
M11

Der Universalmotor

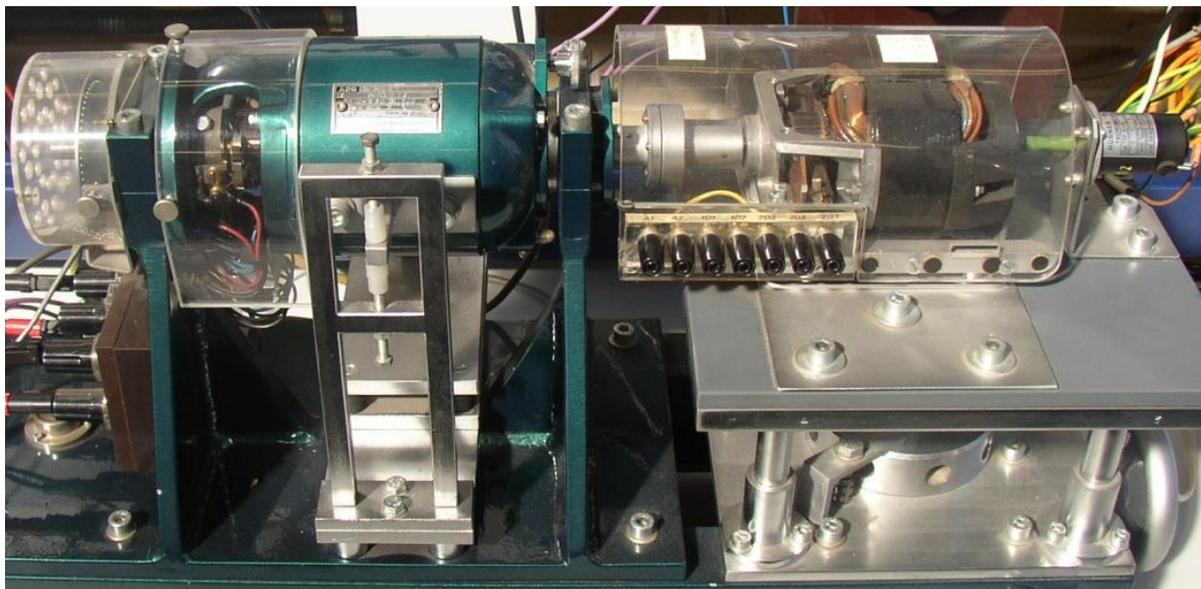


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Institut für
Elektrische
Energiewandlung

Versuchsanleitung



Universalmotor-Prüfstand

Inhaltsverzeichnis

1.	Aufbau der Gleichstrommaschinen	2
2.	Stationäres Betriebsverhalten	3
	2.1.Nebenschluss- und Fremderregung	4
	2.2.Hauptschlusserregung	5
3.	Änderung der Betriebsdrehzahl	7
	3.1.Änderung der Ankerspannung U_a	7
	3.1.1. Fremderregte Maschine	7
	3.1.2. Hauptschlusserregung	7
	3.2.Feldschwächung	8
	3.2.1. Nebenschluss- und Fremderregung	8
	3.2.2. Hauptschlusserregung	8
	3.3.Vorwiderstand im Ankerkreis	9
	3.3.1. Nebenschlussmaschine	9
	3.3.2. Hauptschlussmaschine	10
4.	Anlassverfahren	10
	4.1.Anlasswiderstand	11
	4.2.Verminderte Spannung	11
	4.3.Reihen-Parallelschaltung	11
5.	Einphasen-Reihenschlussmotor	12
	5.1.Verwendung	12
	5.2.Aufbau	12
	5.3.Drehmomentbildung	12
	5.4.Betriebsverhalten	13
6.	Versuchdurchführung - Messungen	16
	6.1.Belastungskennlinien	16
	6.2.Gleichstrom-Hauptschlussbetrieb (Bild 13)	16
	6.3.Wechselstrom-Hauptschlussbetrieb (Bild 14)	16
	6.4.Betrieb bei Gleichstrom-Fremderregung (Bild 15)	16
	6.5.Ausarbeitung	16
7.	Anhang	17

1. Aufbau der Gleichstrommaschinen

Den Aufbau einer 2-poligen Gleichstrommaschine zeigt Bild 1a. Der zugehörigen schematischen Darstellung Bild 1b sind die genormten Klemmenbezeichnungen zu entnehmen.

Die Erregerwicklung kann als Nebenschlusswicklung, als Hauptschlusswicklung oder für Fremderregung ausgeführt werden. Die Nebenschlusswicklung (Klemmenbezeichnung E1E2) mit großer Windungszahl und kleinem Leiterquerschnitt, also großem Innenwiderstand, ist dem Anker parallel geschaltet. Ihr Strom und das von diesem erregte Feld wird daher von der Netzspannung bestimmt. Da die Schaltung der Erregerwicklung maßgeblich für das Betriebsverhalten ist, wird eine Gleichstrommaschine mit Nebenschlusswicklung kurz „Nebenschlussmaschine“ genannt (Bild 2a).

Die mit der Ankerwicklung in Reihe geschaltete Haupt- oder Reihenschlusswicklung D1D2 ist bei kleiner Windungszahl aus Leitern großen Querschnitts aufgebaut, da sie den gesamten Ankerstrom der Maschine zu führen hat. Ihr Feld ist daher vom lastabhängigen Ankerstrom bestimmt. Entsprechend heißt eine solche Maschine „Haupt- oder Reihenschlussmaschine“.

Soll der Erregerstrom der Maschine stets unabhängig vom Ankerstrom und Ankerspannung sein, wird die Maschine für Fremderregung ausgeführt. Die Erregerspannung ist dann nicht unbedingt gleich der Ankerbemessungsspannung. In diesem Fall erhalten die Erregerklemmen die Bezeichnung F1F2. Selbstverständlich kann jedoch auch eine für Nebenschlussbetrieb ausgelegte Maschine fremderregt werden, wenn man ihre Erregerwicklung aus einer unabhängigen Spannungsquelle speist.

In manchen Fällen ist bei elektrischen Maschinen eine lastabhängige Stärkung oder Schwächung des Erregerfelds erwünscht. Man erreicht dies bei der Gleichstrommaschine durch eine Kombination von Haupt- und Nebenschlusswicklung.

