

BERUFSAKADEMIE STUTTGART

STAATLICHE STUDIENAKADEMIE

Laborübungen im Fach

Grundlagen der Elektrotechnik

Versuch:

Elektrische Antriebe

1. Einführende Fragen

1.1 Die Axiome der Elektrotechnik, die Maxwellschen Gleichungen, führen auf das Durchflutungsgesetz und das Induktionsgesetz.
Wie lauten diese Gesetze?

1.2 Welches Gesetz ermöglicht die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie?
Ist die Umwandlung umkehrbar?

1.3 Welche Kräfte entstehen durch elektrische und magnetische Größen?

1.4 Welche Kraft ermöglicht die Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie am effektivsten?

2. Vorbereitung

Aus der Vielfalt gebräuchlicher elektrischer Antriebsmaschinen werden im Folgenden die beiden wichtigsten Vertreter, die Gleichstrommaschine und die Drehstromasynchronmaschine, herausgegriffen und im Versuch vorgestellt. Ihr Einsatz hat eine lange Geschichte und setzte ursprünglich angepasste Versorgungsnetze voraus, die im einen Fall eine feste Gleichspannung, im anderen Fall ein sinusförmiges Dreiphasensystem bereitstellen. Inzwischen hat sich die Energieversorgung der elektrischen Antriebe grundlegend geändert durch den Einsatz von elektronischen Bauelementen:

- Die Leistungselektronik ermöglicht das Schalten hoher Spannungen und Ströme kontaktlos in sehr kurzen Zeitintervallen.
- Die Digitaltechnik stellt die zugehörigen Steuersignale bereit, die eine bequeme Bedienung, vor allem aber eine Einbindung in elektronische Regelsysteme erlauben.

Daher ist es sinnvoll, die Behandlung der Antriebsmaschinen mit einem Blick auf deren Ansteuerung zu verbinden.

2.1 Gleichstrommaschine

2.1.1 Das Drehmoment

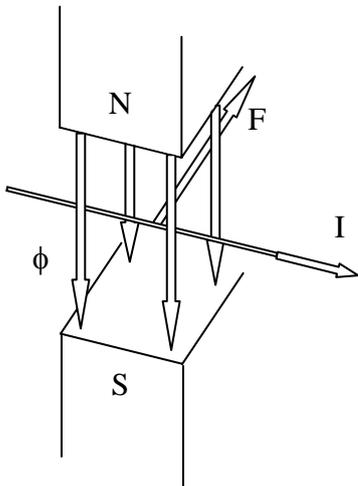


Bild 1a

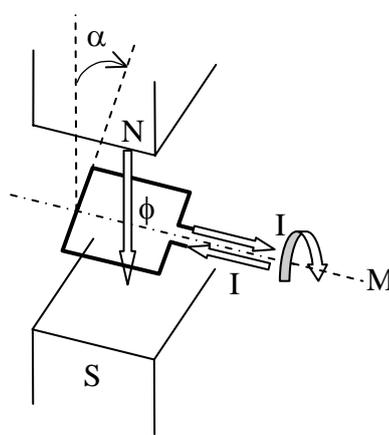


Bild 1b

Der stromdurchflossene Leiter in Bild 1a erfährt im Magnetfeld eine Kraft F ; sie ist proportional zum magnetischen Fluss ϕ und zur Stromstärke I .

$$F = c_1 \cdot \phi \cdot I \quad (c_1 : \text{Proportionalitätskonstante})$$

Eine drehbar gelagerte Leiterschleife nach Bild 1b erfährt im Magnetfeld abhängig von der Winkellage α ein Drehmoment M :

$$M = c_2 \phi \cdot I \cdot \cos \alpha \quad (c_2 : \text{Proportionalitätskonstante}) \quad (1a)$$

