Sie dabei den Strom I_d und die Drehzahl n (über Tachospaltung) als Funktion der Zeit:

$$n = 0 \quad \rightarrow n = + n_{max}$$

$$n = + n_{max} \quad \rightarrow n = 0$$

b) Ermitteln Sie aus den aufgenommenen Oszillogrammen für folgende Fälle die Brems- und Beschleunigungszeit:

- Maschine unbelastet, ($I_{Soll} = 5 \text{ und } 10 \text{ A}$)
- Maschine belastet mit 8 A bei n_{max} , ($I_{Soll} = 10 \text{ A}$)

3.3. Antriebsart: Umkehrbetrieb (Reversieren)

a) Oszillografieren Sie den Ankerstrom I_d und die Drehzahl n als Funktion der Zeit. Geben Sie dabei sowohl für den unbelasteten als auch den belasteten Betrieb folgende Sollwertsprünge vor:

$$- n_{max} \quad \rightarrow + n_{max}$$

b) Ermitteln Sie aus den aufgenommenen Oszillogrammen für folgende Fälle die Brems- und Beschleunigungszeit:

- Maschine unbelastet, ($I_{Soll} = 5 \text{ und } 10 \text{ A}$)
- Maschine belastet mit 8 A bei n_{max} , ($I_{Soll} = 10 \text{ A}$)

3.4. Darstellung des Vier-Quadranten-Betriebes

Stellen Sie auf dem Digital- Speicher-Oszilloskop (DSO) in der Betriebsart XY - Darstellung den Vier-Quadranten-Betrieb (Drehzahl bzw. Tachospaltung als Funktion des Ankerstromes) für die folgenden Sollwertsprünge dar:

- $n = 0 \quad \rightarrow n = +n_{max}$ (Treiben)
- $n = +n_{max} \quad \rightarrow n = 0$ (Bremsen)
- $n = +n_{max} \quad \rightarrow n = -n_{max}$ (Reversieren)

Die Maschine wird hierbei mit $I_{SOLL} = 10 \text{ A}$ betrieben und so belastet, daß sie bei n_{max} einen Strom von 8 A aufnimmt.

4. Aufnahme der tatsächlichen Steuerkennlinie $U_d/U_{d0} = f(\alpha)$

Durch stetiges Verändern des Sollwertes ist die normierte Kennlinie U_d/U_{d0} als Funktion des Steuerwinkels aufzunehmen. Die Schrittweite der Messungen kann durch den normierten Drehzahl-Istwert U_T (n-Istwert) vorgegeben werden. Der Spannung von 10 V entspricht hierbei die maximale Drehzahl.

Das Ablesen des Voreilwinkels β in %, bezogen auf 180° el, kann sowohl am Stromrichtergerät als auch am PC erfolgen.

Der Menüpfad ist: REGELUNG --> IAREGLER --> IA_PULS --> BETA.

Meßprotokoll für die Kennlinie $n = f(\alpha)$ im 1. und 3. Quadranten

+ Ud	350 V	300 V	250 V	200 V	150 V	100 V	50 V	0 V
U_{Tacho}								
β								
- Ud	350 V	300 V	250 V	200 V	150 V	100 V	50 V	0 V
U_{Tacho}								
β								

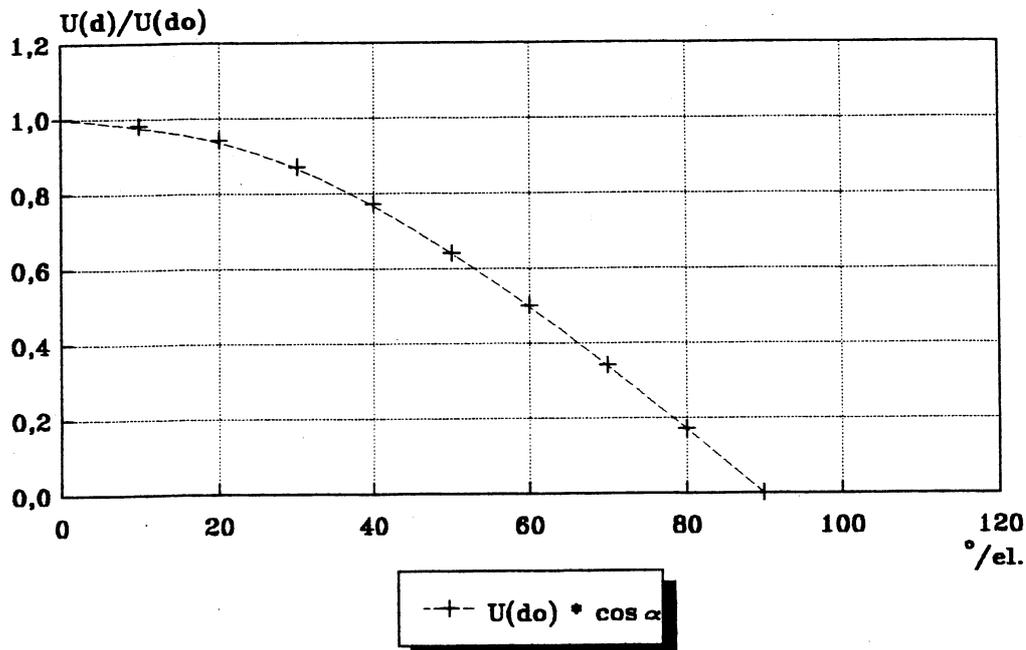
5. Wichtige Anmerkung

Der Gleichstrom I_d wird normalerweise als Strom-Istwert vor dem Stromregler erfasst und von da potentialfrei auf den PWM-Ausgang gelegt. Dort steht er für die Darstellung des Ankerstromes am Digital-Speicher-Oszilloskop zur Verfügung.

Die Darstellung der Drehzahl erfolgt über die Tachospannung.

Sollte der Ankerstrom nicht am PWM-Ausgang, sondern direkt an einem Shunt abgegriffen werden, sind sämtliche Messungen, die mit dem DSO durchgeführt werden, zuerst über ein Power-Scope zu führen, welches potentialfreie Eingänge besitzt, damit nicht Potentiale des Leistungsteils auf die Elektronikmasse gelangen können, was zur Zerstörung des Stromrichters führen würde.

STEUERKENNLINIE



6. Ausarbeitung

zu 3.1.a und 3.2.a

Diskutieren Sie den Verlauf der gemessenen Abhängigkeiten.

zu 3.1.b

Ergänzen Sie die beliebigen Oszillogramme und diskutieren Sie diese in Bezug auf die unterschiedlichen Belastungen.

zu 3.1.c und 3.2.c

Vergleichen Sie die unter verschiedenen Randbedingungen ermittelten Beschleunigungs- und Bremszeiten und begründen Sie die auftretenden Unterschiede.

zu 3.2.b

Ergänzen Sie die beliebigen Oszillogramme und diskutieren Sie diese in Bezug auf die unterschiedlichen Stromsollwerte.

zu 3.3

Diskutieren Sie die aufgenommenen Oszillogramme.

zu 3.4

Vergleichen Sie die gemessene Steuerkennlinie mit der theoretischen, begründen Sie deren Abweichung und ermitteln Sie daraus die Lückgrenze des Stromrichters.

Oszillogramme zum Versuch Umkehrstromrichter

zu 3.1

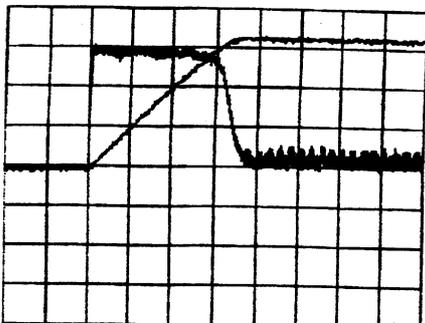


Bild Nr. 1

Vorgang:.....

Powerscope

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

DSO

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

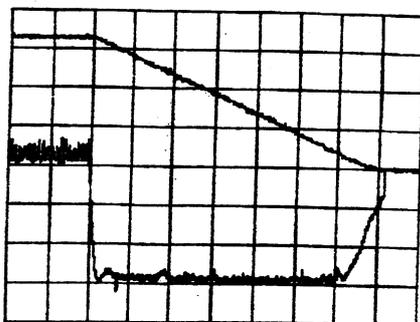


Bild Nr. 2

Vorgang:.....

Powerscope

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

DSO

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

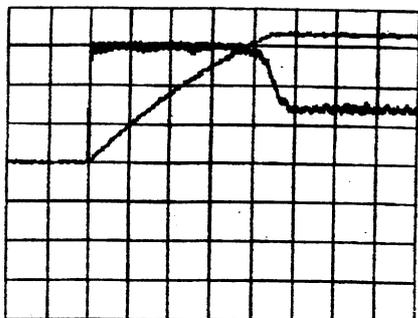


Bild Nr. 3

Vorgang:.....

Powerscope

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

DSO

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

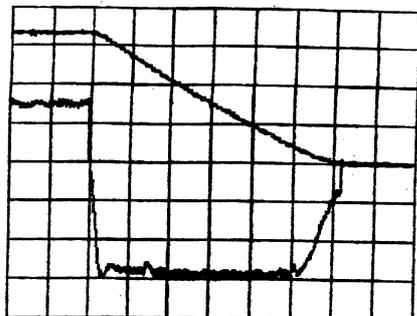


Bild Nr. 4

Vorgang:.....

Powerscope

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

DSO

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

zu 3.2



Bild Nr. 5

Vorgang:.....

Stromsollwert: 18 A

Powerscope

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

DSO

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

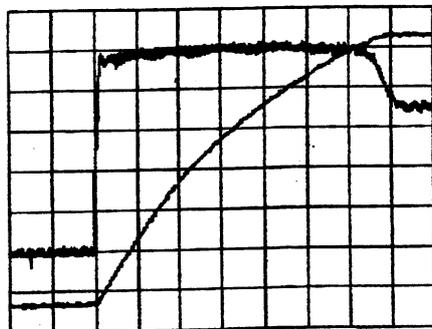


Bild Nr. 6

Vorgang:.....