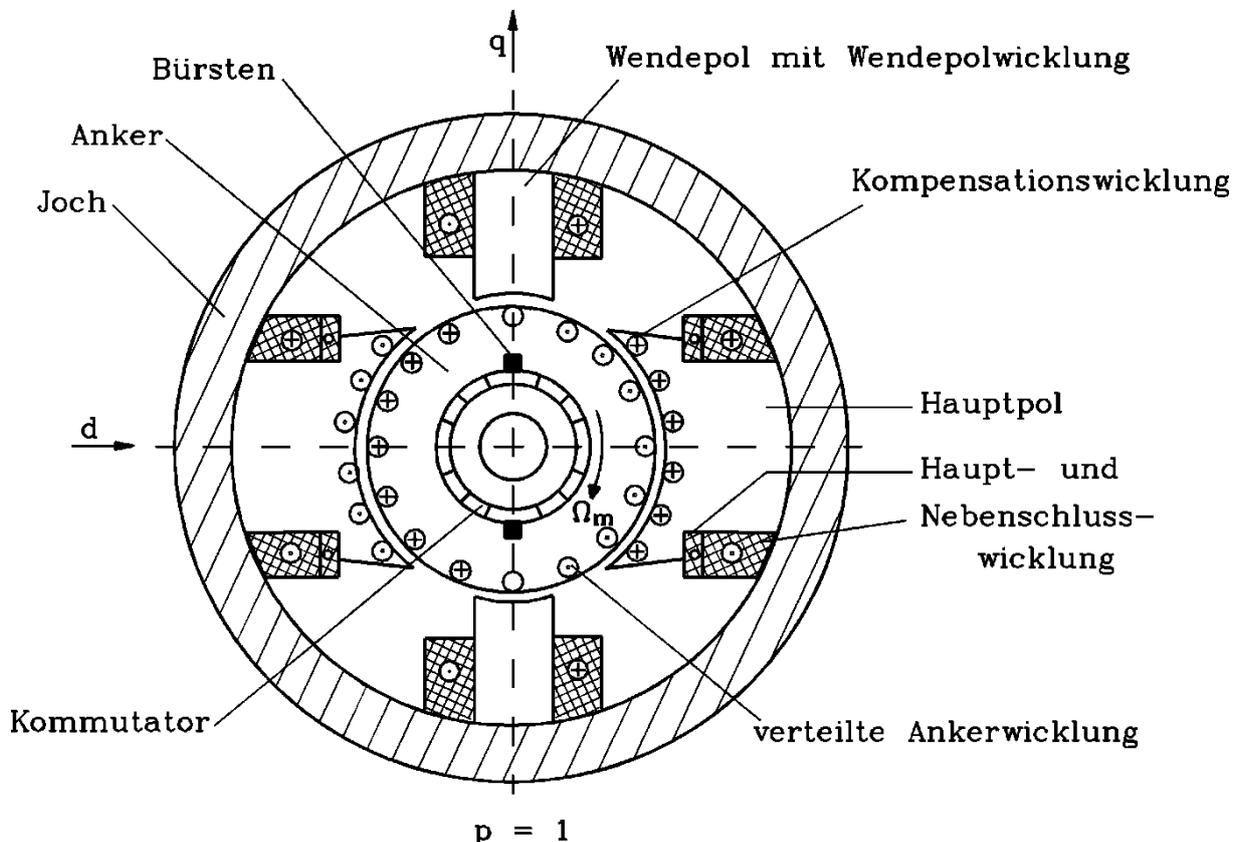


Bild 1a: Grundsätzlicher Aufbau einer Gleichstrommaschine

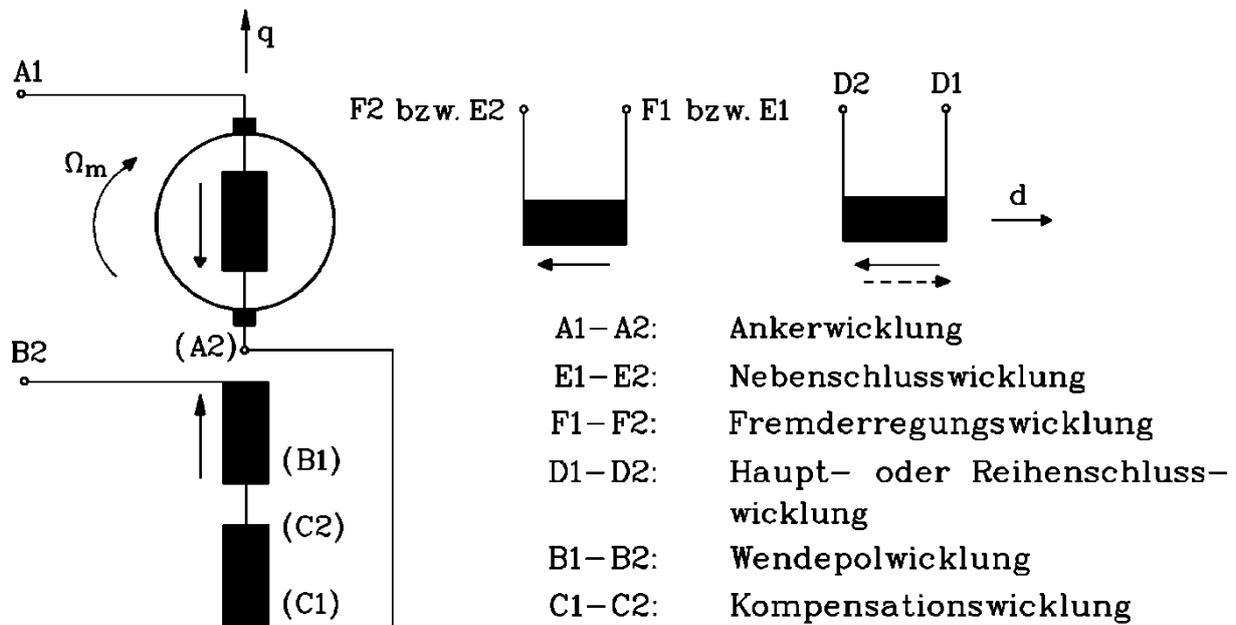


Bild 1b: Schematische Darstellung der Wicklungsanordnung Gleichstrommaschine

Die Hauptschlusswicklung D1D2 wird in diesem Fall „Kompoundwicklung“ genannt. Im einzelnen unterscheidet man je nach Wirkungsrichtung der Kompoundwicklung:

Mitcompoundierung:	Stärkung des Erregerfelds
Gegencompoundierung:	Schwächung des Erregerfeldes.

Dabei ist zu beachten, dass sich die Wirkung des die Kompoundwicklung durchfließenden Ankerstroms bezüglich des Erregerfelds umkehrt, wenn beim Wechsel zwischen Motor und Generatorbetrieb oder bei Drehrichtungsumkehr der Ankerstrom oder der Erregerstrom sein Vorzeichen wechselt. Folglich sind die Bezeichnungen mit- und Gegencompoundierung nur sinnvoll, wenn gleichzeitig Arbeitsweise und Drehrichtung angegeben werden (z. B. Motorbetrieb/Linkslauf).

Die Wicklung zwischen den Klemmen B1B2 wird stets mit der Ankerwicklung gegensinnig in Reihe geschaltet. Sie wird „Wendepolwicklung“ genannt und hat die Aufgabe, eine gute Kommutierung der Maschine zu ermöglichen.

Hochbeanspruchte Maschinen, insbesondere Motoren, deren Drehzahl durch Feldschwächung verändert wird, erhalten bereits bei mittleren Leistungen eine „Kompensationswicklung“. Sie soll den Ankerstrombelag im Bereich der Hauptpole kompensieren und liegt daher in besonderen Nuten der Polschuhe. Die Kompensationswicklung ist gleichachsig zur Wendepolwicklung angeordnet und mit dieser gleichsinnig geschaltet.

2. Stationäres Betriebsverhalten

Der durch die Wicklung E1E2 (bzw. D1D2 oder F1F2, Bild 1b) fließende Strom I_f erregt den „verketteten Hauptfluss“ Ψ_d . Bei Maschinen mit mehr als einem Polpaar ($p > 1$) führt man zweckmäßigerweise nicht den Fluß Ψ_d einer Polteilung in die Rechnung ein, sondern den „wirksamen verketteten Hauptfluss“:

$$\Psi_d = \bar{\Psi}_d = p \cdot \Psi_d$$

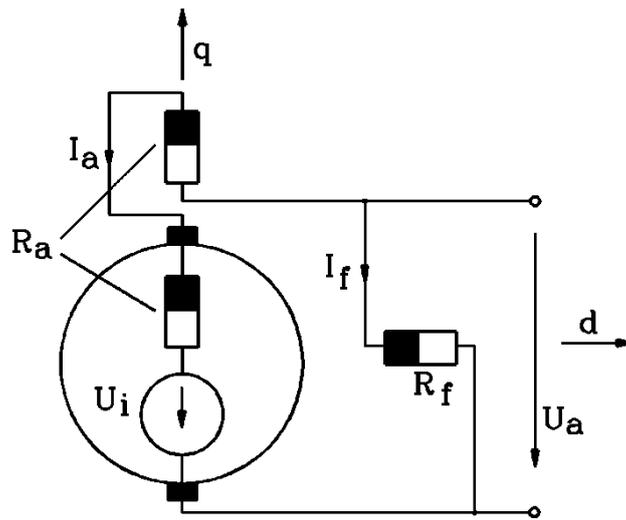


Bild 2a: Nebenschlusserregung

Zur Vereinfachung soll hier zunächst Linearität vorausgesetzt werden:

$$\Psi_d = \bar{\Psi}_d \sim I_f$$

Außerdem soll der Einfluss des Ankerstrombelags auf den Hauptfluss $\bar{\Psi}_d$, die sogenannte Ankerrückwirkung, vernachlässigt werden. Das tatsächliche Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine, welches die Messungen zeigen, weicht im allgemeinen erheblich von demjenigen ab, welches hier unter den angegebenen Vereinfachungen hergeleitet wird.

Zum Vergleich sind zu den jeweils theoretisch entwickelten Kennlinien die tatsächlich messbaren hinzugefügt. In letzteren wird der Einfluss der gekrümmten Magnetisierungscharakteristik des Eisens bzw. der Ankerrückwirkung deutlich.

Aus den Schaltbildern 2a bis 2c ergibt sich für alle Schaltungsarten aus dem Maschenumlauf für den stationären Zustand:

$$U_a = U_i + I_a R_a \quad (\text{bei der Hauptschlussmaschine für } R_f \ll R_a) \quad (1)$$

Mit der Definitionsgleichung für die Rotationsspannung („induzierte Spannung“)

$$U_i = \bar{\Psi}_d \cdot \Omega_m \quad (2)$$

zeigt sich, dass bei konstanter Ankerspannung U die Drehzahl n bzw. die mechanische Kreisfrequenz $\Omega_m = 2\pi n$ dem Fluß $\bar{\Psi}_d = \Psi_d$ umgekehrt proportional ist:

$$\Omega_m = \frac{U_a}{\bar{\Psi}_d} - \frac{I_a R_a}{\bar{\Psi}_d} = \Omega_{m0} - \Delta\Omega_m \quad (3)$$

2.1. Nebenschluss- und Fremderregung

Hier bleibt der Erregerstrom I_f bei unveränderter Spannung U_a konstant, wenn nicht über einen Feldsteller von außen eingegriffen wird. Die Drehzahl der Maschine hängt damit wegen

$$I_{aN} R_a \ll U_{aN}$$

nur wenig vom Ankerstrom I_a ab. Die Funktion der Drehzahl vom Moment, die sogenannte Drehzahlcharakteristik $\Omega_m = f(M_e)$, erhält man durch Einsetzen der Beziehung (4) in Gleichung (3).

$$M_e = \bar{\Psi}_d \cdot I_a \quad (4)$$

$$\Omega_m = \frac{U_a}{\bar{\Psi}_d} - \frac{M_e R_a}{\bar{\Psi}_d^2} = \Omega_{mo} - \Delta\Omega_m \quad (5)$$

Der Drehzahlabfall $\Delta\Omega_m$ des belasteten Gleichstrom-Nebenschlussmotors ist demnach klein und dem Moment M_e proportional (Bild 3a).