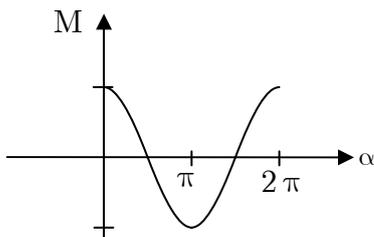


Bild 2a

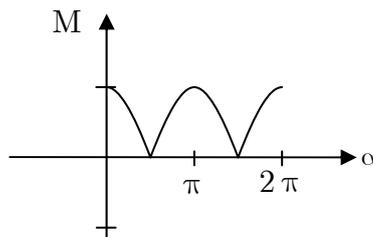


Bild 2b

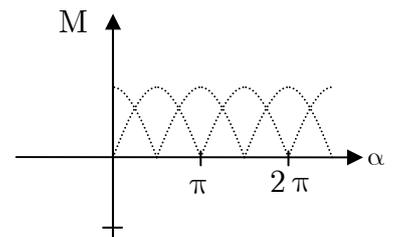


Bild 2c

In Bild 2a ist die Abhängigkeit $M(\alpha)$ nach Gl (1a) skizziert. Beim Einsatz eines Kommutators wird die Stromrichtung bei $\alpha = \pi/2$ und $\alpha = 3\pi/2$ umgekehrt; dies führt zu Bild 2b. Bei Gleichstrommotoren werden im umlaufenden Teil, dem Anker, eine Vielzahl von Leiterschleifen verwendet, die über dem Umfang des Ankers verteilt in Nuten liegen. Sie erhalten ihren Strom über ein Paar von Segmenten am mitlaufenden "Kollektor" von

feststehenden "Bürsten". Die Ungleichförmigkeit des Drehmoments wird dadurch verringert (vergl. Bild 2c für (nur) zwei Schleifen). Zudem ist es möglich, die Nuten des Ankers so zu bewickeln, dass (nahezu) alle Leiterschleifen Strom führen und ihren Beitrag zum Drehmoment leisten, das sich dann einem Gleichwert nähert. Somit gilt näherungsweise:

$$M = c_3 \cdot \Phi \cdot I \quad (1b)$$

2.1.2 Die Gleichstrommaschine im Stromkreis

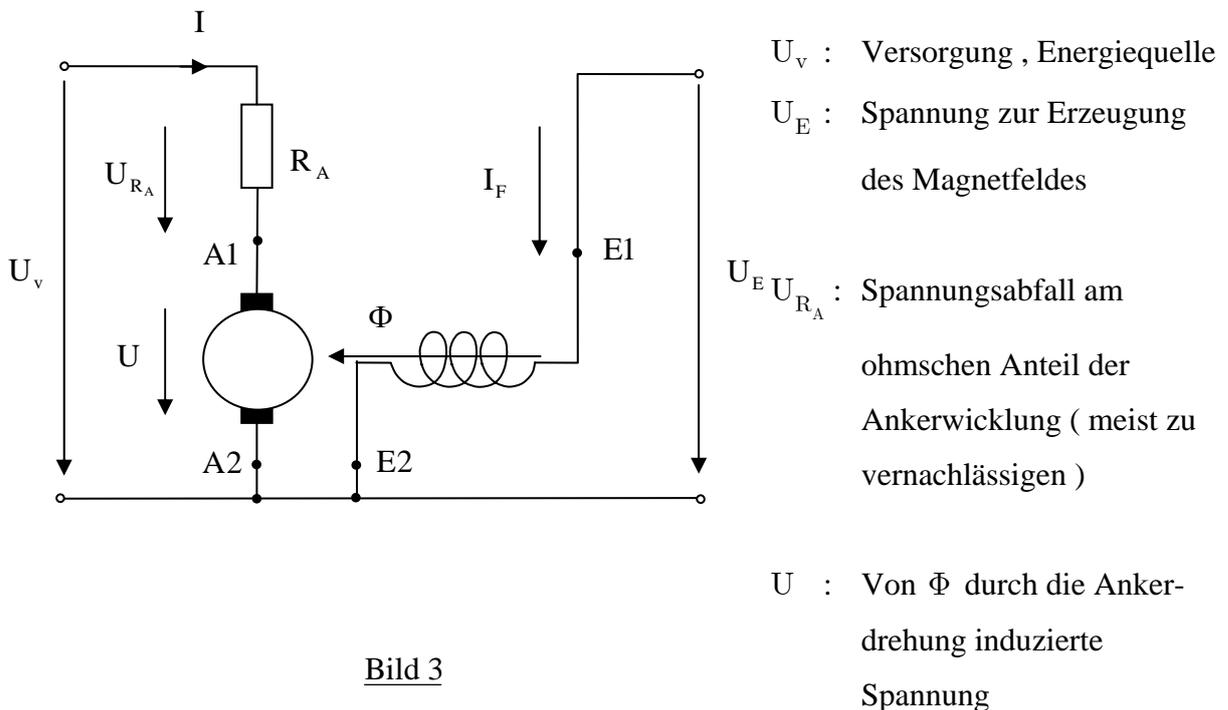


Bild 3

Im Folgenden wird nur der fremderregte Gleichstrommotor betrachtet; dabei sind die Stromkreise für Anker und Magnetfelderregung getrennt.