Stromsollwert: 18 A

Powerscope

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

DSO

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

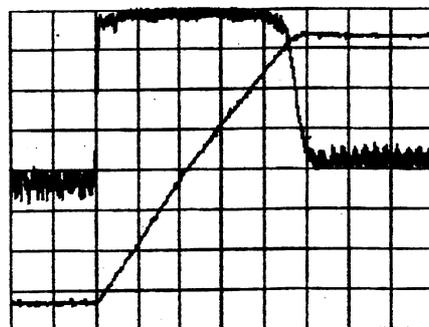


Bild Nr. 7

Vorgang:.....

Stromsollwert: 24 A

Powerscope

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

DSO

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

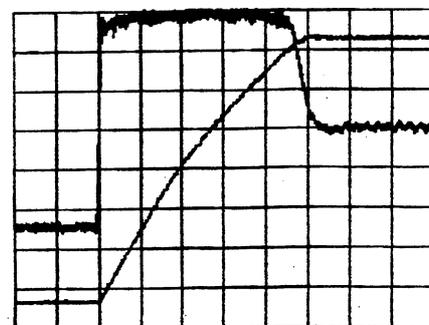


Bild Nr. 8

Vorgang:.....

Stromsollwert: 24 A

Powerscope

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

DSO

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

zu 3.3

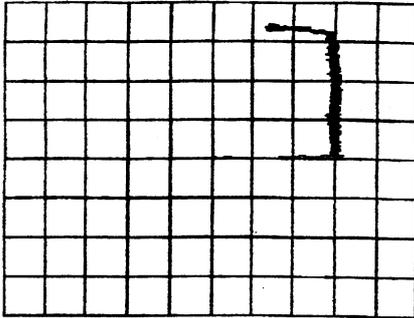


Bild Nr. 9

Vorgang:.....

Powerscope

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

DSO

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

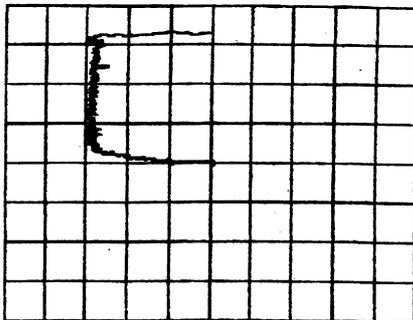


Bild Nr.10

Vorgang:.....

Powerscope

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

DSO

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

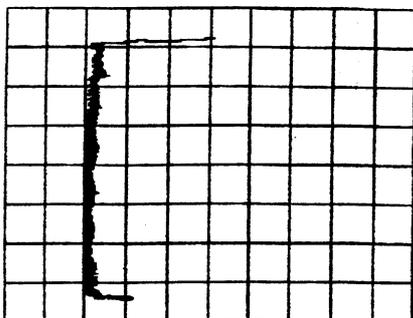


Bild Nr.11

Vorgang:.....

Powerscope

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

DSO

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

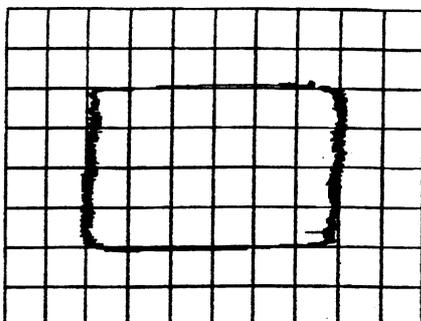


Bild Nr.12

Vorgang:.....

Powerscope

Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

Strom:A / RE

DSO

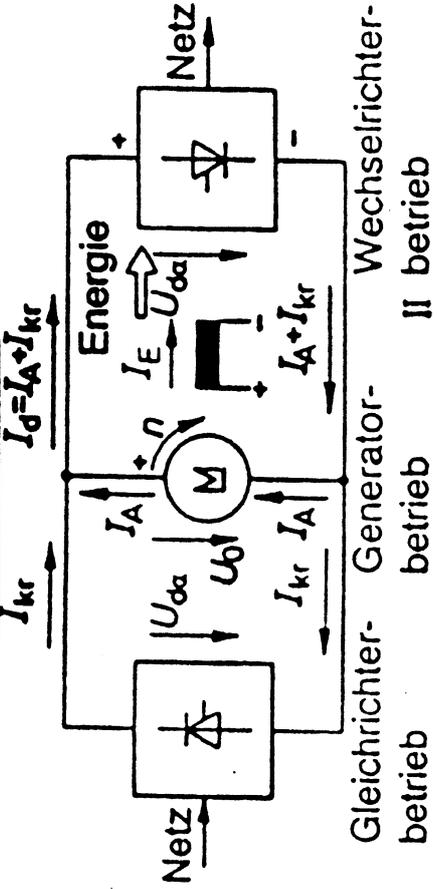
Zeitablenkung:.....ms / RE

Drehzahl:1/min / RE

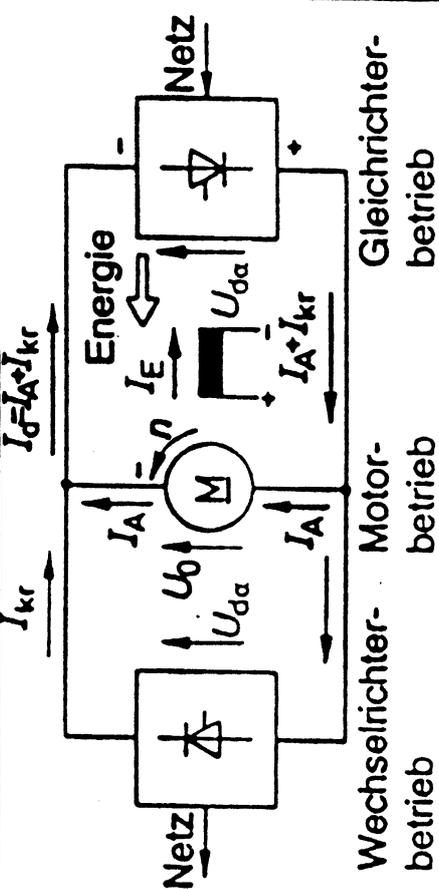
Strom:A / RE

$n(U_{d\alpha})$

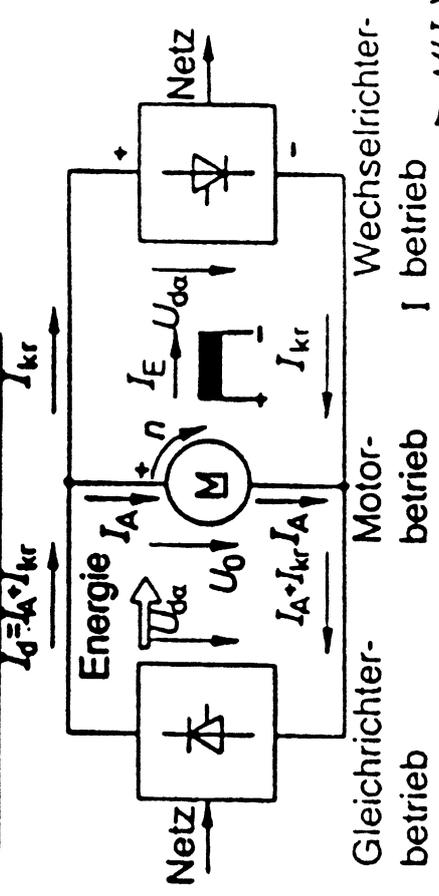
Bremsen, Rechtslauf $E > U_{d\alpha}$



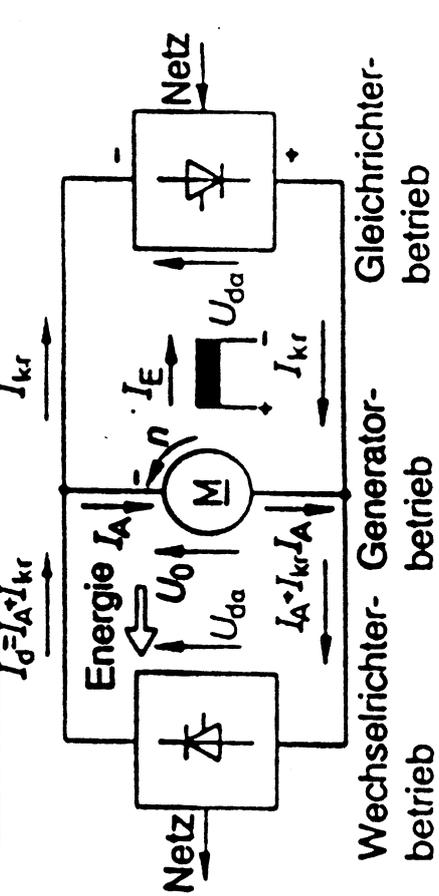
Treiben, Linkslauf $U_{d\alpha} > E$



Treiben, Rechtslauf $U_{d\alpha} > E$



Bremsen, Linkslauf $E > U_{d\alpha}$



$M(I_d)$

Versuch Solarwechselrichter

Einleitung

Im Rahmen dieses Versuchs wird der Solarwechselrichter Sunnyboy 5000TL-20 des Marktführers SMA untersucht. Der vorliegende Versuch Solarwechselrichter wurde im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Labor für Leistungselektronik der Hochschule Darmstadt erstellt.

Ziel des Versuchs: Die Studierenden sollen die Wirkungsweise leistungselektronischer Grundsaltungen untersuchen und deren Kombination zu einem High-Tech Produkt verstehen. Sie sollen auch Kenntnisse über den Stand der Technik bei Solarwechselrichtern erhalten.

Voraussetzungen: Den Studierenden sollten die Grundlagen der Leistungselektronik wie Bauelemente, Entstehung von Schaltverlusten und einfache Steuerverfahren aus einer entsprechenden Vorlesung bekannt sein.

Hinweis: Die Versuchsbeschreibung setzt voraus, dass geeignete Messmittel mit Potentialtrennung zur Verfügung stehen und verwendet werden, z.B. Oszilloskope mit Differenzeingängen, Trennverstärker und Strommesszangen. Dies ist unbedingt erforderlich, da der Wechselrichter nicht galvanisch vom Netz getrennt ist. Diese Anleitung ersetzt keine Sicherheitsbelehrung für den Laborbetrieb.