2.2. Hauptschlusserregung

Da die Maschine vom Ankerstrom auch erregt wird, gilt unter den angegebenen Vereinfachungen:

$$\begin{aligned} \psi_d = \bar{\Psi}_d &= k \cdot \bar{M}_d \cdot I = c \cdot I \text{ mit} \\ c &= \bar{M}_d \cdot k \end{aligned} \quad (6)$$

\bar{M}_d : wirksame Gegeninduktivität zwischen Feld und Anker

$k = \frac{I_f}{I}$: Feldschwächungsgrad ($k \leq 1$)

und damit bei Vernachlässigung von R_f wegen $R_f \ll R_a$:

$$\Omega_m = \frac{U_a}{\bar{\Psi}_d} - \frac{I \cdot R_a}{\bar{\Psi}_d} = \frac{U_a}{cI} - \frac{R_a}{c} = \Omega_{mo} \cdot \frac{I_N}{I} - \Delta\Omega_m \quad (7)$$

I_N : Bemessungsstrom der Maschine

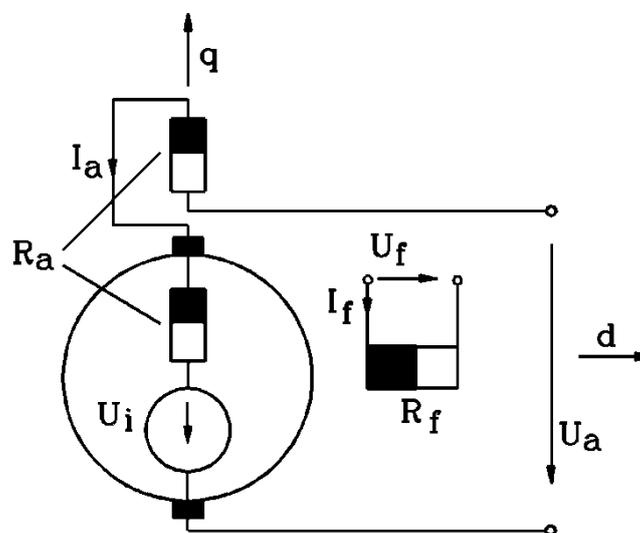


Bild 2b: Fremderregung

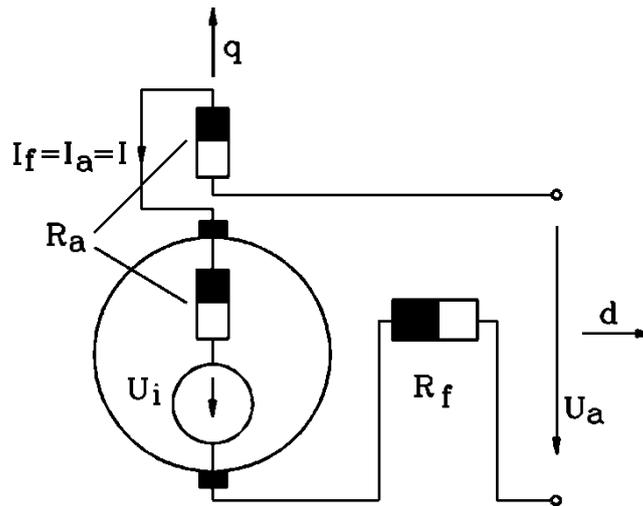


Bild 2c: Hauptschlusserregung

Ω_{m0} : Mechanische Kreisfrequenz, die eine gleiche Maschine mit Nebenschlusswicklung im Leerlauf bei Bemessungserregung hätte.

$\Delta\Omega_m$: Durch den ohmschen Widerstand R_a verursachte Drehzahlabfall. Er ist bei der Hauptschlussmaschine stromunabhängig. Bei widerstandsfrei angenommener Erregerwicklung ist er gleich dem Drehzahlabfall der vergleichbaren Nebenschluss-Maschine im Bemessungspunkt. Somit haben beide Maschinen bei sonst gleicher Auslegung auch gleiche Bemessungsdrehzahl.

Die Abhängigkeit der Drehzahl vom Belastungsmoment ergibt sich mit der aus (4) und (6) gewonnenen Beziehung (8):

$$M_e = cI^2 \quad (8)$$

$$\Omega_m = \Omega_{m0} \sqrt{\frac{M_{eN}}{M_e}} - \Delta\Omega_m \quad (9)$$

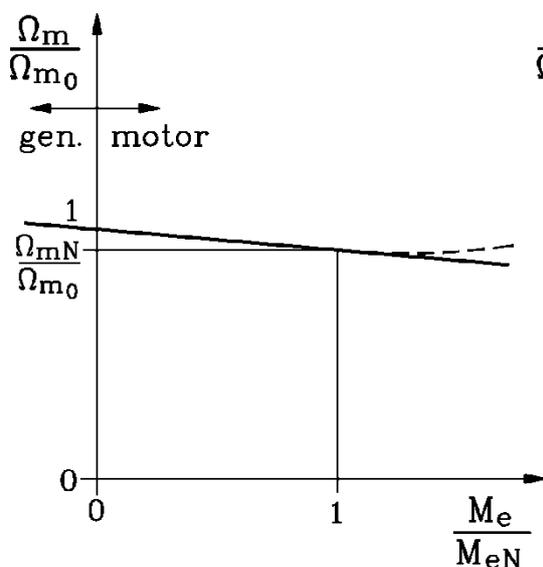


Bild 3a: Nebenschlussmaschine

(gestrichelt: mit zusätzlicher Eisensättigung durch das Ankerfeld)

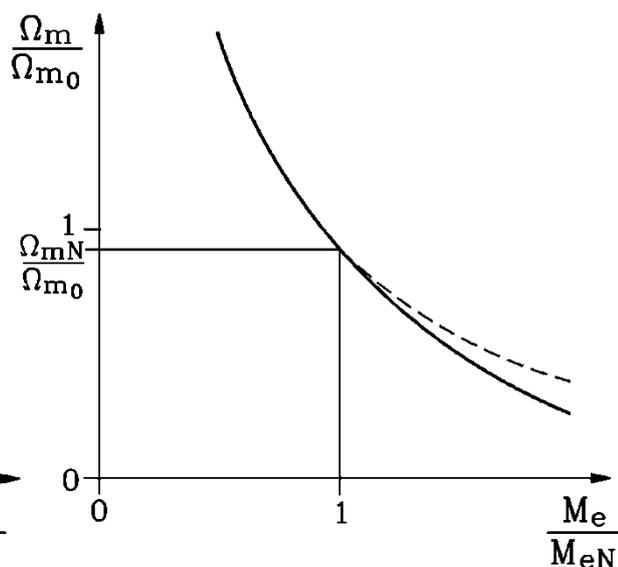


Bild 3b: Hauptschlussmotor

Die Drehzahl der Hauptschlussmaschine ist also stark vom Moment abhängig. Dies nennt man „weiches Verhalten“ einer Maschine. Ihre Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie stellt eine um $\Delta\Omega_m = \frac{R_a}{c}$ gegen die Momenten-Achse versetzte Hyperbel dar (Bild 3b).

Die Leerlaufdrehzahl des Hauptschlussmotors geht mit abnehmendem Moment theoretisch gegen Unendlich. Die praktisch erreichte Leerlaufdrehzahl liegt wegen der stets vorhandenen Reibungs-, Ventilations- und Eisenverluste des Rotors bei endlichen Werten. Sie ist aber doch selbst bei kleineren Maschinen so hoch, dass diese durch die entstehenden Fliehkräfte beschädigt oder zerstört werden können. Da dies auch mit Gefahren für Personen verbunden sein kann, dürfen Hauptschlussmotoren z. B. niemals über Riemen gekuppelt werden.

3. Änderung der Betriebsdrehzahl

Entsprechend Gl. (5)

$$\Omega_m = \frac{U_a}{\Psi_d} - M_e \frac{R_a}{\Psi_d^2}$$

ergeben sich folgende drei grundsätzliche Möglichkeiten einer Drehzahlstellung:

3.1. Änderung der Ankerspannung U_a

Die Drehzahleinstellung durch Verändern der Ankerspannung ist verlustlos, aber mit hohem Aufwand verbunden, da jeder Antrieb eine eigene einstellbare Spannungsquelle benötigt.

3.1.1. Fremderregte Maschine

Bei veränderlicher Ankerspannung im Bereich $0 \leq U_a \leq U_{aN}$ wird die Maschine durch einen konstanten Erregerstrom aus einer besonderen Erregerspannungsquelle voll erregt ($\psi_d = \bar{\Psi}_d = \bar{\Psi}_{dN}$).

Die Leerlaufdrehzahl ist der Ankerspannung U_a proportional. Der Drehzahlabfall $\Delta\Omega_m$ zwischen Leerlauf und Vollast bleibt in seiner absoluten Größe stets erhalten (Parallelverschiebung der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie, Bild 4a). Jede Drehzahl zwischen Stillstand und Bemessungsdrehzahl Ω_{mN} kann bei beliebigem Moment eingestellt werden.

3.1.2. Hauptschlusserregung

Aus Gl. (7) entsprechend Gl. (5)

$$\Omega_m = \frac{U_a}{c \cdot I} - \frac{R_a}{c} = \frac{U_a}{\sqrt{c \cdot M_e}} - \frac{R_a}{c} \quad (10)$$

entnimmt man, dass die Änderung von U_a eine Hyperbelschar für $\Omega_m = f(M_e)$ liefert. (Bild 4b).