Für den Ankerkreis gilt:

$$U_v = R_A \cdot I + U \quad (2)$$

Für die durch Ankerdrehung induzierte Spannung U gilt:

$$U \approx n \cdot \Phi \quad (n = \text{Drehzahl des umlaufenden Ankers}) \quad (3)$$

Somit gilt für die Drehzahlen n :

$$n \approx \frac{U}{\Phi} ; \quad n = c_4 \frac{1}{\Phi} (U_v - R_A \cdot I) \quad (4)$$

(c_4 : Proportionalitätskonstante)

2.1.3 Die Gleichstrommaschine im Betriebszustand

Betriebszustand soll heißen, dass im Motorbetrieb an der Achse des Ankers ein mechanisches Drehmoment M zu überwinden ist und eine elektrische Versorgung nach Bild 3 anliegt.

Aufgabe 1

Der magnetische Fluss Φ ist bei Fremderregung immer konstant. Der Ankerwiderstand R_A sei vernachlässigt.

a) Wie hängt der Ankerstrom I ab

- vom Drehmoment M ?
- von der Versorgungsspannung U_V ?
- von der Drehzahl n ?

b) Wie hängt die Drehzahl n ab

- von der Versorgungsspannung U_V ?
- vom Drehmoment M ?
- vom Ankerstrom I ?

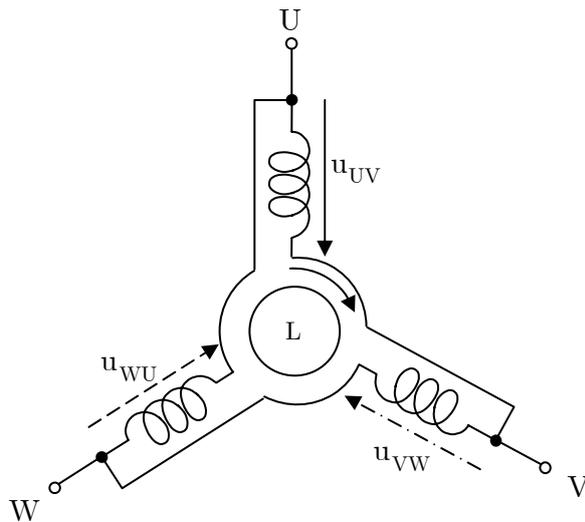
c) Nun sei R_A nicht mehr vernachlässigt. Wie lautet nun die Abhängigkeit der Drehzahl n von U_V , M und Φ mit den konstanten Parametern R_A , c_3 und c_4 ?

Bemerkung:

Die Energiewandlung ist umkehrbar:

Ein mechanisches Drehmoment an der Maschinenwelle erzeugt bei eingeschalteter Felderregung eine drehzahlabhängige Spannung an den Klemmen A1 und A2 in Bild 3: Generatorbetrieb.

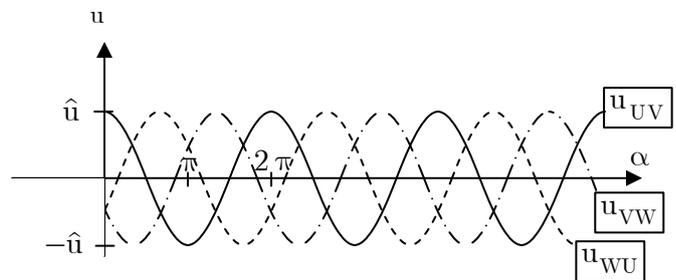
2.2 Drehstrom-Asynchrommaschine (ASM)



(Beispiel: Dreieckschaltung)

L = Läufer

Bild 4a



(U, V, W : maschinenseitige
Bezeichnung der Klemmen
eines Dreiphasensystems)

Bild 4b

2.2.1 Das Drehfeld im Ständer

Im Ständer, dem feststehenden Teil der Maschine, sind Feldspulen gemäß der stark vereinfachten Skizze im Bild 4a so angeordnet, daß ihre magnetischen Flüsse den Läufer L je um den Winkel $2\pi/3$ verdreht durchsetzen. Die Spannungen, welche die Flüsse erregen, bilden zusammen ein Dreiphasensystem nach Bild 4b, d.h. sie sind bei gleicher Frequenz und gleicher Amplitude um $\omega t = 2\pi/3$ versetzt. Somit tritt z.B. das Maximum des resultierenden Gesamtflusses Φ_G in der Reihenfolge U, V, W auf und es entsteht ein (rechtsdrehendes) magnetisches Drehfeld. Bei $f = 50$ Hz und nur einem Pol(-paar) pro Phase beträgt die Drehzahl n_0 des Feldes