Erneuerbare Energien sind ein wesentlicher Baustein für eine zukunftsgerichtete Energieversorgung. In diesem Konzept kommt der Photovoltaik besondere Bedeutung zu, denn auf diesem Gebiet kann auch der Einzelne durch Installation einer Anlage seinen Energieverbrauch selbst decken. Hierbei handelt es sich oft um Anlagen im Leistungsbereich bis 10kW peak, die auf geeigneten Dächern installiert werden. Bis 5kW werden die Wechselrichter in der Regel einphasig ausgeführt. Die Vergütung ist so gestaltet, dass einerseits Anreize zur Installation entstehen, andererseits aber auch durch die sinkende Vergütung Anreize zur Verbilligung der Anlagen geschaffen werden. Da die Vergütungssätze noch über den Arbeitspreisen für elektrische Energie liegen, ist es besonders wichtig, dass alle verwendeten Anlagenkomponenten hohe Wirkungsgrade aufweisen. Der Wechselrichter ist eine Schlüsselkomponente einer solchen Anlage.

Grundlagen der Solarwechselrichter

Solarzellen wandeln die Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie um. Sie liefern Gleichspannung. Die Solarzelle selbst wird als bekannt vorausgesetzt und hier nicht näher betrachtet, sie ist für das Verständnis des Solarwechselrichters auch nicht unbedingt notwendig. Durch Reihenschaltung vieler einzelner Solarzellen werden Solarpanel aufgebaut. Solarwechselrichter wandeln die Gleichspannung in Wechselspannung um und speisen die elektrische Energie meist in das Niederspannungsnetz ein. Solarwechselrichter für den autarken Betrieb von Verbrauchern (Inselbetrieb) unterscheiden sich besonders hinsichtlich

Steuerung und Regelung von Wechselrichtern für die Netzeinspeisung und werden hier nicht weiter betrachtet.

Zum besseren Verständnis der technischen Anforderungen an die Wechselrichter müssen zunächst einige grundlegende Eigenschaften von Solarzellen betrachtet werden:

Die Spannung einer Solarzelle hängt sehr stark von der Umgebungstemperatur ab. Bei niedrigen Temperaturen ergeben sich bessere Wirkungsgrade. Daraus resultiert, dass Solarwechselrichter einen extrem weiten Bereich der Eingangsgleichspannung abdecken müssen. Dies ist auch deshalb wünschenswert, weil je nach Anlage unterschiedlich viele Solarzellen in Reihe geschaltet werden.

Der Ausgangsstrom einer Solarzelle hängt stark von der Einstrahlung ab. Hier muss der Wechselrichter seinen Arbeitspunkt so verändern und anpassen können, dass das Maximum an Energie, d.h. das maximale Produkt aus Strom und Spannung geliefert wird. Dieser Punkt wird als Maximum Power Point (MPP) bezeichnet, die entsprechende Regelung bezeichnet man als MPP-Tracking.

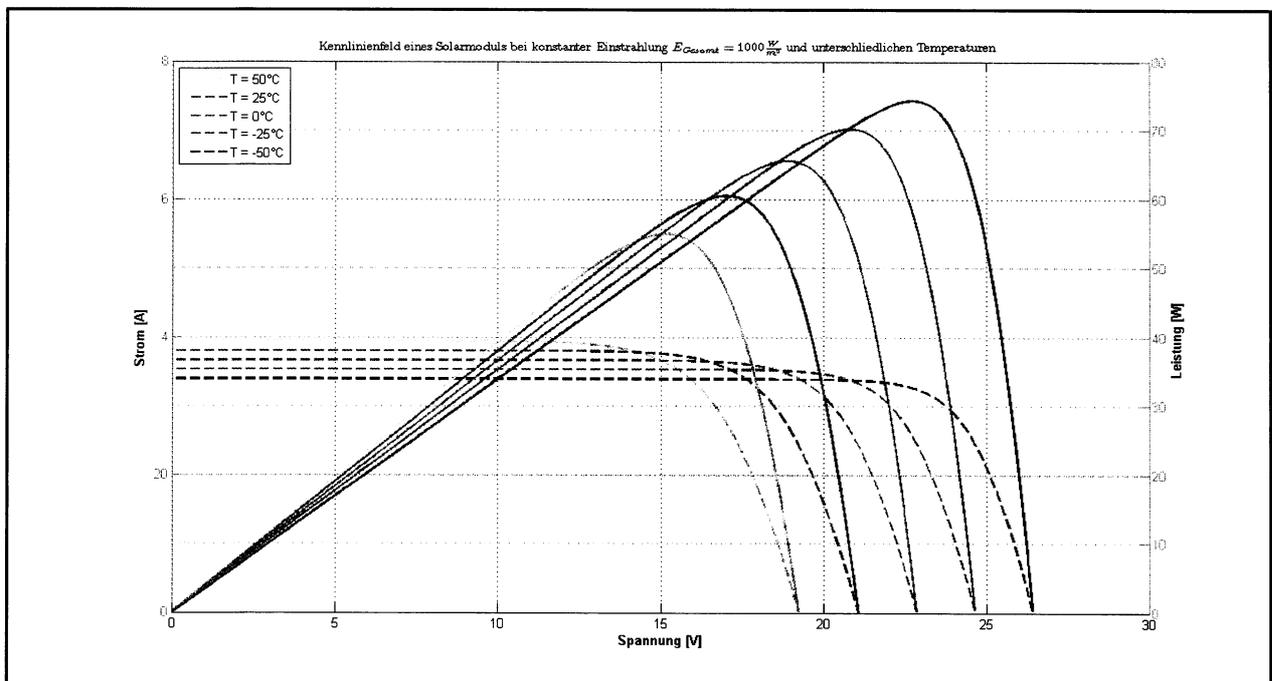


Abb. 1: Kennlinien von Solarzellen

Bei Teilabschattung einzelner Solarzellen wirkt sich dies auf die ganze Reihenschaltung aus, daher ist es besser, ein großes Solarfeld in mehrere Reihenschaltungen (Strings) aufzuteilen und die Optimierung des Arbeitspunkts für jeden String getrennt durchzuführen.

Grundsaltungen von Solarwechselrichtern

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Wechselrichtern mit galvanischer Trennung und Wechselrichtern ohne galvanische Trennung vom Versorgungsnetz. Prinzipiell kann jeder netzgeführte Stromrichter mit natürlicher Kommutierung im Wechselrichterbetrieb Gleichstrom in Wechselstrom umwandeln. Allerdings resultieren daraus erheblicher Blindleistungsbedarf und ein stark verzerrter Netzstrom. Beides ist aus Sicht der Netzbetreiber sehr nachteilig. Deshalb wird dieser Typ nicht mehr eingesetzt. Heute stehen leistungsfähige abschaltbare Halbleiter (IGBT, FET) zur Verfügung, deshalb werden nur noch Transistorschaltungen eingesetzt.

Transformatoren haben in jedem Fall negative Auswirkungen auf den Wirkungsgrad, so dass angestrebt wird, Wechselrichtertopologien zu verwenden, die keine galvanische Trennung vom Netz erfordern. Zu dieser Klasse gehört der zu untersuchende Wechselrichter.

Solarwechselrichter mit galvanischer Trennung

Ein einfacher Wechselrichter besteht aus einer H-Brücke. Der Ausgangsstrom wird durch Taktung sinusförmig gestaltet und über einen Transformator ins Netz eingespeist. Der Transformator wird in dieser Schaltung mit 50 Hz betrieben und ist entsprechend schwer und teuer.

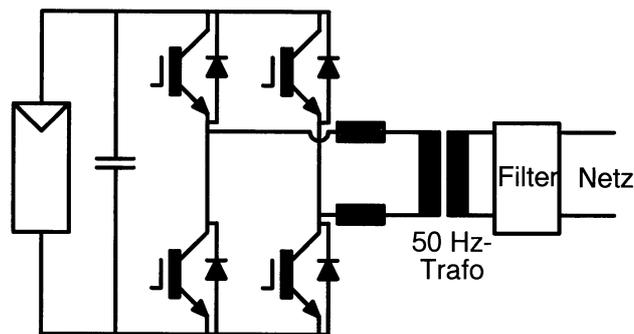


Abb. 2: Solarwechselrichter mit 50Hz-Transformator

Dies kann vermieden werden, wenn durch die H-Brücke ein sinusförmig modulierter Wechselstrom hoher Frequenz erzeugt wird. Dieser wird über einen Transformator auf die Netzseite übertragen. Die Diodenbrücke übernimmt die Gleichrichtung und die netzseitigen Halbleiter werden so gesteuert, dass die phasenrichtige Zuordnung der Stromhalbwellen zur Netzspannung gegeben ist.

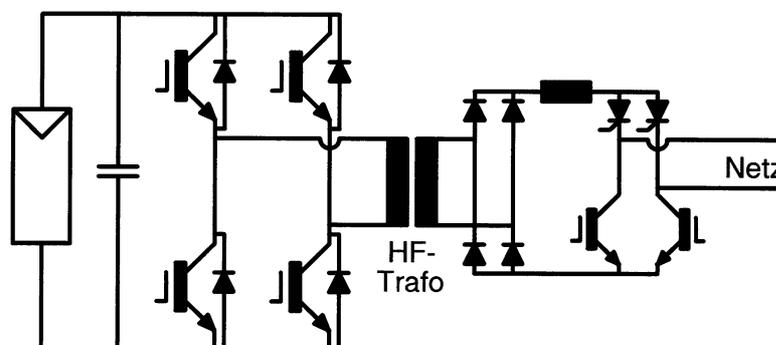


Abb. 3: Solarwechselrichter mit Transformator für höhere Frequenz

Nachteilig an dieser Schaltung ist, dass eine mehrmalige Energieumformung notwendig ist und deshalb der Halbleiternaufwand steigt. Generell ist es wünschenswert, den Transformator einzusparen, weil dieser Kosten und Verluste verursacht, auch wenn diese nicht so groß sind wie bei einem 50Hz-Transformator.