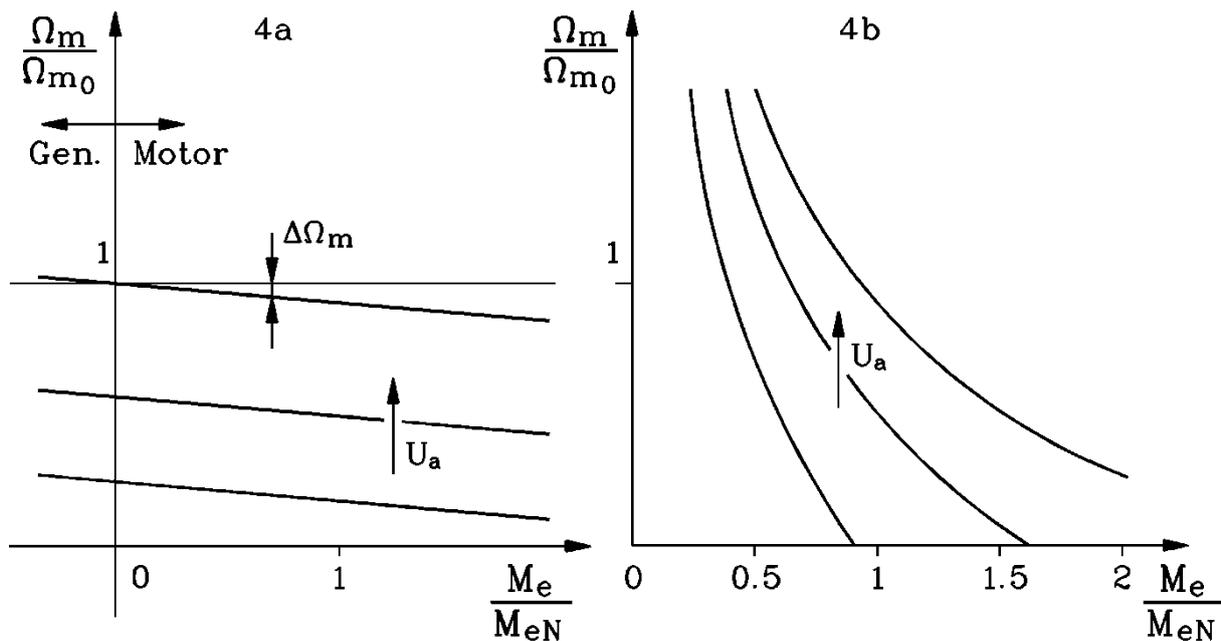


Bild 4: Drehzahländerung durch Ankerspannungsänderung im Bereich:

a. Fremderregung

$$0 < \Omega_m \leq \Omega_{m0} \text{ für } 0 < U_a \leq U_{aN}$$

$$\bar{\Psi}_d = \bar{\Psi}_{dN}$$

b. Hauptschlusserregung

$$0 < U_a \leq U_{aN}$$

$$k = 1$$

3.2. Feldschwächung

Die Einstellung einer Drehzahl oberhalb der Grunddrehzahl Ω_{m0} ist durch Verringerung des Hauptflusses $\psi_d = \bar{\Psi}_d$ möglich und kann z. B. durch Verwendung von Vor- bzw. Nebenwiderständen im Erregerkreis erreicht werden (Gl. (5) und Gl. (7)). Wegen der kleinen Erregerleistung (bezogen auf die Bemessungsleistung der Maschine) bleibt die dabei entstehende Verlustleistung so gering, dass auch diese Art der Drehzahleinstellung als praktisch verlustfrei angesehen werden kann. Es ist jedoch zu beachten, dass mit wachsender Drehzahl u. U. der maximale zulässige Ankerstrom abnimmt, wenn eine einwandfreie Kommutierung gefordert wird.

3.2.1. Nebenschluss- und Fremderregung

Die Feldschwächung geschieht hier in einfacher Weise durch Verringerung des Erregerstroms I_f (Vorwiderstand oder Stromrichter). Da der zweite Term in Gl. (5)

$$\Omega_m = \frac{U_a}{\bar{\Psi}_d} - M_e \cdot \frac{R_a}{\bar{\Psi}_d^2}$$

eine quadratische Abhängigkeit vom Fluß $\psi_d = \bar{\Psi}_d$ aufweist, ergibt sich mit zunehmender Feldschwächung eine stärkere Drehzahländerung bei Belastung (Bild 5a).

3.2.2. Hauptschlusserregung

Eine Feldschwächung bei der Hauptschlussmaschine ist möglich:

- a) durch Parallelschalten eines ohmschen Widerstandes zur Feldwicklung („Shunt“). Auf die damit verbundenen Probleme beim nichtstationären Betrieb der Maschine wird in der Versuchsanleitung näher eingegangen.
- b) durch Umschalten einer angezapften Feldwicklung.

Dies bedeutet in beiden Fällen, dass in Gl. (10)

$$\bar{\Omega}_m = \Omega_m = \frac{U_a}{c \cdot I} - \frac{R_a}{c} = \frac{U_a}{\sqrt{c \cdot M_e}} - \frac{R_a}{c}$$

die Konstante c verkleinert wird. Das zugehörige Kennlinienfeld ist in Bild 5 dargestellt.

3.3. Vorwiderstand im Ankerkreis

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Möglichkeiten ist diese Art der Drehzahländerung nicht verlustfrei. Hinzu kommt, dass bei der Nebenschlussmaschine der lastabhängige Drehzahlabfall $\Delta\Omega_m$ erhöht wird.

3.3.1. Nebenschlussmaschine

Mit dem Vorwiderstand R_{v2} im Ankerkreis wird aus Gl. (5):

$$\Omega_m = \frac{U_a}{\Psi_d} - M_e \frac{(R_a + R_{va})}{\Psi_d^2} = \Omega_{m0} - \Delta\Omega_m \quad (11)$$

Zu beachten ist, dass sich die Drehzahl bei abnehmender Last trotz Verwendung von Vorwiderständen stets der Leerlaufdrehzahl der direkt am Netz liegenden Maschine nähert (Bild 6a).