$$n_0 = 50 \text{ U/s} = 3000 \text{ U/min}$$

Sind p Polpaare am Umfang des Läufers angeordnet, gilt

$$n_0 = \frac{f / \text{Hz}}{p} \cdot 60 \text{ U/min}$$

2.2.2 Das Drehmoment auf den Läufer

Im Fall des Kurzschlußläufers besteht der drehbar gelagerte Teil aus vielen geschlossenen Leiterschleifen, in denen aufgrund der vom Drehfeld induzierten Spannungen Ströme fließen. Das Magnetfeld dieser Ströme versucht, dem auslösenden Drehfeld zu folgen, so dass ein Drehmoment entsteht. Im Leerlauf ($M=0$) erreicht die Läuferdrehzahl n den Wert

$$n \approx n_0$$

Bei mechanischer Beanspruchung der Motorwelle bleibt n hinter dem Drehfeld zurück:

$$n = n_0 - \Delta n$$

Charakteristisch für den Betriebszustand ist

$$\frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\Delta n}{n_0} = s \quad (6)$$

s heißt "Schlupf".

Für $s > 0$ ($n < n_0$) eilt der Läufer nach; der Ständer nimmt Strom auf. Es kann ein Moment auf die Maschinenwelle übertragen werden: Motorbetrieb.

Für $s < 0$ ($n > n_0$) eilt der Läufer voraus; ein äußeres Drehmoment treibt ihn an. Der Ständer liefert Strom in die Versorgungsklemmen: Generatorbetrieb.

Eine theoretische Beschreibung der Maschine führt auf zwei wichtige Ergebnisse (Angabe ohne Beweis):

- a) Zwischen Drehmoment M und Drehzahl n (bzw. Schlupf s) besteht der in Bild 5 skizzierte Zusammenhang.