Schaltungen ohne galvanische Trennung

Meist wird eine der beiden folgenden Grundschaltungen verwendet:

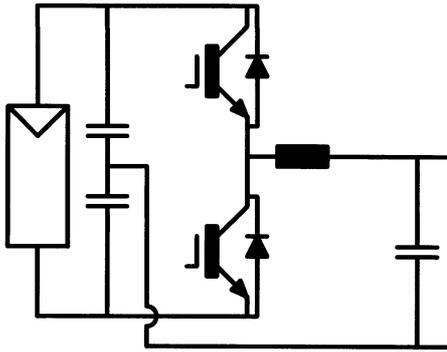


Abb. 4: Einphasig gegen kapazitiven Mittelpunkt

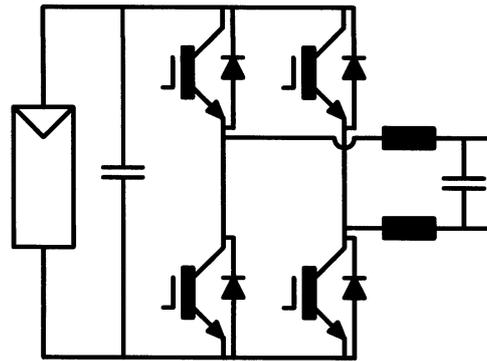


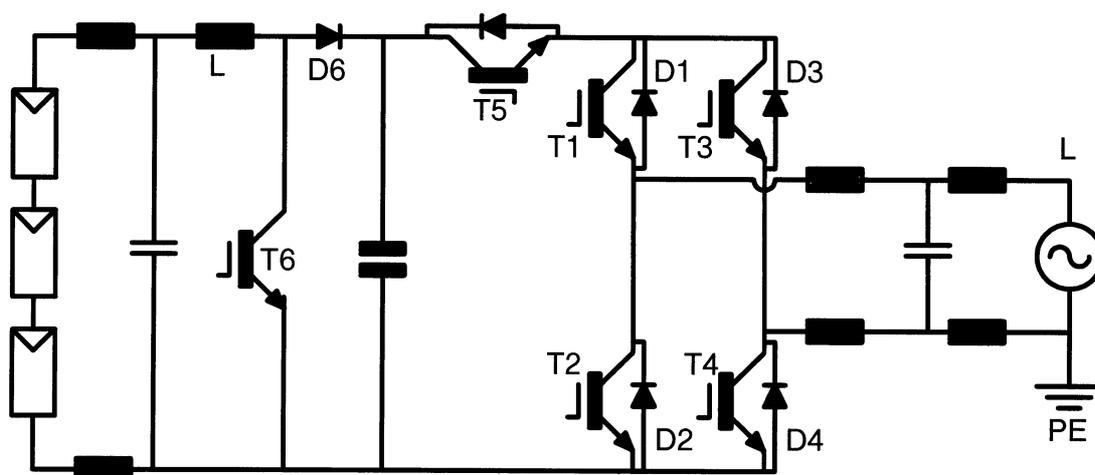
Abb. 5: H-Brücke

Sie beruhen auf dem Zwei- oder Vier-Quadranten-Steller. Die Stromkurvenform auf der Netzseite wird jeweils durch Taktung erzeugt. Da die Spannung im Zwischenkreis deutlich höher als der Spitzenwert der Netzspannung sein muss, ergeben sich bei Anschluss an 230V Spannungen von mehr als 700V bei kapazitiver Mittenanzapfung und mehr als 350V für die H-Brücke. Bei der H-Brücke können zusätzlich geeigneteren Schaltmuster durch die Verwendung von Freiläufen verwendet werden. Im Folgenden wird nur noch die H-Brücke betrachtet.

Theoretische Beschreibung der Teilschaltungen des verwendeten Wechselrichters.

Weil die Eingangsspannung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Anlagenkonfiguration in weiten Bereichen schwanken kann, wird im zu untersuchenden Wechselrichter ein zweistufiges Verfahren verwendet:

Zunächst setzen ein oder mehrere Hochsetzsteller die Eingangsspannung auf einen Gleichspannungswert herauf, der über dem Spitzenwert der Netzspannung liegt. Danach wird eine H-Brücke geschaltet, die die Stromkurve formt und in das Netz einspeist.



Panel DC-Filter Hochsetzsteller Wechselrichter Drossel AC-Filter Netz
Abb. 6: Prinzipschaltbild des untersuchten Wechselrichters

Bei der folgenden theoretischen Betrachtung werden die Durchlassspannungsabfälle leitender Halbleiter und die Sperrströme gesperrter Halbleiter vernachlässigt. Weiterhin

wird voraus gesetzt, dass die Schaltungen nicht lücken, dass also der Strom in der jeweiligen Drossel für keinen Zeitraum Null ist.

Hochsetzsteller

Ein Hochsetzsteller wandelt eine niedrigere Spannung in eine höhere Spannung um. Dies ist beim untersuchten Umrichter deshalb sehr vorteilhaft, weil damit Solarpanel mit niedriger Ausgangsspannung verwendet werden können und trotzdem die zur Einspeisung in das Netz notwendige Gleichspannung erzeugt werden kann. Außerdem kann die aufgrund der Temperatur stark variierende Ausgangsspannung der Solarpanel kompensiert werden, ohne dass sich die Eingangsspannung des nachgeschalteten Wechselrichters wesentlich ändert.

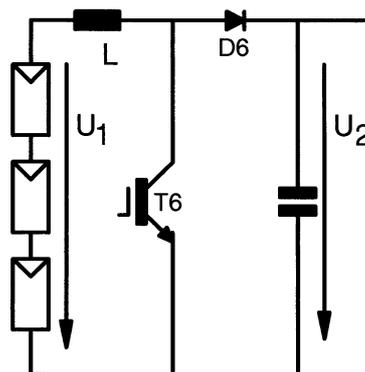


Abb. 7: Hochsetzsteller

Funktionsweise:

Während der Einschaltzeit des Transistors T_6 steigt der Strom in der Induktivität L linear an:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_1}{L}$$

Während der Ausschaltzeit des Transistors t_{aus} fließt der Strom der Induktivität L über die Diode D_6 weiter in den Kondensator, hier dargestellt durch die Spannungsquelle U_2 .

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_1 - U_2}{L}$$

Wenn die Schaltung im stationären, nicht lückenden Betrieb arbeitet, so fällt der Strom während der Ausschaltzeit t_{aus} genau so weit ab wie er vorher während der Einschaltzeit angestiegen ist. Dazu muss die Spannungszeitfläche an L (schraffierte Flächen in Abb. 8) über die Periode T genau Null sein.

$$t_{ein} \cdot U_1 + t_{aus} \cdot (U_1 - U_2) = 0$$

Mit

$$t_{ein} + t_{aus} = T$$

erhält man:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{1}{1 - \frac{t_{ein}}{T}}$$

Damit kann auf einfache Weise die Eingangsspannung der nachgeschalteten H-Brücke auf einen geeigneten Wert geregelt werden, der über der Eingangsspannung liegt. Steigt die

Eingangsgleichspannung über den Sollwert der Zwischenkreisspannung an, so sperrt man den Transistor des Hochsetzstellers. Die Diode D ist dann dauernd durchgeschaltet und die Ausgangsspannung U_2 wird gleich der Eingangsspannung U_1 .

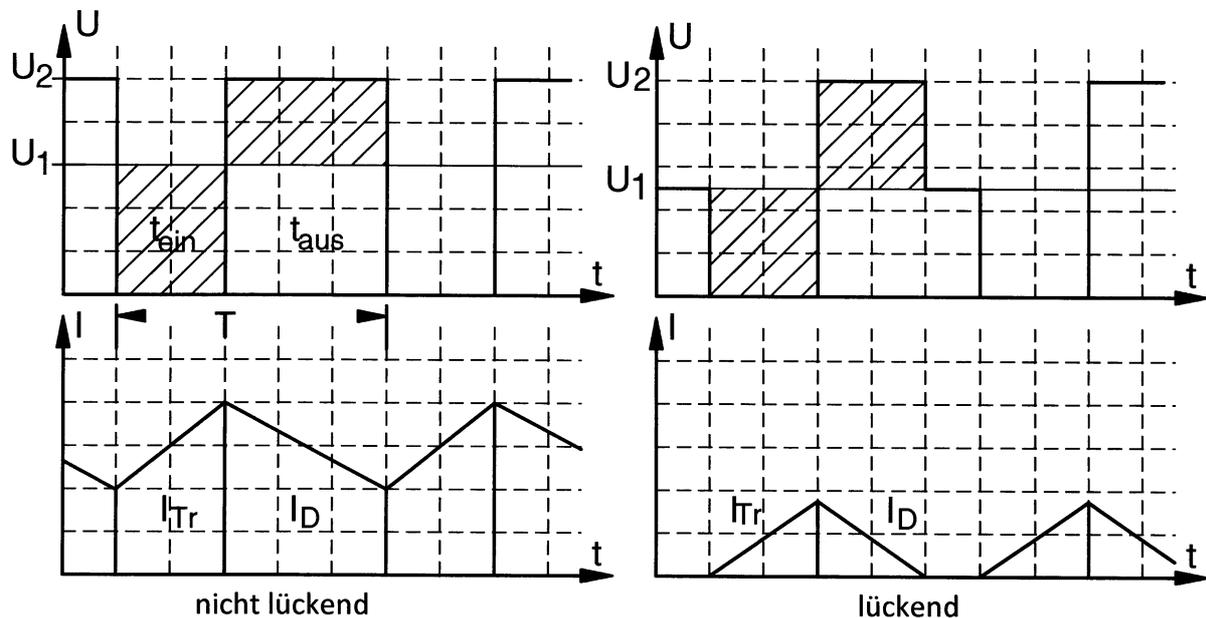


Abb. 8: Spannung und Strom beim Hochsetzsteller

Lückbetrieb

Die oben angegebenen Beziehungen gelten nur, solange der Gleichstrom nicht Null wird. Ist dies der Fall, dann sieht der Spannungsverlauf anders aus. Während der stromlosen Pause misst man am Transistor die Eingangsspannung statt der höheren Ausgangsspannung, die Spannungszeitfläche ändert sich.

