

Elektrische Maschinen der Kraftbetriebe

**Wirkungsweise und Verhalten beim Anlassen
Regeln und Bremsen**

Mit Anwendungsbeispielen

von

Prof. Dr.-Ing. Engelbert Wist
Wien

Mit 189 Textabbildungen



Wien
Springer-Verlag
1950

ISBN-13:978-3-7091-7769-3 e-ISBN-13:978-3-7091-7768-6
DOI: 10.1007/978-3-7091-7768-6

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.

Copyright 1950 by Springer-Verlag in Vienna.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1950

Vorwort.

Das vorliegende Buch entstand aus den Vorlesungen über elektrische Kraftbetriebe an der Technischen Hochschule in Wien. Es soll in erster Linie den Studierenden ein Lehrbehelf sein und weiters dem Ingenieur der Praxis die Möglichkeit geben, sich in übersichtlicher Weise über die charakteristischen Eigenschaften der einzelnen Maschinengattungen zu orientieren, für einen bestimmten Antrieb die erforderliche Maschine richtig auszuwählen, die Leistung, Erwärmung, den Anlaß- und den Regelvorgang zu berechnen.

Bei der Darstellung der Wechselstromgrößen habe ich für die Vektoren bzw. Zeiger ähnlich der Ossannaschen Schreibweise lateinische Großbuchstaben mit einem horizontalen Strich gewählt. Bei den Ableitungen wurden soweit als möglich auch Zwischenrechnungen gebracht. Um der verschiedenen mathematischen Ausbildung Rechnung zu tragen, wurde neben der komplexen Darstellung auch die analytische verwendet. Am Schluß wurden einige durchgerechnete Beispiele angefügt, um die Ausführungen leichter verständlich zu machen.

Die im Text angeführten Literaturausweise dienen auch dazu, dem Leser Gelegenheit zu geben, in Spezialprobleme näher einzudringen.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Dipl.-Ing. *J. Bitter* für seine Anregungen, insbesondere bei dem Abschnitt über die Synchronmaschinen, den herzlichsten Dank aussprechen. Herrn Dipl.-Ing. *F. Susan* danke ich wärmstens für die in lebenswürdigster Weise mit großer Sachkenntnis durchgeführte Korrektur des Buches.

Wien, im Herbst 1949.

E. Wist.

Inhaltsverzeichnis.

Erster Teil.

Die Gleichstrommaschinen.

	Seite
A. Unipolarmaschinen	1
B. Stromwendermaschinen (Kommutatormaschinen)	2
I. Allgemeines	2
1. Ermittlung der Belastungskennlinie	3
2. Grundgleichungen für den Motor	4
II. Die Reihenschlußmaschine (Hauptschluß- oder Serienmaschine)....	6
1. Generator	6
2. Reihenschlußmotor (Serienmotor, Hauptschlußmotor)	7
a) Verhalten des Serienmotors bei geänderter Spannung 10. —	
b) Verhalten des Serienmotors bei geänderter Feldstärke 12. —	
c) Verhalten des Serienmotors bei geschwächtem Ankerstrom (mit Anker Shunt) 13.	
3. Anlassen des Serienmotors	16
a) Die zugeführte Spannung wird erniedrigt 17. — b) Der Wider- stand des Motors wird durch einen Vorschaltwiderstand ver- größert 18.	
4. Elektrische Bremsung	24
a) Kurzschlußbremsung 24. — b) Gegenstrombremsung 29.	
III. Die fremderregte Gleichstrommaschine	29
1. Der fremderregte Gleichstromgenerator	30
2. Der fremderregte Gleichstrommotor	31
IV. Die Nebenschlußmaschine	31
1. Der Nebenschlußgenerator	31
2. Der Nebenschlußmotor	33
a) Allgemeine Eigenschaften und Kennlinien 33. — b) Verhalten des Nebenschlußmotors bei geänderter Erregung und konstanter Spannung U 36. — c) Das Anlassen des Nebenschlußmotors 37.	
V. Die Doppelschlußmaschine	41
1. Generator	41
2. Doppelschlußmotor (Kompond-Motor)	43
3. Senkbremsschaltung	44

Zweiter Teil.

Die Wechselstrommaschinen.