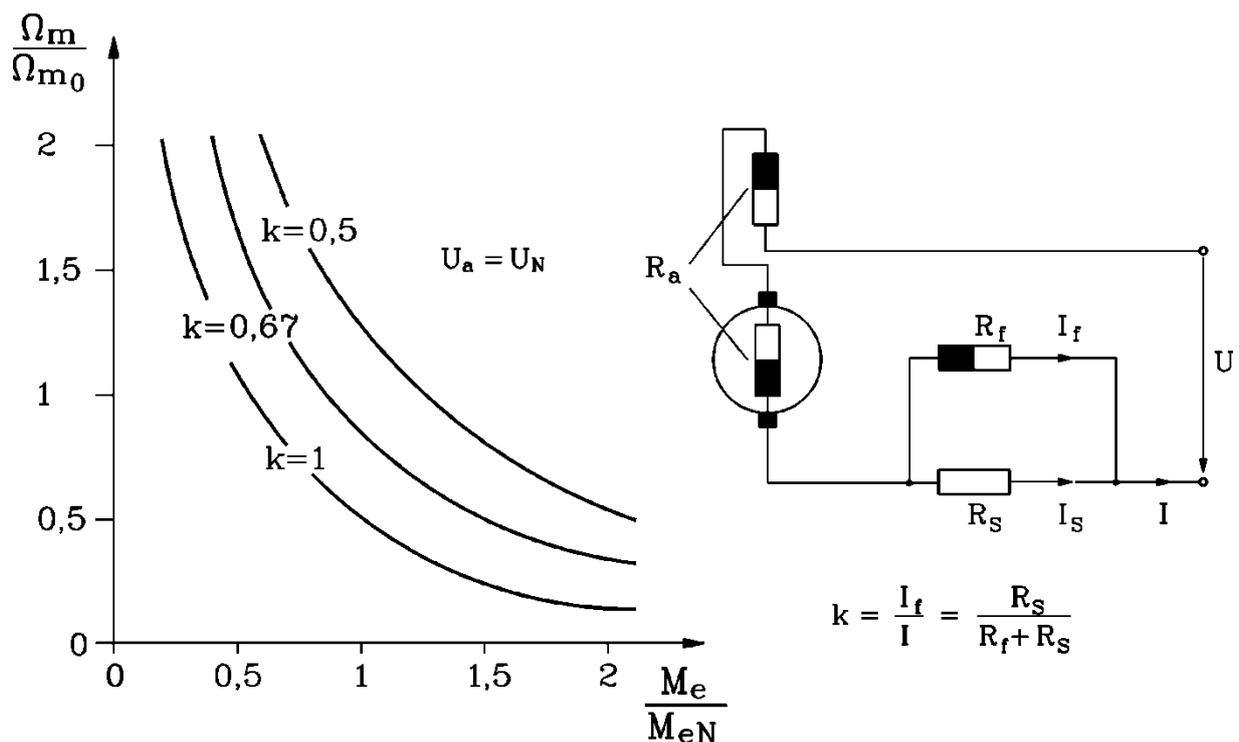


Bild 5: Feldschwächung beim Hauptschlussmotor durch einen „Shunt“ R_s

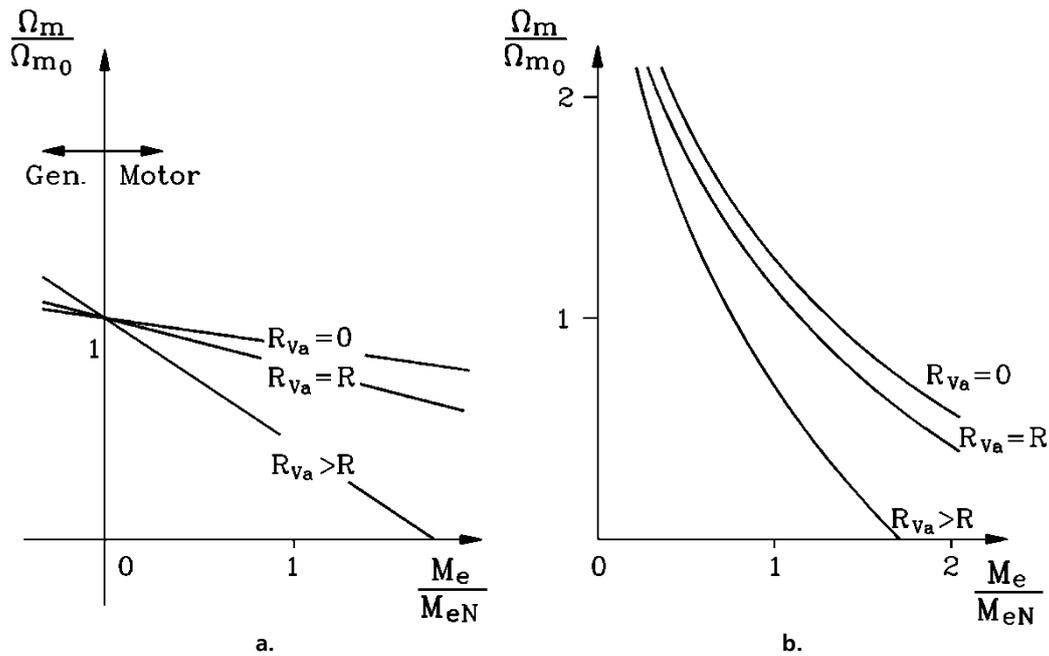


Bild 6: Drehzahländerung bei Vorwiderstand R_{v2} im Ankerkreis: a. Nebenschlussmaschine; b. Hauptschlussmotor

3.3.2. Hauptschlussmaschine

Ganz analog erhält man für die Hauptschlussmaschine aus Gl. (7):

$$\Omega_m = \frac{U_a}{c \cdot I} - \frac{(R_a + R_{va})}{c} = \Omega_{m0} \sqrt{\frac{M_{eN}}{M_e}} - \Delta\Omega_m \quad (12)$$

Es zeigt sich, dass durch Einschalten eines Vorwiderstands die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie parallel zur Drehzahlachse zu kleineren Drehzahlen hin verschoben wird (Bild 6b).

4. Anlassverfahren

Im Augenblick des Einschaltens kann der stillstehende Motor noch nicht die Rotationsspannung U_i aufbringen, so dass der Ankerstrom nur durch den ohmschen Widerstand R_a im Ankerkreis bestimmt wird:

$$U_a = U_i + R_a \cdot I_a, \text{ wobei } U_i = \bar{\Psi}_d \cdot \Omega_m = 0 \text{ für } \Omega_m = 0$$

also
$$I_a = \frac{U_a}{R_a}$$

Wegen der geringen Größe von R_a kann der Anfahrstrom bei direkter Einschaltung Werte annehmen, die beim 10-fachen des Bemessungsstroms und höher liegen. Sie sind daher für Netz und Maschine unzulässig und werden üblicherweise durch folgende Maßnahmen begrenzt:

4.1. Anlasswiderstand

Ein Vorwiderstand im Ankerkreis („Anlasswiderstand“) wird stufenweise kurzgeschlossen und begrenzt somit den Anfahrstrom während des Hochlaufs der Maschine auf $1,5 \cdot I_{aN}$ oder weniger.

4.2. Verminderte Spannung

Dem stillstehenden Motor wird zunächst verminderte Ankerspannung zugeführt, die während des Hochlaufs auf Bemessungsspannung gesteigert wird. Wegen des erheblichen Aufwands werden die entsprechenden Verfahren nur dann verwendet, wenn zusätzlich eine einstellbare Drehzahl gefordert wird. Auch ist dann Nebenschlussbetrieb ausgeschlossen.

4.3. Reihen-Parallelschaltung

Diese Möglichkeit wird vorwiegend bei elektrischen Bahnen genutzt, da mindestens zwei gleiche Motoren vorhanden sein müssen. Zum Anfahren werden gleichgroße Maschinen (-gruppen) in Reihe, danach parallel geschaltet. Im Gegensatz zu den weitgehend stetigen Verfahren 4.1 und 4.2 ist die Reihen-Parallelschaltung grobstufig und muss durch Verwendung von Vorwiderständen verbessert werden.

5. Einphasen-Reihenschlussmotor

5.1. Verwendung

Einphasen-Reihenschlussmotoren werden bis zu einer Leistung von ca. 1 MW als Bahnmotoren verwendet. In stark vereinfachter Ausführung werden Motoren gleicher Wirkungsweise („Universalmotoren“) für Kleingeräte verwendet, wenn kein dreiphasiger Anschluss zur Verfügung steht und ein geringes Leistungsgewicht in Kauf genommen werden kann (Elektrowerkzeuge, Küchengeräte, usw.)

5.2. Aufbau

Solche Kleinmotoren unterscheiden sich von kleinen Gleichstrommotoren im Wesentlichen durch den geblechten Stator. Sie werden ausschließlich zweipolig ohne Wendepol- und Kompensationswicklung ausgeführt.

5.3. Drehmomentbildung

Für den Augenblickswert des Drehmoments gilt analog zur Gleichstrommaschine:

$$m_e(t) = \bar{\psi}_d(t) \cdot i_a(t)$$

Allerdings sind Fluß und Strom beim Einphasenmotor netzfrequente Wechselgrößen, so dass auch im stationären Betrieb das Moment zeitabhängig ist:

$$m_e(t) = \hat{\Psi}_d \cdot \sin(\omega t) \cdot \hat{i}_a \cdot \sin(\omega t + \alpha)$$
$$m_e(t) = \hat{\Psi}_d \cdot \hat{i}_a \cdot [\sin^2(\omega t) \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \sin(2\omega t) \cdot \sin \alpha]$$

Das Drehmoment enthält zwei Anteile. Der erste pulsiert nach einer Sinusquadratfunktion zwischen Null und einem Höchstwert, während der zweite nach einer Sinusfunktion mit doppelter Netzfrequenz und halber Amplitude um den Wert Null schwingt (Bild 7). Der Mittelwert des Moments ergibt sich zu:

$$M_e = \frac{1}{2} \hat{\Psi}_d \cdot \hat{i}_a \cdot \cos \alpha$$
$$= \bar{\Psi}_d \cdot I_a \cdot \cos \alpha, \quad (\bar{\Psi}_d, I_a : \text{Effektivwerte})$$

Für den anzustrebenden Sonderfall $\alpha = 0$ (Strom und Fluß in Phase) treten keine negativen Momente auf. Außerdem wird dann das mittlere Moment maximal. Dies ist bei Reihenschaltung von Anker- und Feldwicklung praktisch erreichbar, nicht aber bei Parallelschaltung, da dann wegen der recht großen Induktivität der Erregerstrom i_f und somit auch der Fluß $\psi_d = \bar{\Psi}_d$ um fast 90° der Netzspannung nacheilt, während der Ankerstrom praktisch mit der Netzspannung in Phase bleibt. Somit ist nur die Reihenschaltung technisch brauchbar, bei der aber auch eine geringe Phasenverschiebung zwischen Hauptfluß und drehmomentbildendem Ankerstrom vorhanden ist. Diese entsteht infolge der Überlagerung des von der Erregerwicklung verursachten Flusses ($\bar{M}_d \cdot I$)

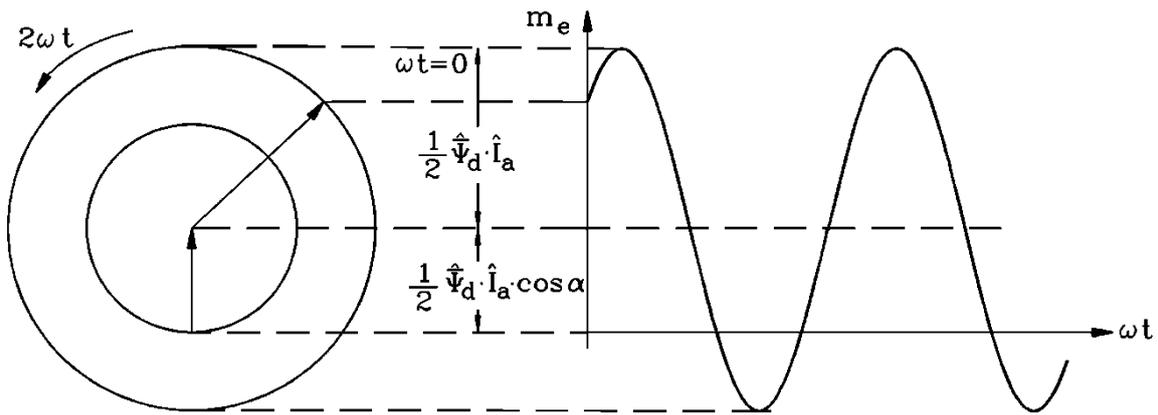


Bild 7: Zeitlicher Verlauf des Drehmoments eines Einphasenmotors

mit dem Flussanteil, der von der gerade durch die Bürsten kurzgeschlossenen, kommutierenden Spule erzeugt wird.