H-Brücke

Im folgenden Kapitel wird die Funktionsweise der H-Brücke eingehend beschrieben. Sie ist als Vier-Quadranten-Steller aus der Antriebstechnik bekannt. Sie wird so genannt, weil es möglich ist, bei positiver und bei negativer Spannung U_N sowohl positiven als auch negativen Strom I_N zu erzeugen. Die Voraussetzung ist, dass die Spannung U_C größer ist als die Netzspannung U_N .

Man sieht, dass die Leistung in den Quadranten I und III positiv ist, also Energielieferung von U_C in U_N erfolgt. Die Quadranten II und IV stellen die Lieferung elektrischer Energie aus U_N in U_C dar.

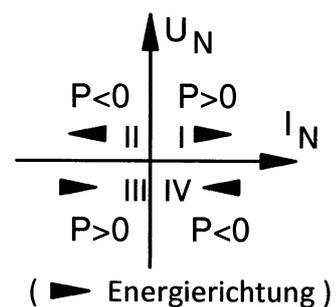


Abb. 9: Vier Quadranten

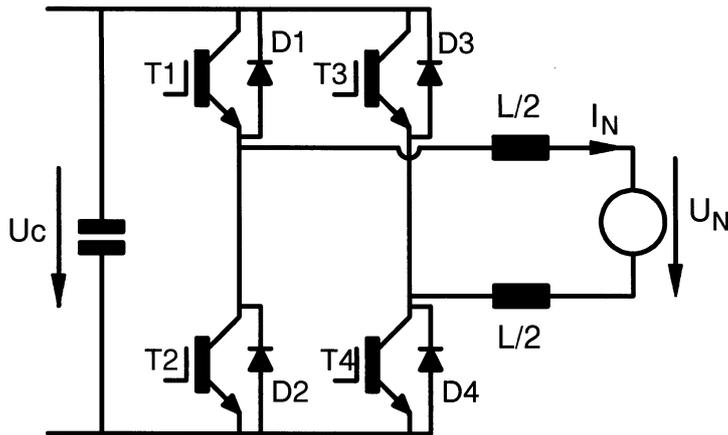


Abb. 10: Grundschialtung der verwendeten H-Brücke

Bei einem Solarwechselrichter sollen sinusförmige Ströme in eine Sinus-Spannungsquelle (das Netz) eingespeist werden. Bei einer beliebigen Phasenlage des Stroms zur Spannung treten alle vier Kombinationen auf. Damit kann die Schaltung auch kapazitive und induktive Grundschwingungsblindleistung erzeugen.

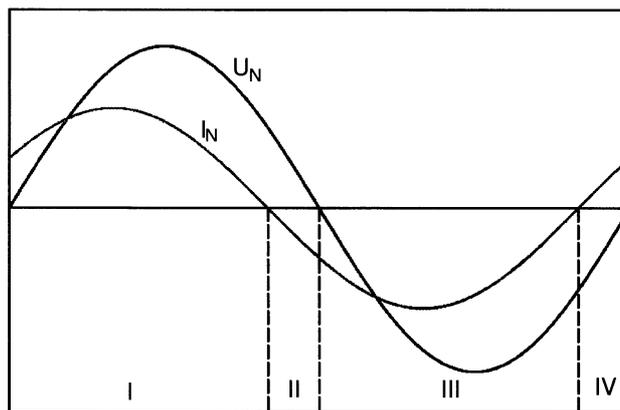


Abb. 11: Netzspannung und Netzstrom in beliebiger Phasenlage

Zunächst wird die Betriebsweise der H-Brücke für einen stationären Zustand im ersten Quadranten analysiert. Die Verhältnisse im dritten Quadranten ergeben sich durch Vertauschung der Halbleiter. Der Strom sei zum Zeitpunkt $t = 0$ positiv. Nun werden T_1 und T_4 eingeschaltet. Es ergibt sich der folgende Strompfad:

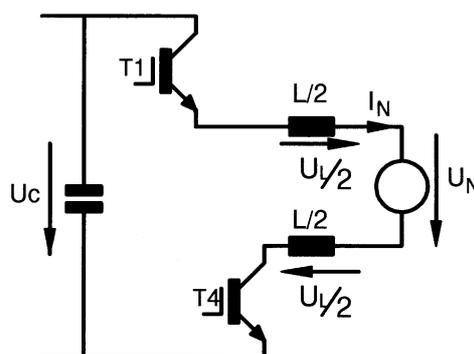


Abb. 12: Stromkreis während der Ein-Zeit

An der Drossel L, die zur Symmetrierung auf zwei gleiche Induktivität halber Größe aufgeteilt ist, liegt die Spannung:

$$U_L = U_C - U_N = L * \frac{di_N}{dt}$$

Für den Stromanstieg während der Einschaltzeit t_{ein} erhält man:

$$\Delta i_N = (U_C - U_N) * t_{ein}$$

Man sieht, dass durch Einschalten von T_1 und T_4 der Strom erhöht werden kann, wenn die Spannung U_C größer ist als der Scheitelwert der Netzspannung, was bei der zu untersuchenden Schaltung immer gewährleistet ist weil die Zwischenkreisspannung höher ist als der Spitzenwert der Netzspannung.

Nach dem Ablauf von t_{ein} werden T_1 und T_4 ausgeschaltet. Es ergibt sich der folgende Stromkreis.

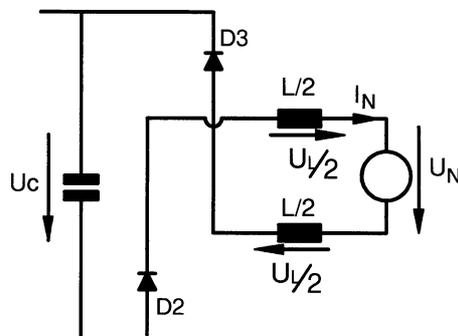


Abb. 13: Strompfad während der Aus-Zeit

Nun fließt der Strom über D_2 und D_3 . An der Drossel liegt die Spannung:

$$U_L = -U_C - U_N = L * \frac{di_N}{dt}$$

Für den Stromabfall während der Ausschaltzeit t_{aus} erhält man:

$$\Delta i_N = (U_C - U_N) * t_{aus}$$

Für den stationären Zustand, das heißt die Spannungen U_C und U_N sind konstant und es gilt

$$i_N(t_{ein} + t_{aus}) = i_N(0)$$

lässt sich der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung angeben.

$$\frac{U_N}{U_C} = \frac{2 * t_{ein}}{T} - 1$$

Dabei ist die Periodendauer

$$T = t_{ein} + t_{aus}$$

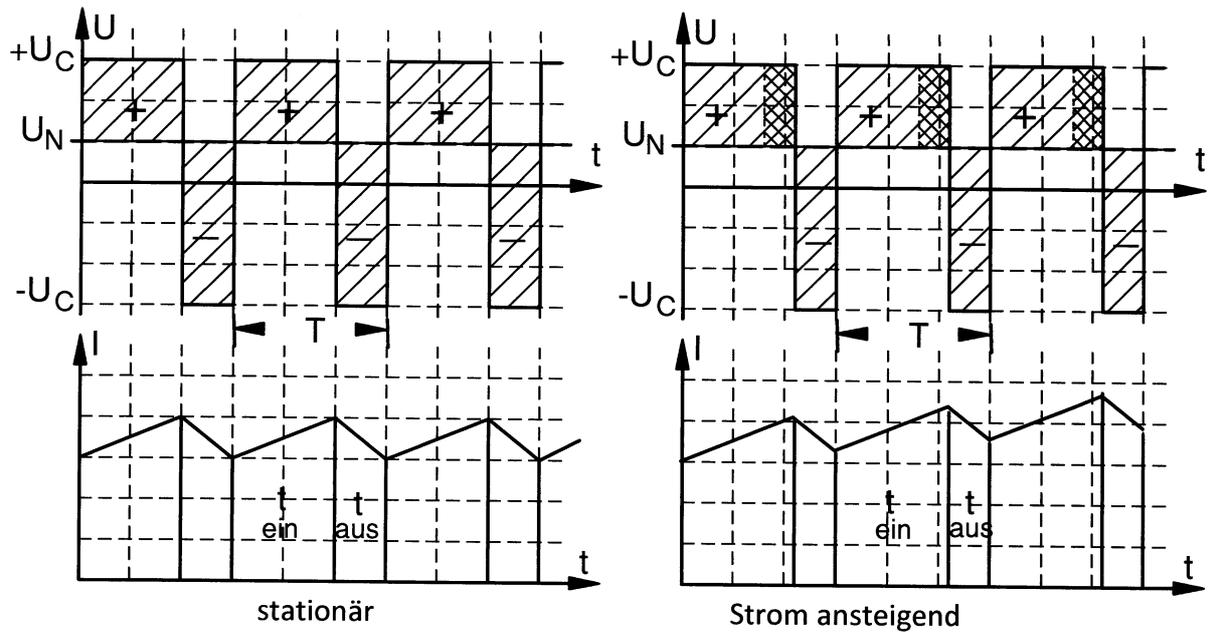


Abb. 14: Ausgangsspannung und Strom des Vier-Quadranten-Stellers

Weil t_{ein} zwischen Null und T verstellt werden kann, können Spannungen zwischen $+U_C$ und $-U_C$ erzeugt werden. Soll der Strom während des Intervalls um Δi erhöht werden, so ist eine zusätzliche Spannungszeitfläche notwendig (in Abb. 14 in Kreuzschraffur):

$$U_L * T = L * \Delta i$$

Wenn man während der als t_{aus} bezeichneten Zeit die Transistoren T_2 und T_3 ansteuert, dann kann der Strom auch negativ werden. Die Formel gilt also mit der gezeigten Bepfeilung für alle vier Quadranten, wenn man vereinbarungsgemäß die Ansteuerzeit für T_1 und T_4 als t_{ein} , und die Ansteuerzeit für T_2 und T_3 als t_{aus} bezeichnet.