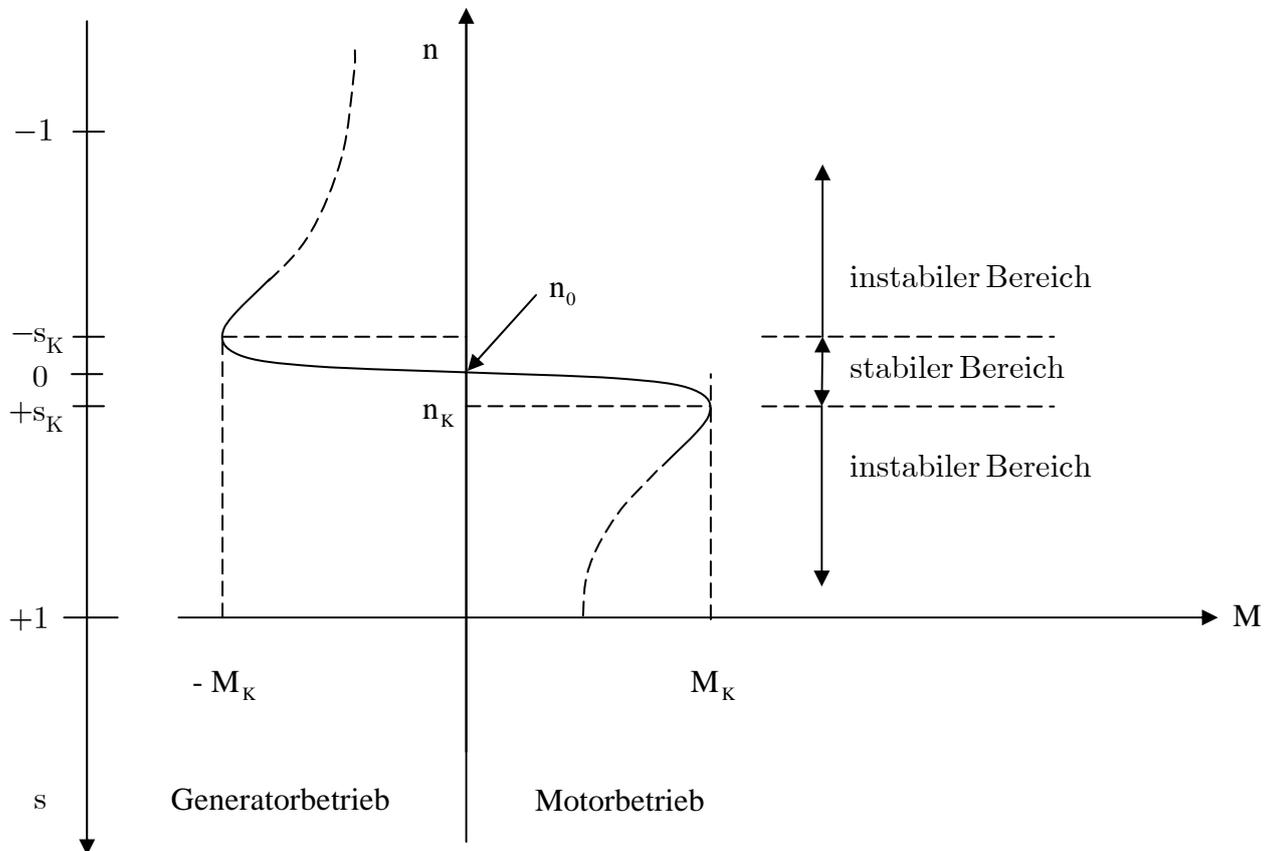


Bild 5

Ausgehend von der synchronen Drehzahl n_0 (kein Drehmoment an der Welle) nimmt die Drehzahl n mit steigender Motorlast zunächst nur geringfügig ab. Sie erreicht aber beim sog. Kippmoment einen kritischen Wert. Danach wird der Motor instabil und kommt zum Stillstand trotz hohen Ständerstroms. Entsprechendes gilt im Generatorbetrieb.

- b) Im stabilen Motorbetrieb gilt für das Drehmoment (ohne Beweis):

$$M = c_5 \cdot U^2 \cdot \frac{s}{n_0} \quad \text{oder} \quad M = c_5 \cdot U^2 \cdot \frac{n_0 - n}{n_0^2} \quad (7)$$

Aufgabe 2

Bei der Ansteuerung von Asynchronmotoren mit Hilfe der Leistungselektronik gelingt es, die Frequenz des Drehfeldes im Ständer zu verändern, um damit die Motordrehzahl bei gleichbleibendem Drehmoment zu steuern. Ziel ist also, die Kennlinie $n = n(M)$ aus Bild 5 entlang der n -Achse zu verschieben.

Als Kriterium für gleichbleibendes Drehmoment kann dabei dienen, dass M_k und die Drehzahldifferenz $(n_0 - n_k)$ erhalten bleiben.

In welchem Zusammenhang müssen unter dieser Bedingung U und n_0 in Gl (7) stehen?

Aufgabe 3

In welchem Zusammenhang stehen mechanische Leistung P_{mech} , Drehzahl n und Drehmoment M ?

Wie groß ist daher das Nennmoment M_N , wenn n_N und P_N aus dem Typenschild einer Maschine bekannt sind?

2.3 Zur Steuerung elektrischer Antriebe mit Stromrichtern

Stromrichter nennt man Schaltungen der Leistungselektronik, die die elektrische Leistung eines Eingangsnetzes (Quelle) in die Leistung eines andersgearteten Ausgangsnetzes (Verbraucher) umwandeln:

Gleichrichter wandeln Wechselspannungsnetze (ein- oder mehrphasig) in Gleichspannungsnetze.

Wechselrichter wandeln Gleichspannungsnetze in Wechselspannungsnetze (ein- oder mehrphasig).

Umrichter wandeln Wechselspannungsnetze in andere Wechselspannungsnetze mit Änderung der Frequenz und /oder der Phasenzahl.

2.3.1 Hinweis auf Gleichrichter

Bild 6a zeigt Prinzip und Grundbaustein des gesteuerten Gleichrichters: Der Thyristor als phasengesteuerter Schalter legt ein von α abhängiges Stück einer positiven Halbwelle an den Verbraucher. Ein Nachteil aller gesteuerten Gleichrichter ist der dem Gleichanteil überlagerte Wechselanteil.