5.4. Betriebsverhalten

Aus Bild 8 folgt für den Spannungsumlauf und die Rotationsspannung:

$$\underline{U} = \underline{U}_i + \underline{I} \cdot \underline{Z}_{ges} \quad (13)$$

$$|\underline{U}_i| = \Omega_m \cdot |\underline{\Psi}_d| = \Omega_m \cdot \overline{M}_d \cdot |\underline{I}| \cdot \cos \alpha \quad (14)$$

Einsetzen von Gl. (14) in Gl. (13) führt auf die Gleichung für den Strom:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{(R_{ges} + 2\pi m \cdot \overline{M}_d \cdot \cos \alpha) + j X_{ges}} \quad (15)$$

Bei den folgenden Betrachtungen wird der sowieso kleine Phasenwinkel vernachlässigt ($\cos \alpha = 1$). Er ist in Bild 9 über der Drehzahl sowie als Stromortskurve (Bild 10) dargestellt.

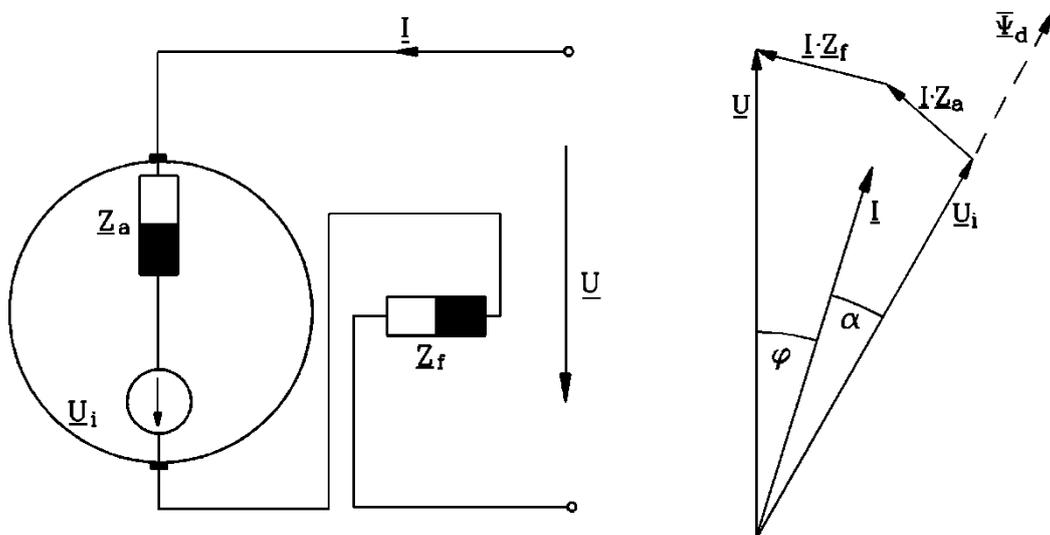


Bild 8: Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm des Einphasen-Reihenschlussmotors ohne den Einfluss der kommutierenden Spule

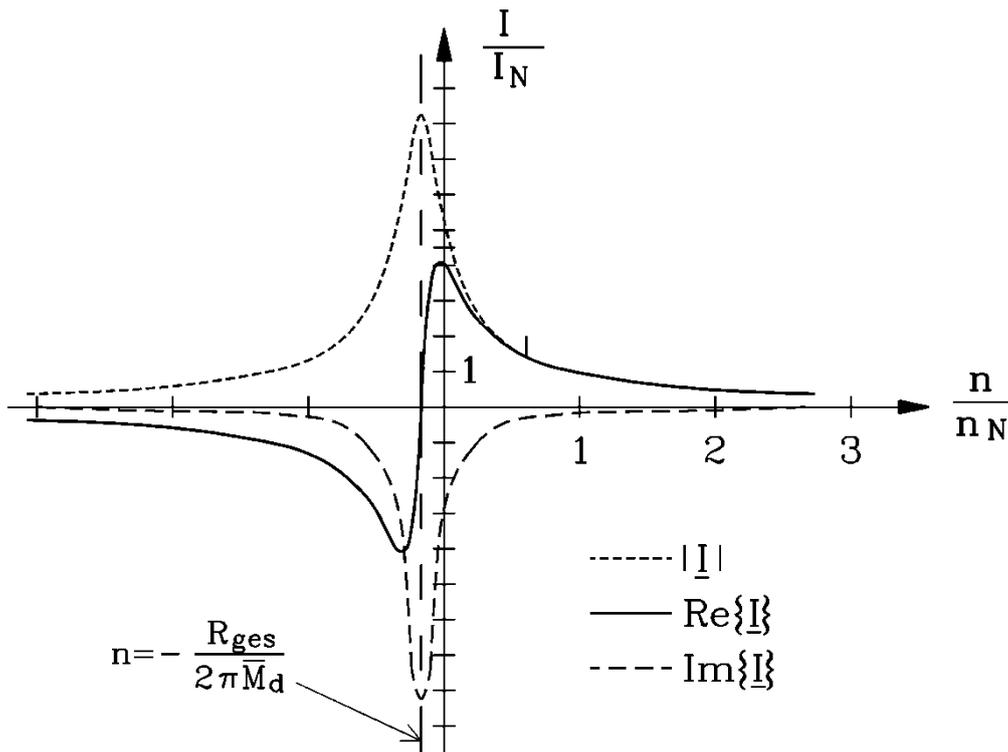


Bild 9: Realteil, Imaginärteil und Betrag des Maschinenstroms

Aus der in Bild 10 dargestellten Stromortskurve kann man folgende Betriebseigenschaften der Wechselstrom-Reihenschlussmaschine besonders gut erkennen:

- Die Maschine entwickelt wegen $M_e = \bar{\Psi}_d \cdot I = \bar{M}_d \cdot I^2$ ihr größtes Drehmoment in dem Betriebspunkt in dem maximaler Strom entsteht, nämlich bei $n = -\frac{R_{ges}}{M_d \cdot 2\pi}$. Die Maschine nimmt aber dann nur Blindleistung auf.
- Im Bereich $-\frac{R_{ges}}{M_d \cdot 2\pi} < n < 0$ arbeitet die Maschine im Gegenstrom-Bremsbetrieb, da aufgrund der negativen Drehzahl $P_m < 0$ (Leistungsaufnahme an der Welle) und wegen des positiven Realteils des Stroms $P_e > 0$ (Leistungsaufnahme vom Netz) ist.

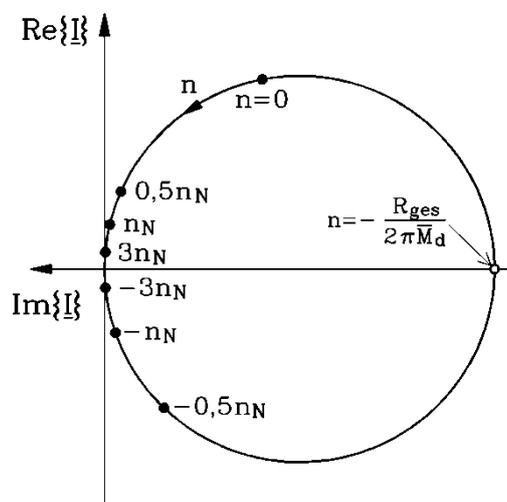


Bild 10: Stromortskurve

c) Bei motorischem Betrieb nähert sich mit steigender Drehzahl der $\cos\varphi$ dem Wert 1. Daher sind die Unterschiede im Maschinenverhalten für Gleich- und Wechselspannungsspeisung bei hohen Drehzahlen gering.

Die Drehzahl-Drehmomentkennlinie (Bild 11) lässt sich mit Hilfe von Gl. (15) errechnen:

$$M_e(\Omega_m) = \bar{M} \cdot I \cdot (\Omega_m)^2 = \bar{M} \cdot \frac{U^2}{(R_{ges} + 2\pi \cdot n \cdot \bar{M})^2 + X_{ges}^2} \quad (16)$$

Da die Wechselstrom- Reihenschlussmotoren trotz zusätzlich durch die Wechselstromspeisung erschwelter Kommutierung aus Preisgründen ohne Wendepole ausgeführt werden, „verschaltet“ man den Kommutator so mit der Ankerwicklung, dass der Strom in den einzelnen Ankerspulen kommutiert wird, noch bevor diese die geometrisch neutrale Zone erreicht haben. Dies entspricht einer Bürstenverschiebung um einige Kommutatorlamellen in Gegendrehrichtung. Die Güte der Kommutierung ist somit abhängig von der Drehrichtung des Rotors, so dass diese nicht ohne weiteres durch Umpolen der Feldwicklung geändert werden darf.