Bei Solarwechselrichtern soll der Winkel zwischen der Grundwelle des Stroms und der Netzspannung Null sein, damit die Blindleistung Null ist. In diesem Fall treten nur die Quadranten I und III auf.

Daraus resultiert die folgende Steuerungsmöglichkeit: Wenn, wie in obigem Beispiel, im ersten Quadranten während der Ausschaltzeit beide Transistoren T_1 und T_4 ausgeschaltet werden, dann ergibt sich für die Ausschaltzeit (Abb. 13) ein Kreis, in dem der die Spannung U_C negativ an den Ausgang gelegt wird. Man erhält man für die Stromsteilheit

$$\frac{di_N}{dt} = \frac{-U_C - U_N}{L}$$

Der Strom nimmt relativ steil ab. Der Strom würde bei positiver Netzspannung auch abnehmen, wenn die Spannung Null an den Ausgang geschaltet würde. Dazu darf nur einer der beteiligten Transistoren ausgeschaltet werden. Dies entspricht der Funktionsweise eines Tiefsetzstellers, der ja in einem Vier-Quadranten-Steller enthalten ist. Es ergibt sich die folgende Masche:

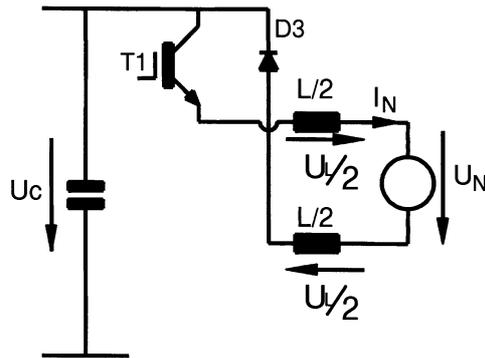


Abb. 15: Freilaufkreis während der Aus-Zeit

Man erhält für die Stromsteilheit:

$$\frac{di_N}{dt} = \frac{-U_N}{L}$$

Der Strom nimmt also immer noch ab, aber nicht mehr so steil. Deshalb erreicht man mit diesem Schaltmuster eine glattere Stromkurve oder man kann die Schaltfrequenz senken. (Hinweis: In der Antriebstechnik schaltet man abwechselnd T_1 und T_4 aus. Damit wird die Schaltfrequenz der Transistoren zusätzlich halbiert)

Bei dem untersuchten Wechselrichter hingegen werden immer die unteren Transistoren ausgeschaltet und die Freilaufkreise über die oberen Transistoren geschlossen.

Die H5-Brücke

Die Solarpanel stellen eine großflächige Kapazität gegen Erde dar. Bei Wechselrichtertopologien ohne Transformator stellt sich bei der gewählten Taktungsart mit Freilauf eine hochfrequente Spannung gegen Erde ein. Diese führt zu hohen Ableitströmen gegen Erde, welche mit der Taktfrequenz proportional steigen.

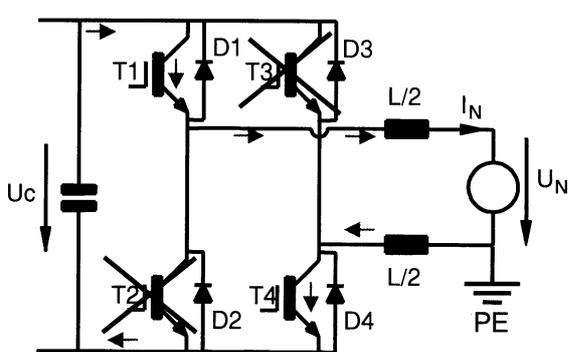


Abb. 16: H4-Brücke während einer Spannungshalbwelle

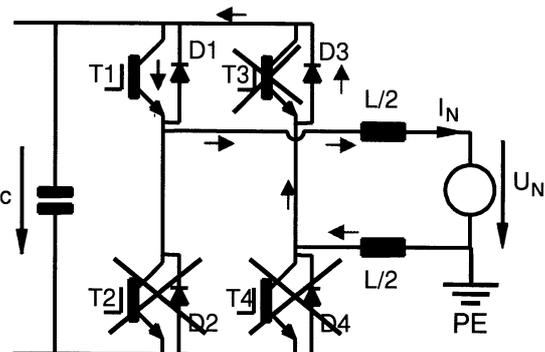


Abb. 17: H4-Brücke während des Freilaufs in einer Spannungshalbwelle

Weil die gewählte Taktungsart gegenüber Taktungsarten ohne Freilauf sehr niedrige Verluste aufweist, wird ein fünfter Schalter eingeführt. Dieser trennt nun in der Phase des Freilaufs den Zwischenkreis von der H4-Brücke. Bei niedrigen Verlusten erhält man somit während der Aus-Zeit eine Trennung von Gleichstromseite und Netzseite. Die normalerweise entstehenden Ableitströme werden dadurch minimiert.

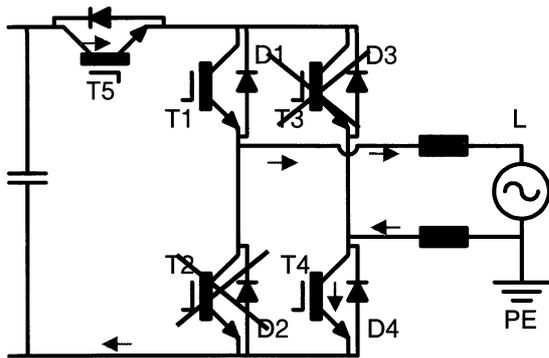


Abb. 18: H5-Brücke

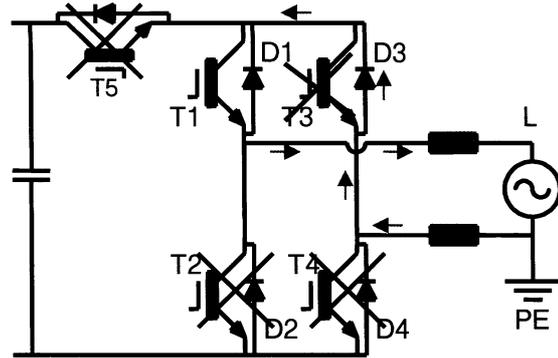


Abb. 19: H5-Brücke während des Freilaufs

Die Regelung

Der Umrichter ist mit mehreren Regelkreisen ausgestattet. Zunächst muss die Spannung am Zwischenkreiskondensator auf einen Wert oberhalb des maximalen Spitzenwerts der Netzspannung geregelt werden. Übersteigt die Eingangsspannung diesen Wert, dann ist kein Hochsetzen der Spannung mehr notwendig und der Hochsetzsteller wird nicht mehr getaktet.

Die MPP-Regelung sorgt dafür, dass der Einspeisung immer die maximal mögliche Leistung entnommen wird. In Abb. 1 sind die entnehmbaren Leistungen für unterschiedliche Temperaturen in Abhängigkeit von der Spannung eingezeichnet. Man sieht, dass sich das Maximum stark ändert und sehr parameterempfindlich ist. Deshalb sind an die MPP-Regelung sehr hohe Anforderungen zu stellen. Die Vorgehensweise ist wie folgt: Ausgehend von einem Arbeitspunkt verändert der Wechselrichter seinen Arbeitspunkt geringfügig zu höheren oder niedrigeren Strömen. Ergibt sich dadurch eine Erhöhung der Leistung, dann wird der neue Arbeitspunkt angewendet. Verringert sich die Leistung, dann geht man zum alten Arbeitspunkt zurück und versucht anschließend eine Änderung in der entgegengesetzten Richtung.

Der Netzstrom wird sinusförmig und in Phase mit der Netzspannung vorgegeben. Die Stromregelung erfolgt durch Taktung der Brücke.

Maßnahmen zur Wirkungsgradoptimierung

Solarwechselrichter werden durch vielfältige Maßnahmen auf gute Wirkungsgrade hin optimiert. Dazu gehört beispielsweise der Einsatz von SiC-Dioden zur Vermeidung von Schaltverlusten durch Rückstrom und eine großzügige Auslegung der Leistungshalbleiter. Bei dem vorliegenden Wechselrichter werden die Drossel des Hochsetzstellers und dessen Diode durch eine weitere Diode mit geringen Durchlassverlusten überbrückt, wenn der Hochsetzsteller infolge genügend hoher Eingangsspannungen abgeschaltet ist. Damit werden die Durchlassverluste durch Drossel und Diode des Hochsetzstellers vermieden und der Wirkungsgrad des Umrichters steigt. Allerdings kann der Eingangsstrom in diesem Betriebsfall nur vor dem DC-Filter gemessen werden.

Beschreibung des Versuchsaufbaus.

Die Versuchsanordnung

Für den Versuch ist der Umrichter mit Buchsen versehen, die einen einfachen Zugang zu den wichtigsten Punkten der Schaltung bieten. Der Klarsichtdeckel erlaubt einen guten Einblick in das Innenleben des Wechselrichters. Abbildung 19 zeigt die für die Versuchsdurchführung herausgeführten Testpunkte P1 bis P9, welche für die Messung von Spannungen und Strömen verwendet werden können.