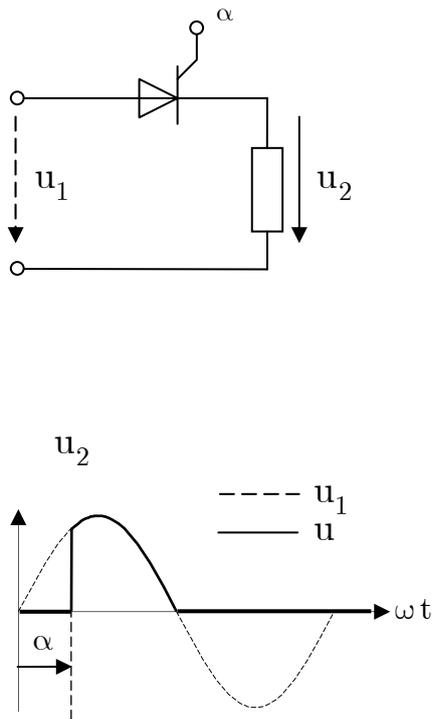


Bild 6a

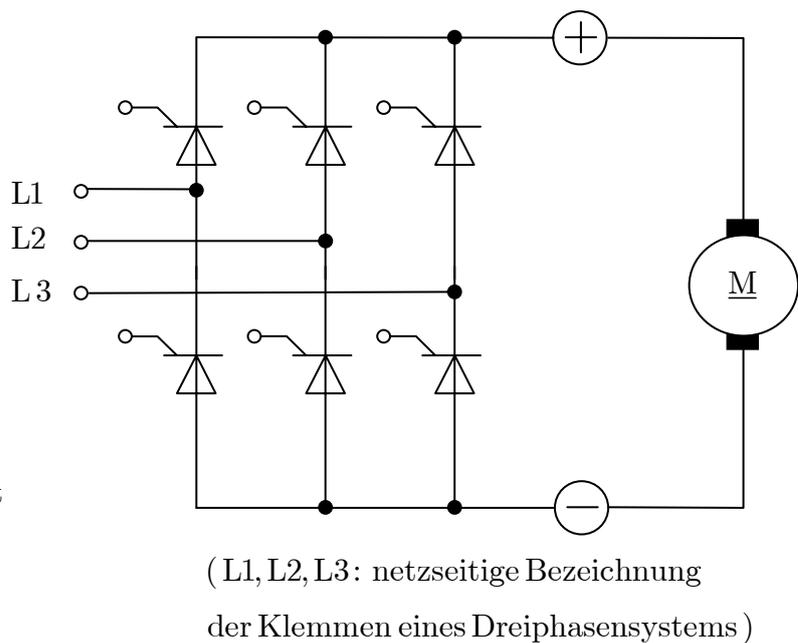
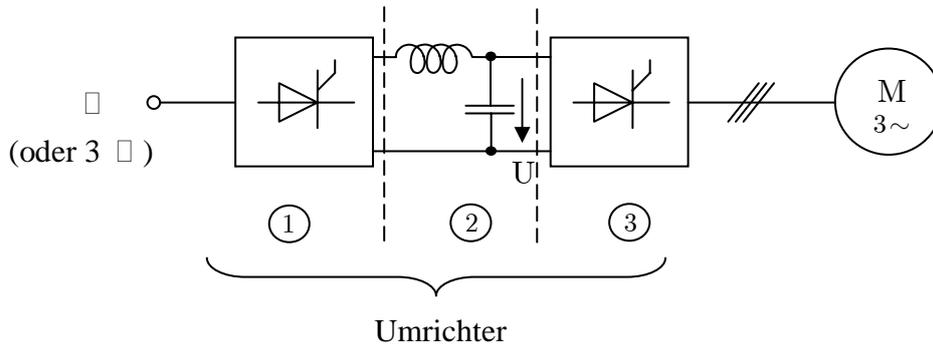


Bild 6b

Mit größerem Schaltungsaufwand kann man den Nachteil klein halten, z.B. mit der Thyristorbrücke in Bild 6b. Sie wird mit Drehstrom gespeist und legt innerhalb einer Periodendauer 6 Halbwellenanteile an das Ausgangsklemmenpaar. Dazu müssen die Thyristoren individuell mit Zündimpulsen versorgt werden, deren Phasenlagen relativ zum Netz die resultierende Gleichspannung bestimmen.

2.3.2 Hinweis auf Umrichter



- 1: Gleichrichter erzeugt Gleichspannung
- 2: Gleichspannungszwischenkreis mit Siebglied
- 3: Wechselrichter für Dreiphasensysteme mit ASM als Verbraucher

Bild 7

Umrichter setzen sich meistens aus Gleichrichter und Wechselrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis zusammen (vgl. Bild 7).

Im Wechselrichter wird die Gleichspannung im periodischen Wechsel an die Ausgangsklemmen gelegt. Die dabei gewählte Periodendauer stellt die Frequenz des Ausgangsnetzes ein. Dazuhin kann der Effektivwert variiert werden durch hochfrequentes Ein- und Austasten des Spannungsverlaufs mit veränderlichem Tastverhältnis.

Bild 8 zeigt einen von vielen möglichen Verläufen einer Phasenspannung.