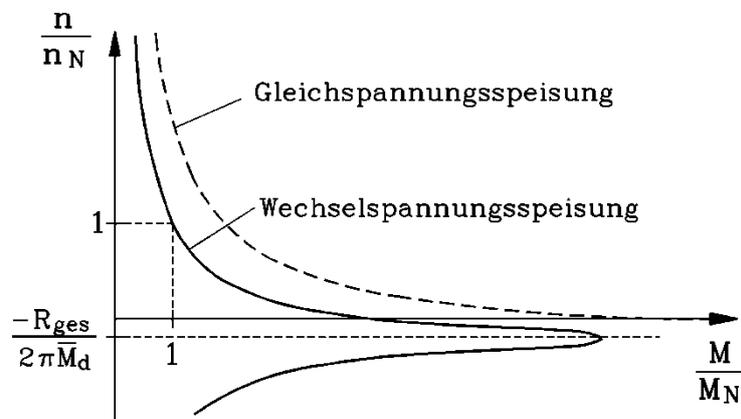


Bild 11: Drehzahl – Drehmoment – Kennlinie der Reihenschlussmaschine für Gleich- und Wechselspannungsspeisung

6. Versuchdurchführung - Messungen

6.1. Belastungskennlinien

Es ist jeweils die Kennlinie

$$n = f(M_m) \text{ bis } I_{\max} = 2,0 \text{ A}$$

$$n = f(M_m) \text{ bis } n_{\max} = 10.000 \text{ min}^{-1}$$

direkt aufzunehmen. Das Belastungsmoment wird hierbei von einer Gleichstrommaschine aufgebracht, deren Ständer drehbar gelagert ist. Das Drehmoment wird mittels einer Kraftmessdose bestimmt. Die angegebene Drehrichtung ist bei den Messungen unbedingt einzuhalten. Der Maschinensatz ist stets mit dem Prüfling anzufahren. Danach wird nach einem Spannungsvergleich (Differenzspannung = 0) die Pendelmaschine zugeschaltet.

6.2. Gleichstrom-Hauptschlussbetrieb (Bild 13)

Es ist bei einer Anschlussspannung von 60 V, 150 V und 220 V zu messen. (1p)

6.3. Wechselstrom-Hauptschlussbetrieb (Bild 14)

Es sind die gleichen Messungen wie unter 7.1, jedoch bei Speisung mit $U = 220 \text{ V} \sim$ bzw. $150 \text{ V} \sim$ vorzunehmen. Zusätzlich ist bei $150 \text{ V} \sim$ auch im Linkslauf der Maschine zu messen. (1p)

6.4. Betrieb bei Gleichstrom-Fremderregung (Bild 15)

Bei Speisung der Erregerwicklung mit $I_f = 1,4 \text{ A}$ werden die Belastungskennlinien des fremderregten Motors ($U_a = 220 = \text{const.}$) aufgenommen. (1p)

6.5. Ausarbeitung

Die Kennlinien $n = f(M_m)$ sind für alle Betriebsarten in einem gemeinsamen Diagramm darzustellen.

Die bei $150 \text{ V} \sim$ im Linkslauf gemessene Kennlinie ist ohne besondere Berücksichtigung des Vorzeichens für Drehzahl und Drehmoment in das Diagramm einzuzeichnen.

Die Messergebnisse sind zu diskutieren.

7. Anhang

A C H T U N G!

Der Erregerkreis einer am Netz betriebenen Gleichstrommaschine darf niemals früher als der Ankerkreis unterbrochen werden. Nach Gleichung (1), (2), (3) der Anleitung führt nämlich das Abschalten des Erregerstroms und die damit verbundene Reduzierung des Hauptflusses $\bar{\Psi}_d$ auf den geringen Rest der Remanenz zu unzulässig hohen Werten von Ankerstrom und Drehzahl, wodurch die Maschine sowohl thermisch als auch mechanisch zerstört werden kann.

Daher:

- 1) Anker- und Erregerkreis möglichst mit einer gemeinsamen Sicherung absichern, deren Bemessungsstrom nicht größer als der Bemessungsstrom der Maschine ist. Besondere Sorgfalt ist auf die Sicherheit des Erregerkreises bei Fremderregung zu verwenden.
- 2) Immer erst den Ankerkreis, dann den Erregerkreis auftrennen!

Bezeichnung von Netzleitungen und Klemmen für Gleichstrom (nach DIN VDE 0530-8; 1987-07 und Änderungen A 10 (1996), A 11 (1997))

Positiver Leiter:	L+
Negativer Leiter:	L-
Ankerwicklung:	A1 – A2
Nebenschlusswicklung für Selbsterregung:	E1 – E2
Reihenschlusswicklung für Erregung mit eigenem Ankerstrom:	D1 – D2
fremderregte Feldwicklung:	F1 – F2
Wendepolwicklung:	B1 – B2
Kompensationswicklung:	C1 – C2

Auf beide Seiten des Ankers verteilte gleiche Wicklungsteile, z. B. zum Zweck der Symmetrierung für Rundfunkentstörung:

Reihenschlusswicklung bei Motorrechtslauf	Seite der Ankerklemme A1 : 1D1 – 1D2 Seite der Ankerklemme A2 : 2D1 – 2D2
Wendepolwicklung	Seite der Ankerklemme A1 : 1B1 – 1B2 Seite der Ankerklemme A2 : 2B1 – 2B2

Beziehungen zwischen Stromrichtung und Magnetfeld

Zwei Erregerwicklungen erzeugen gleichgerichtete Felder, wenn der erregende Strom in beiden von der niedrigeren Kennzahl zur höheren bzw. in beiden der höheren Kennzahl zur niedrigeren fließt. Für die Polarität der sich weitgehend aufhebenden Magnetfelder in der Querachse ist dagegen festgelegt, dass die Wicklungen von Wendepol einschließlich Kompensation und Anker richtig geschaltet sind, wenn in allen diesen Wicklungen der Strom die Durchflussrichtung von der niedrigen (höheren) Kennzahl zur höheren (niedrigeren) hat.