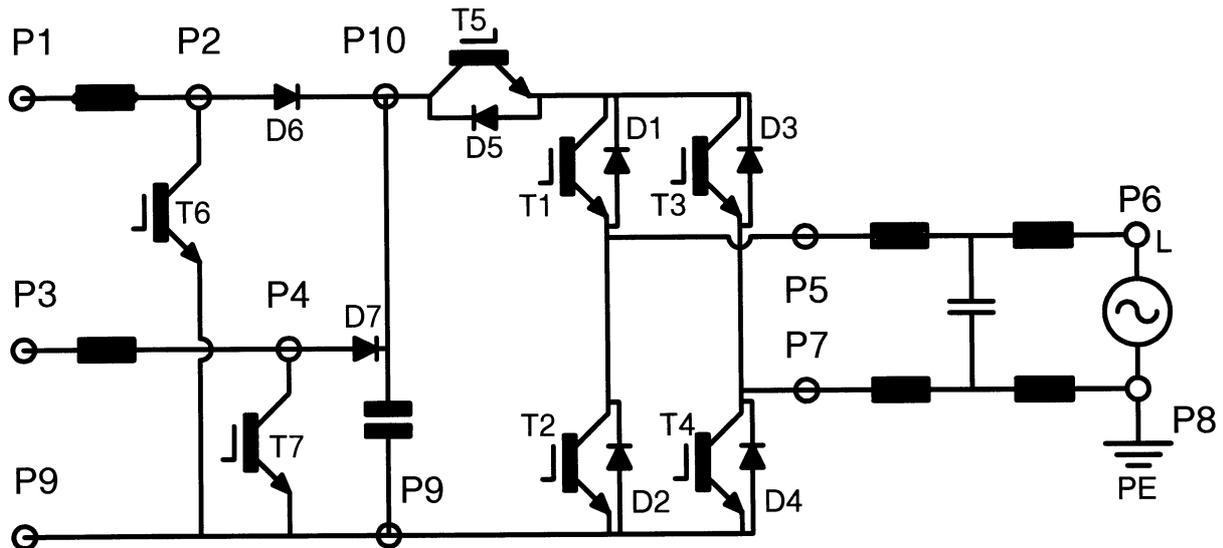


Abb. 20: Anschlusspunkte am Solarwechselrichter

Zu verwendende DC-Quelle

Bei der Untersuchung im Labor wird der Umrichter durch eine steuerbare variable Spannungsquelle gespeist, welche die Einstellung von typischen Parametern von Solarpanel gestattet. Damit lässt sich auf einfache Weise der Arbeitspunkt des Wechselrichters modifizieren.

Wird eine andere Einspeisung benutzt, so muss diese potentialfrei sein. Der Umrichter überprüft außerdem beim Einschalten Widerstand und Kapazität gegen Erde und geht sonst ggf. nicht in Betrieb. Soll die Einspeisespannung über den möglichen Spannungsbereich der Spannungsquelle hinaus erhöht werden, so ist diese mit einer anderen Spannungsquelle entsprechender Leistungsfähigkeit hinaus in Reihe zu schalten, wobei wieder auf Potentialfreiheit zu achten ist.

Zur Wirkungsgradermittlung werden die Leistungen auf der Gleichstromseite und auf der Netzseite erfasst und ausgewertet. Der Wechselrichter selbst kann Strom, Leistung und Arbeit anzeigen. Diese Werte erfüllen nicht die Genauigkeitsanforderungen zu Abrechnungszwecken, stellen aber eine gute Möglichkeit zur Plausibilitätsprüfung dar. Die Qualität der Wirkungsgradmessungen hängt von der Präzision der verwendeten Messgeräte ab.

Versuchsvorbereitung:

Die Versuchsvorbereitung dient zur intensiven Beschäftigung mit der Theorie der verwendeten Schaltungen und soll auch eine Kontrolle ermöglichen, wie gut man die Theorie verstanden hat.

Machen Sie sich die Funktionsweise der Schaltungen klar und beantworten Sie folgende Fragen:

1. Hochsetzsteller

Folgende (willkürlichen) Daten seien gegeben: Eingangsspannung 200V, Zwischenkreisspannung 400V, Schaltfrequenz $f = 10 \text{ kHz}$, Netzfrequenz 50Hz, Netzspannung 230V, $L = 5 \text{ mH}$

- Welches Taktverhältnis muss der Hochsetzsteller in diesem Betriebsfall haben, wenn der Strom nicht lückt?
- Berechnen Sie die Stromschwankung im nicht lückenden Betrieb und bei welchem Eingangsstrom (Mittelwert) der Strom zu lücken beginnt.
- Begründen Sie, warum der Hochsetzsteller im nicht lückenden Betrieb Integralverhalten hat, im lückenden Betrieb dagegen Proportionalverhalten.
- Warum muss die im Hochsetzsteller verwendete Diode eine sehr schnelle Diode sein?

2. Der Umrichter speist 20A mit $\cos \varphi = 1$ in das Netz ein. Berechnen Sie den Zeitverlauf der in das Netz gespeisten Leistung und geben Sie an, wie groß die Kapazität des Zwischenkreiskondensators mindestens sein muss, damit in diesem Betriebsfall die Spannungsschwankung kleiner als 15V (Spitze-Spitze) bleibt.

3. Die H-Brücke wird als Tiefsetzsteller betrieben. Sie wird mit fester Schaltfrequenz getaktet. Die Zwischenkreisspannung wird mit 400V angenommen. Bei welchem Taktverhältnis wird die Stromschwankung Δi maximal? Wie groß ist in diesem Fall die Netzspannung?

4. Messgenauigkeit

a. Bei der Messung des Wirkungsgrades verwenden Sie Wattmeter mit einer Messgenauigkeit von 1%. Sie messen: Eingangsleistung 4000W, Ausgangsleistung 3840 W. In welchem Bereich kann der wahre Wirkungsgrad liegen?

b. Sie messen den Betriebspunkt Eingangsspannung 250V, Eingangsstrom 10A. Sie verwenden folgende Messbereiche eines digitalen Geräts: $U_{\max} = 500\text{V}$, $I_{\max} = 20\text{A}$. Für die Messgenauigkeit des Messgerätes ist angegeben: 0,1% vom Messwert +0,1% vom Messbereichsendwert. In welchem Bereich kann der wahre Wirkungsgrad liegen?

Sicherheitshinweise:

Da der Umrichter ohne galvanische Trennung am Netz betrieben wird, dürfen nur Messmittel verwendet werden, die eine Potentialtrennung garantieren, also Oszilloskope mit Differenzeingängen, Strommesszangen und Trennverstärker.

Der Umrichter wird in Betrieb genommen, indem zunächst die Gleichspannung angelegt wird, erst danach wird das Netz zugeschaltet.

Bedienung der Einspeisung und des Wechselrichters

Zunächst ist der Wechselrichter an die Gleichstromseite anzuschließen.

Danach wird die Netzseite zugeschaltet. Nach Zuschalten der DC-Spannung führt der Wechselrichter einen Selbsttest durch und geht in Betrieb.

Soweit interne Einstellungen des Wechselrichters geändert werden sollen, muss mittels Bluetooth auf die internen Parameter zugegriffen werden. Dies ist z. B. dann sinnvoll, wenn die abgegebene Leistung oder die DC-Spannung am Eingang limitiert werden soll. Dies ermöglicht, verschiedene Betriebspunkte bei gleicher Leistung zu untersuchen (Anleitung zur Einstellung der Parameter über die Software Sunny Explorer wird im Anhang beschrieben).

Versuchsdurchführung

Verschalten Sie zunächst die Geräte zur Leistungsmessung so, dass Sie den Wirkungsgrad des Wechselrichters ermitteln können. Schalten Sie die Netzspannung zu.

1. Untersuchung des Hochsetzstellers
 - a. Schließen Sie das Oszilloskop an und zeichnen Sie die Verläufe der Transistorspannung und des Spulenstroms auf.
Ermitteln Sie die Zwischenkreisspannung, die Schaltfrequenz, die Induktivität der Stellerdrossel und das Taktverhältnis.
 - b. Variieren Sie die Einspeiseparameter und/oder die Leistungsbegrenzung des Wechselrichters so, dass der Strom verringert wird und stellen Sie fest, wann der Hochsetzsteller in Lückbetrieb geht.
 - c. Oszillografieren Sie den Spulenstrom des Hochsetzstellers und den Eingangsstrom. Vergleichen Sie die Kurvenverläufe.
Wie können Sie auf einfache Weise den Strom des Glättungskondensators im Netzfilter ermitteln?

2. Untersuchung der H-Brücke
 - a. Schließen Sie das Oszilloskop an und zeichnen die Netzspannung, den Netzstrom und die Ausgangsspannung der H-Brücke auf.
Ermitteln Sie die Schaltfrequenz und die Welligkeit des Stroms Δi .
 - b. Beobachten Sie die Änderungen des Taktverhältnisses im Verlauf einer Sinushalbwellen.
 - c. Ermitteln Sie die Induktivität der Netzdrossel. Überlegen Sie sich die dazu notwendige Messanordnung.
 - d. Messen Sie die Spannung über der (halben) Drossel von P5 nach P6 und interpretieren Sie das Ergebnis. Sie können davon ausgehen, dass die Induktivität der Drossel des Netzfilters klein ist gegenüber der Induktivität der Ausgangsdrossel des Wechselrichters.
 - e. Vergleichen Sie den Netzstrom mit dem Ausgangsstrom der H-Brücke.

3. Wirkungsgradmessungen

Hinweis: die untersuchten Arbeitspunkte liegen weit weg vom Optimum des Umrichters.

- a. Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Eingangsspannung
Stellen Sie den internen Parameter des Wechselrichters auf $P = 1,5\text{kW}$.
Verändern Sie jeweils die Parameter der Einspeiseschaltung so, dass sich bei veränderter Eingangsspannung bei gleicher Leistung unterschiedliche Eingangsströme ergeben. Tragen Sie die ermittelten Wirkungsgrade in Abhängigkeit vom Strom auf.
- b. Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Leistung
Verändern Sie die Begrenzung der Leistung des Wechselrichters und halten Sie die Eingangsspannung konstant. Messen Sie den Eingangsstrom, den Netzstrom und den Wirkungsgrad.