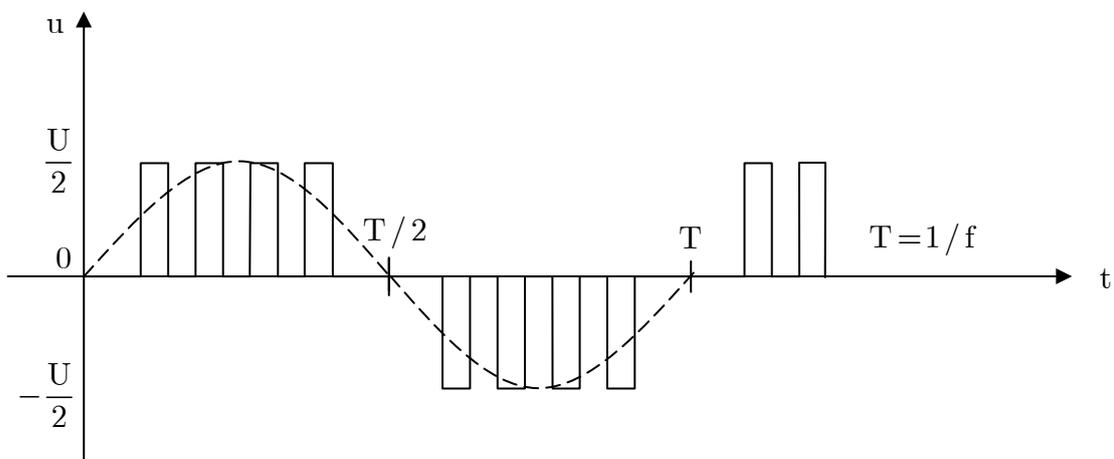


Bild 8

2.3.3 Schlussbemerkungen

Die hochfrequenten, energiereichen Spannungen, welche die angestrebten Gleich- und Wechselspannungen überlagern, schränken die Qualität der Betriebseigenschaften von Maschinen in beherrschbarem Maß ein.

Strom-, Spannungs- und Leistungsmessung werden ungenau oder aufwendig.

Das Versorgungsnetz und die elektromagnetische Feldumgebung erfahren starke Störungen.