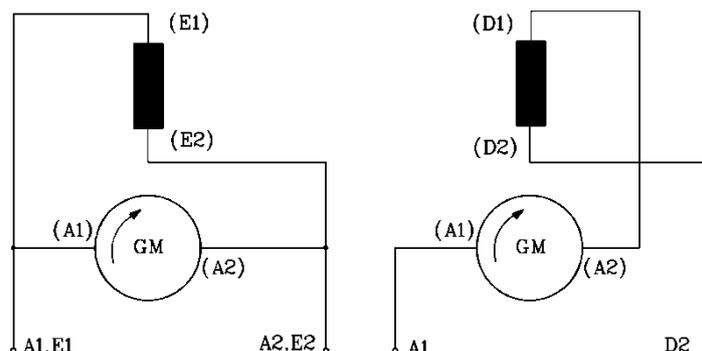


Bild 12: Grundschaltung der Nebenschluss- und Hauptschlussmaschine

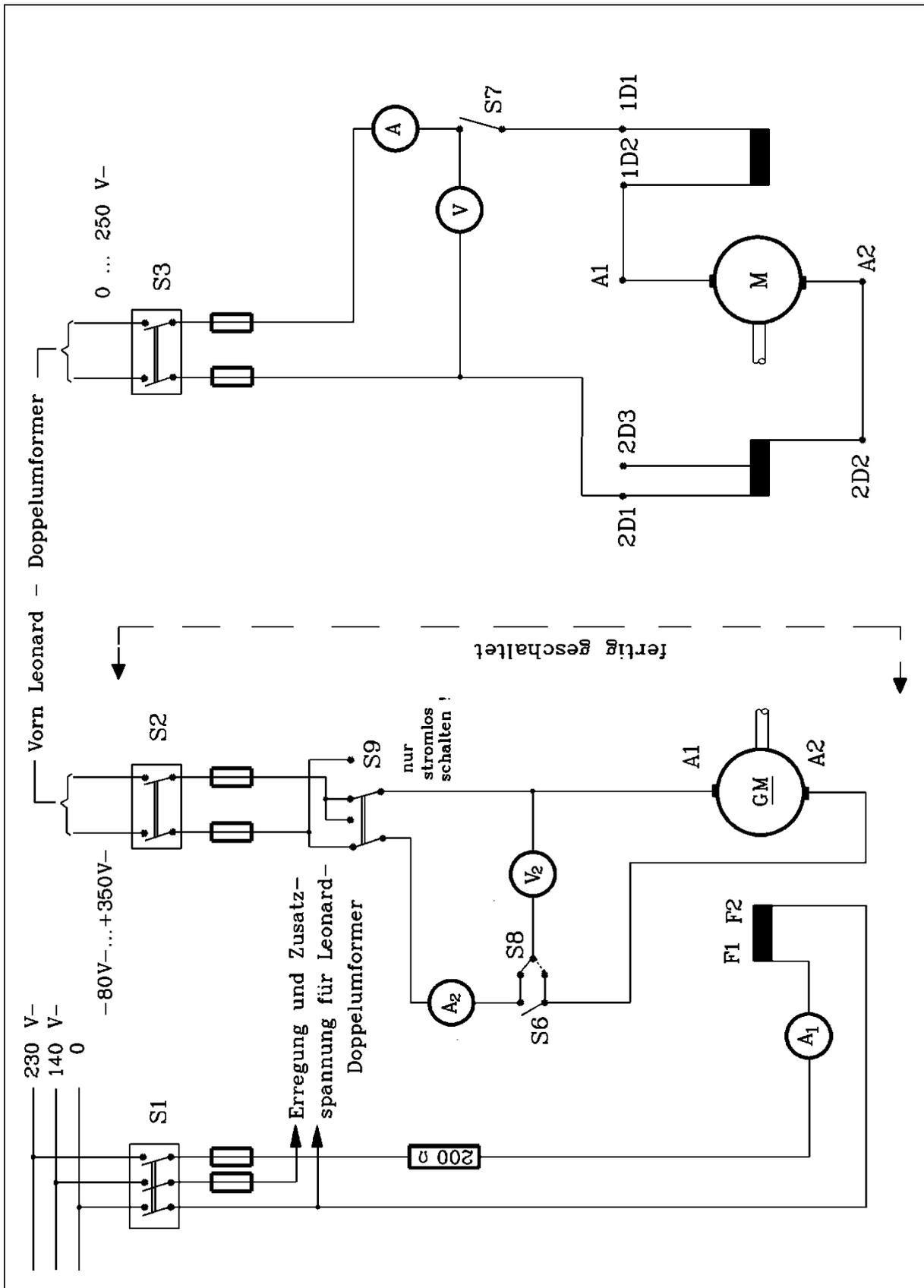


Bild 13: Schaltung für Betrieb mit Gleichstrom-Hauptschlussbetrieb

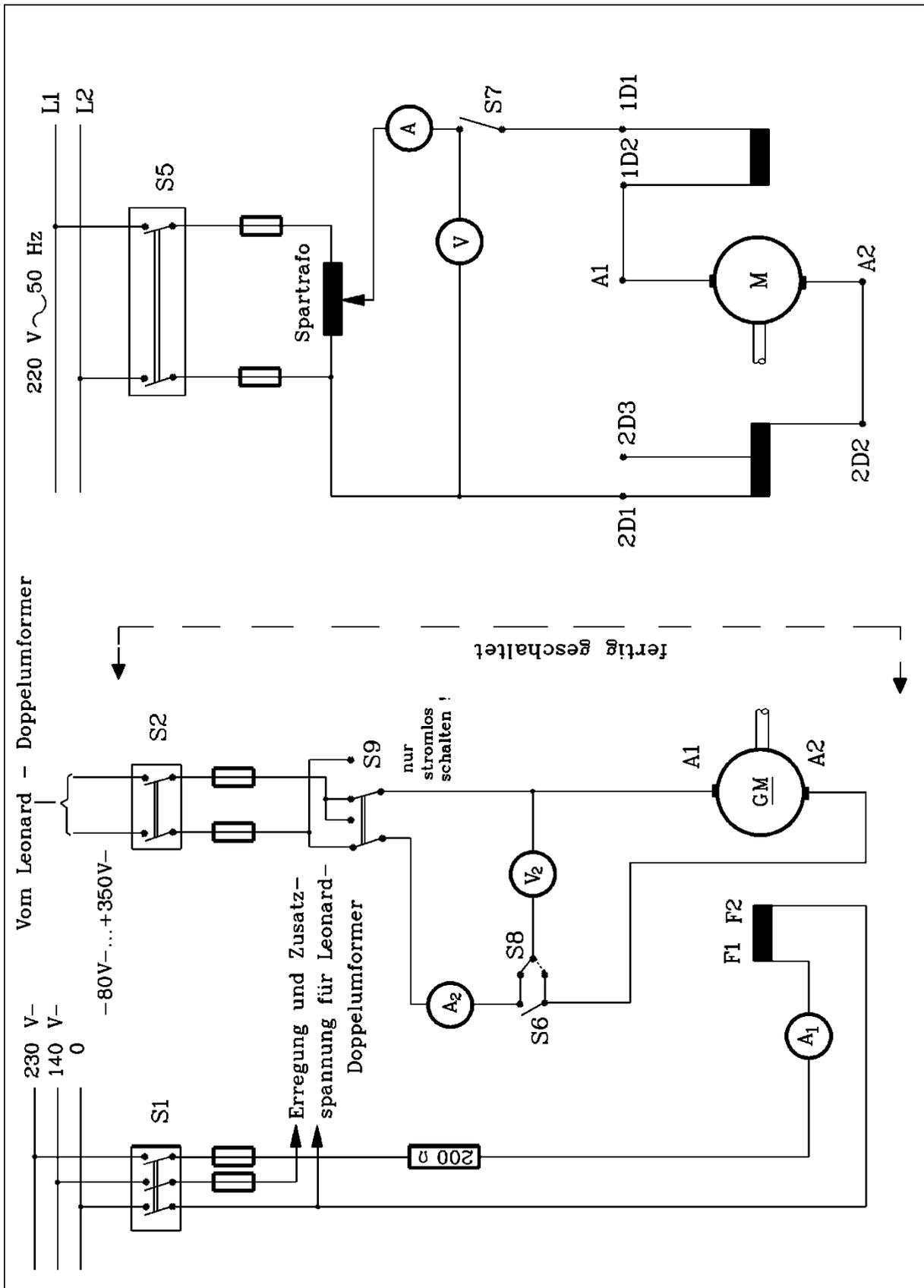


Bild 14: Schaltung für Betrieb mit Wechselstrom-Hauptschlussbetrieb

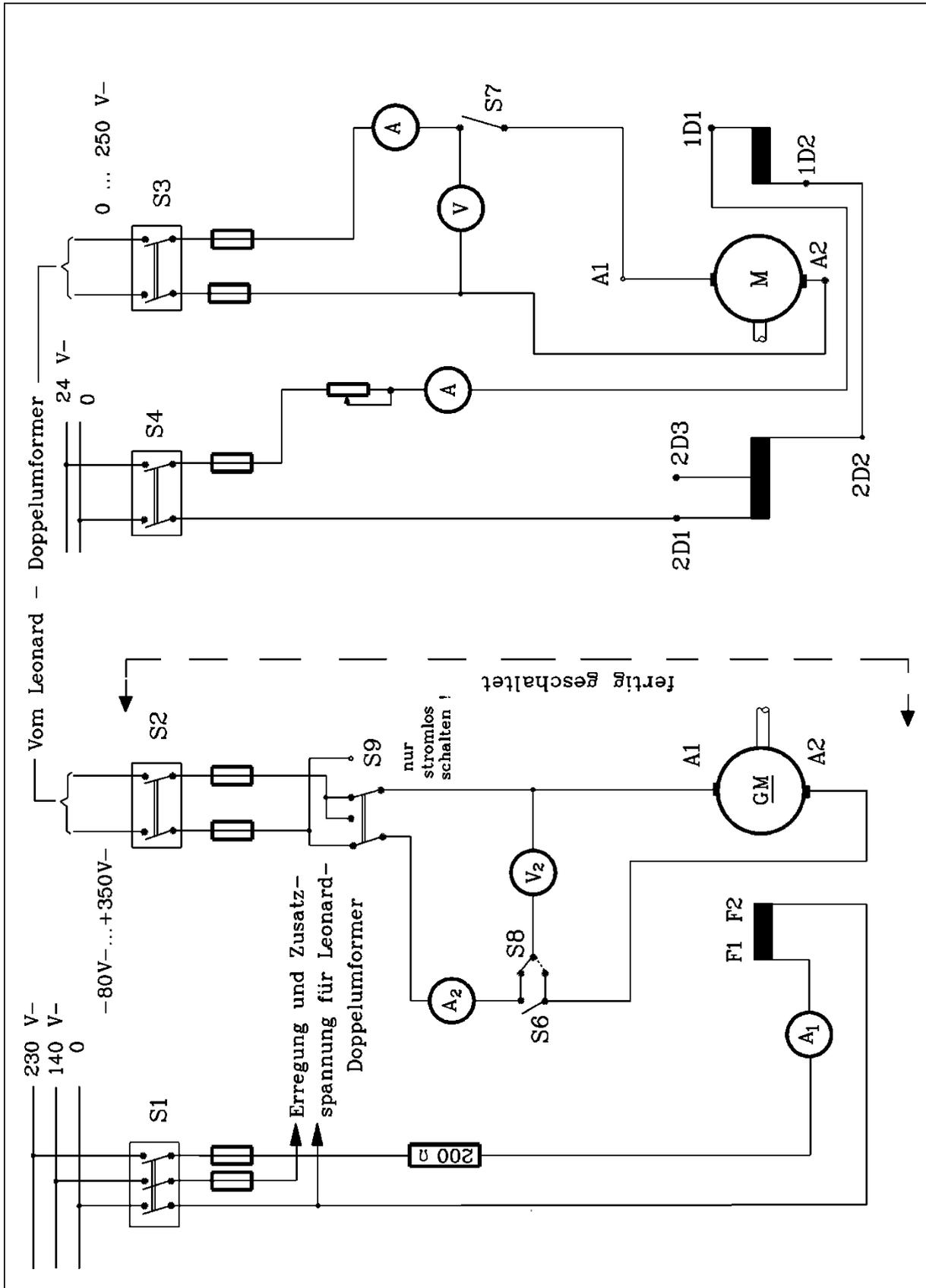


Bild 15: Schaltung für Betrieb mit Gleichstrom-Fremderregung