4. MPP-Tracking

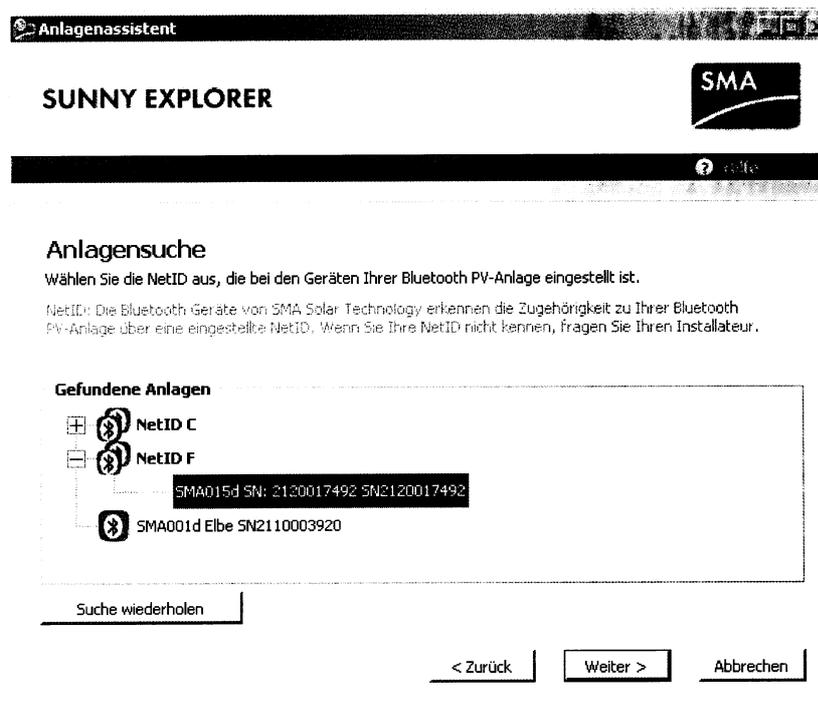
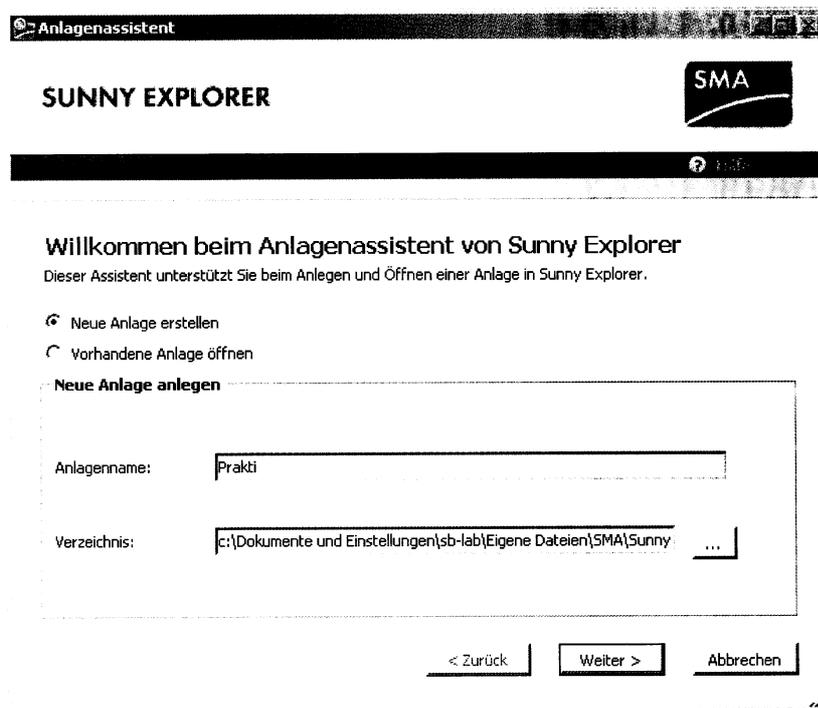
Verändern Sie an verschiedenen Betriebspunkten schlagartig eine Einstellung der Einspeisequelle. Beobachten Sie die Nachführung des Arbeitspunktes.

Versuchsbericht:

- Zu 1 Interpretieren Sie für einen typischen Betriebsfall die aufgezeichneten Oszillogramme so, dass Sie jemandem die Funktionsweise erklären können.
Leiten Sie die im Versuch ermittelten Größen aus den Oszillogrammen und den Messwerten von Spannungen und Strömen ab.
- Zu 2 Interpretieren Sie für einen typischen Betriebsfall die aufgezeichneten Oszillogramme so, dass Sie jemandem die Funktionsweise erklären können.
Leiten Sie die im Versuch ermittelten Größen aus den Oszillogrammen und den Messwerten von Spannungen und Strömen ab.
- Zu 3 Tragen Sie die gemessenen Wirkungsgradkurven in eine Grafik ein.
Führen Sie die Fehlerrechnung beispielhaft für die von Ihnen verwendeten Messgeräte durch.
- Zu 4 Beschreiben Sie das Verhalten des MPP-Tracking.

Anhang

Für die Versuchsdurchführung ist es u. U. notwendig, die Standardeinstellungen des Wechselrichters zu verändern. Hierfür kann die freie Software Sunny Explorer verwendet werden. Der Download steht auf der Homepage www.sma.de in verschiedenen Sprachen zur Verfügung. Nach der Erstellung einer neuen Anlage kann über Bluetooth die Kommunikation mit dem Wechselrichter hergestellt werden.



Nach erfolgreichem Verbindungsaufbau muss man sich als „Installateur“ mit dem Anlagenpasswort „1111“ anmelden.

Anlagenassistent

SUNNY EXPLORER SMA

Anlagenpasswort

Die Anlage ist durch ein Anlagenpasswort geschützt. Wählen Sie die Benutzergruppe aus und geben Sie das dazugehörige Anlagenpasswort ein.

Standard Anlagenpasswort: Benutzer: 0000 | Installateur: 1111

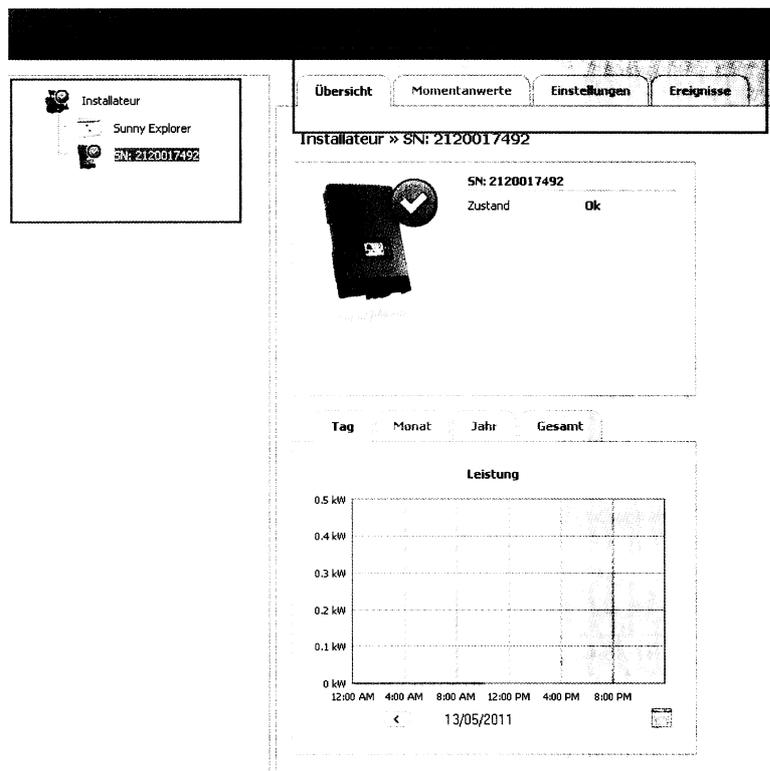
Benutzergruppe:

Anlagenpasswort:

< Zurück Weiter > Abbrechen

Nach Auswahl des Wechselrichters auf der linken Seite stehen die Untermenüs Übersicht, Momentanwerte, Einstellungen und Ereignisse zur Verfügung

SUNNY EXPLORER



Im Menüpunkt Einstellungen können nun die für die Versuchsdurchführung wichtigen Parameter wie die „Eingestellte Wirkleistung“ sowie der „Konstspannungssollwert“ bearbeitet werden. Damit der Wechselrichter die Konstanzspannungssollwerte übernimmt, muss der „Betriebszustand“ des Wechselrichters von „MPP-Betrieb“ auf „Konstanzspannungsbetrieb“ geändert werden.

SUNNY EXPLORER



Installateur
 Sunny Explorer
 SN: 2120017492

- Übersicht
- Momentanwerte
- Einstellungen**
- Ereignisse

Installateur » SN: 2120017492

▾ Typenschild

▾ Gerät

▾ Kühlsystem

Lüftertest Aus

▾ Wechselrichter

Abschaltverzögerung	2 s (1 s .. 60.00 min)
Maximale Wirkleistung	3,000 W
Eingestellte Leistungsgrenze	3,000 W (0 .. 3,060 W)
Zeitliche Kontrolle der Leistungsbegrenzung	Momentanwert

▾ Multifunktionsrelais

Betriebsart Störungsmeldung

▾ Batteriespeicher

Mindesteinschaltleistung 1,500 W (100 .. 3,000 W)

Mindestpause vor erneutem Einschalten 30 min (1 .. 1440 min)

▾ Steuerung über Kommunikation

Status Aus

▾ Eigenverbrauch

Mindesteinschaltleistung 1,500 W (100 .. 3,000 W)

Mindestzeit für Einschaltleistung 30 min (0 .. 1440 min)

Mindesteinschaltzeit 120 min (1 .. 1440 min)

▾ Betrieb

Parameter laden	-----
Betriebszustand	Konstantspannung
Betriebsdaten zurücksetzen	-----

SUNNY EXPLORER

Installateur
Sunny Explorer
SN: 2120017492

- Übersicht
- Momentanwerte
- Einstellungen
- Ereignisse

Installateur » SN: 2120017492

▸ Typenschild

▸ Gerät

▸ Benutzerrechte

▾ DC-Seite

▾ DC Einstellungen

Startverzögerung [001]	1 s (1 .. 4 s)
Grenzspannung zum Starten der Einspeisung [001]	220.00 V (220.00 .. 700.00 V)

▾ Konstanzspannungssteuerung

Spannung Sollwert [001]	300.00 V (175.00 .. 700.00 V)
-------------------------	-------------------------------

Bearbeiten

▸ AC-Seite

▸ Netzüberwachung

▸ Anlagenkommunikation

▸ Gerätekomponenten