3. Meßaufgaben und Auswertung

3.1 Die Meßanordnung

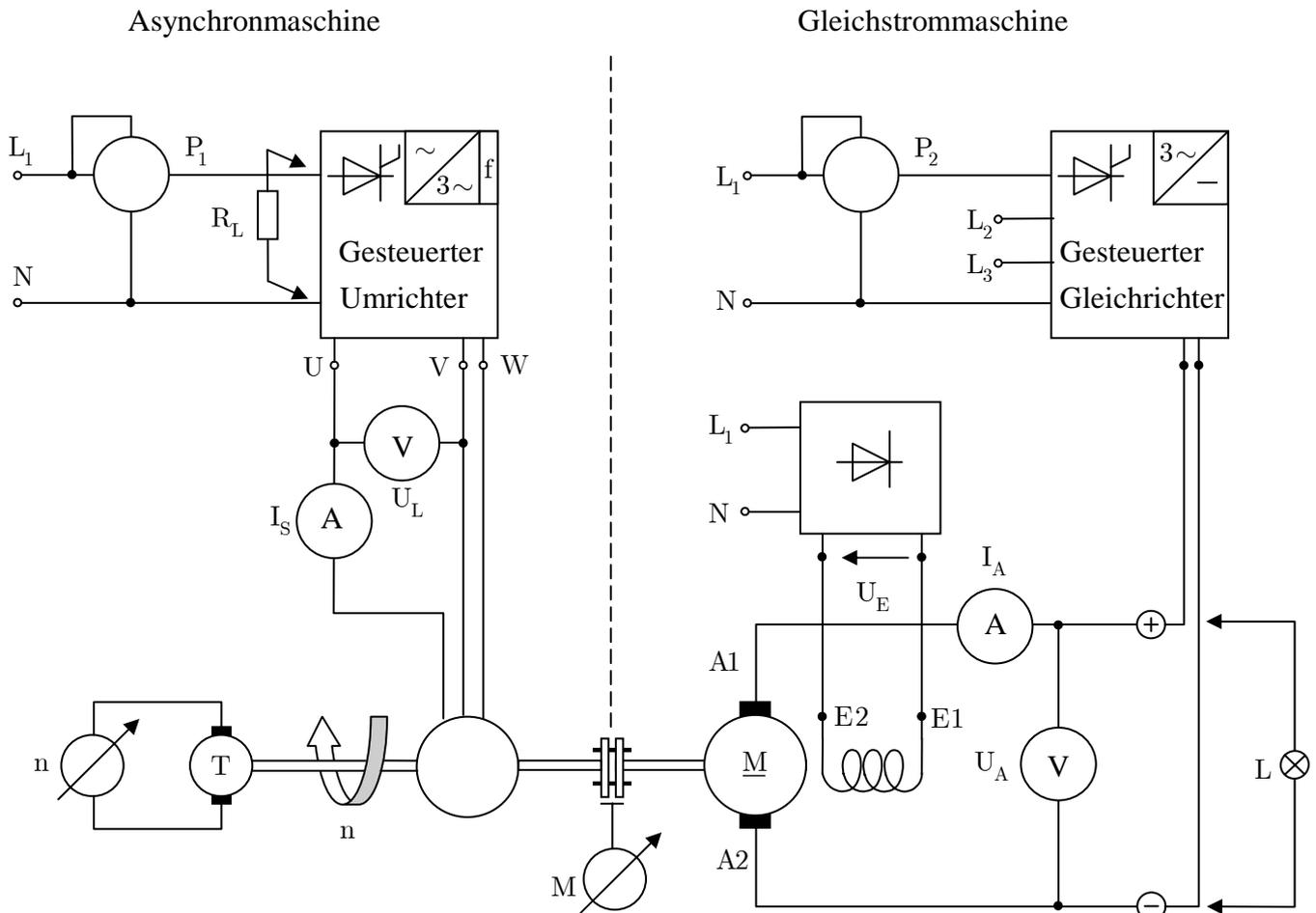


Bild 9

Bild 9 zeigt vereinfacht den Messaufbau:

Eine fremderregte Gleichspannungsmaschine wird von einem gesteuerten Gleichrichter mit stetig einstellbarer Gleichspannung versorgt. Spannung, Strom und Leistung kommen zur Anzeige. Eine Last L kann zugeschaltet werden.

Eine Drehstrom-Asynchronmaschine wird von einem gesteuerten Umrichter mit stetig einstellbarer Frequenz gespeist. Auf Netzseite wird die Wirkleistung gemessen, die der

Umrichter aufnimmt. Auf Motorseite werden ein Strangstrom und eine Außenleiter-
spannung jeweils als Effektivwert angezeigt. Im Generatorbetrieb wird eine Last R_L
zugeschaltet.

Beide Maschinen sind mechanisch gekoppelt. Jede Maschine läßt sich im Motor- und
Generatorbetrieb einsetzen. Die Versuche betreffen den Motorbetrieb; die jeweilige
Partnermaschine bildet im Generatorbetrieb die mechanische Last. Das dabei auftretende
Drehmoment M ist meßbar.

Ein Tachogenerator T ermöglicht die Messung der Drehzahl n der gekoppelten
Motorwellen.

3.2 Typenschild und Klemmbrett

Gleichstrommaschine	Asynchronmaschine
<ul style="list-style-type: none"> - Was sagt das Typenschild aus? - Wie groß ist das Nennmoment M_N? - Was sagt das Klemmenbrett aus? 	<ul style="list-style-type: none"> - Was sagt das Typenschild aus? - Wie groß ist das Nennmoment M_N? - Was sagt das Klemmenbrett aus? - Wie groß ist die Polpaarzahl p?

3.3 Die Gleichstrommaschine im Leerlauf

- Wie ändern sich Ankerstrom I_A und Leerlaufdrehzahl n_0 in Abhängigkeit von der
Ankerspannung U_A ?

3.4 Die Drehstromasynchronmaschine im Leerlauf

- Wie ändert sich am Umrichter die Leiterspannung U_L in Abhängigkeit von der
gewählten Frequenz f ?

- Wie ändern sich Strangstrom I_s und Leerlaufdrehzahl n_0 in Abhängigkeit von der
gewählten Frequenz f ?

3.5 Gleichstrommotor unter Last

- Ausgangspunkt : $n = n_0 = 1500 \text{ U/min}$, $M = 0$

(beide Maschinen im Leerlaufbetrieb)

- Nehmen Sie die Kennlinien auf:

$$n = n(M), I_A = I_A(M), U_A = U_A(M), P_2 = P_2(M), 0 \leq M \leq M_N$$

- Wie groß ist der Wirkungsgrad η_M des Motors?

- Welche Verluste treten im Gleichrichter auf?

- Vermindern Sie die Last auf $M = 0$ und erhöhen Sie anschließend die Drehzahl der ASM!

Wie verhält sich die Gleichstrommaschine?

3.6 Drehstrom - Asynchronmotor unter Last

- Ausgangspunkt: $n = n_0 = 1500 \text{ U/min}$, $M = 0$

Nehmen Sie die Kennlinien auf:

$$n = n(M), P_1 = P_1(M); 0 \leq M \leq M_N$$

- Wie groß ist der Wirkungsgrad des Motors?

(Verwenden Sie dazu die Übertragungskennlinie des Umrichters.)

- Vermindern Sie die Last auf $M=0$ und erhöhen Sie anschließend die Drehzahl der GM.

Wie verhält sich die Drehstrommaschine?

3.7 Umrichter und Gleichrichter

Beachten Sie die Oszillogramme der Ausgangssignale beider Schaltungen.