	Seite
A. Synchronmaschinen	47
I. Allgemeines	47
II. Volltrommelmaschine	54
Das Kippverhältnis des Synchronmotors	62
III. Schenkelpolmaschinen	63
IV. Anlaßschaltungen für Synchronmotoren	66
V. Einankerumformer	71
1. Allgemeines	71
2. Spannungsregelung und Anlassen des <i>EAU</i>	73
B. Die asynchronen Maschinen	76
I. Allgemeines	76
II. Die Schleifring- und Kurzschlußanker-Motoren	77
1. Die Ableitung des Kreisdiagramms	77
2. Die Konstruktion des Kreisdiagramms	85
3. Diskussion der verschiedenen Punkte des Kreisdiagramms	88
a) Kreispunkte zwischen P_s und P_k 88. — b) Kreispunkte zwischen P_a , P_d' und P_b 89. — c) Die Kreisstrecke $P_k P_\infty$ 90. — d) Die Kreisstrecken $P_s P_a$ und $P_b P_\infty$ 90.	
4. Drehmoment und Leistung	90
5. Verhalten des Motors bei geänderter Klemmenspannung	92
a) Bei gleichbleibender Schlüpfung 92. — b) Bei gleichbleibender primärer Stromstärke 93.	
6. Stromverdrängungsmotoren	93
a) Hoch- und Keilstabläufer 93. — b) Doppelnut- oder Zweifachkäfigläufer 94. — c) Doppelnutläufer mit ausgegossenem Steg 95.	
III. Anlassen des <i>DAM</i>	95
1. Anlassen des Schleifringankermotors	96
2. Anlassen des Kurzschlußankermotors	98
a) Anlassen durch Verminderung der Spannung 99. — b) Anlaßverfahren durch Stromverdrängung (Boucherot) 102. — c) Änderung der Periodenzahl 102.	
IV. Drehzahlregelung des <i>DAM</i>	102
1. Mit Rotorwiderständen	103
2. Durch Änderung der Periodenzahl	103
3. Durch Änderung der Polzahl (Polumschaltung)	103
4. Kaskadenschaltungen	104
a) Kaskadenschaltung zweier <i>DAM</i> 105. — b) Drehstromkaskade mit Hintermotor (Krämerkaskade) 106. — c) Die Scherbiuskaskade 108. — d) Drehstromkaskade mit ständererregter kompensierter Hintermaschine 110. — e) Drehstromkaskade mit kompensiertem läufererregtem Periodenumformer nach <i>Heyland</i> oder <i>Kozisek</i> 110. — f) Kommutatorkaskaden für Leistungsregelung 110.	
V. Die Drehtransformatoren	111
1. Allgemeines	111
2. Ein- und Ausschalten der Drehregler	115

	Seite
C. Wechselstrom-Kommutator-Motoren	117
I. Einphasenkommutatormotoren	117
1. Allgemeines und Kreisdiagramm	117
2. Stromwendung	121
3. Anlassen des Einphasenserienmotors mit konstantem Drehmoment	124
II. Drehstromkommutatormotoren	126
1. Der Drehstromreihenschluß-Kommutatormotor	127
2. Der Drehstromnebenschluß-Kommutatormotor	136
a) Ständergespeister Drehstrom-Nebenschlußmotor	136.
b) Läufergespeister Drehstrom-Nebenschlußmotor	143.

Dritter Teil.

Die Erwärmung der elektrischen Maschinen 148.

Vierter Teil.

Beispiele.

I. Ermittlung der Größe eines Gleichstrom-Reihenschlußmotors für ein Kranhubwerk	157
II. Berechnung eines Drehstromasynchron-Kurzschlußmotors für eine Rohzuckerzentrifuge mit Zentrifugalkupplung	167
III. Berechnung einer Leonard Ilgner-Fördermaschine für den Hauptschacht eines Steinkohlenbergwerkes	172

Berichtigungen.

- S. 36: Unter 3. In der Gleichung für $\frac{d\eta}{dJ_a'} =$ erhalten der erste und letzte Ausdruck +- statt --Zeichen. Im Wurzelausdruck darunter lies: R_m statt: R_m^2 .
- S. 46: In der Abb. 56 soll die Motorskala +- und die Generatorskala --Zeichen besitzen.
- S. 114: In der Abb. 133 lies: $U_{z_1}, U_{z_2}, U_{z_3}$ statt: $U_{r_1}, U_{r_2}, U_{r_3}$.
- S. 160: Im Kontrollerschema Abb. 177 für Senken sind die Schienen A_5 mit 12 und B mit 5 elektrisch zu verbinden.

Die Gleichstrommaschinen.

A. Unipolarmaschinen.

Die kommutatorlosen Maschinen von *Noeggerath*¹ (Unipolar-
maschinen) haben bisher keine größere praktische Bedeutung er-
langt, da die Herstellung größerer Spannungen nur durch Hinter-
einanderschaltung der einzelnen Ankerleiter mit Schleifringen
möglich ist. Die Erregerwicklung des unipolaren Kraftflusses ist
im Ständer untergebracht und wird im Nebenschluß an die Anker-
klemmen angeschlossen. Diese Maschinen eignen sich daher für
große Stromstärken bei kleinen Spannungen, wie sie vorwiegend
in elektrolytischen Betrieben gebraucht werden, wo sie vereinzelt
Anwendung finden.

Eine Ausführungsform ist in
der Abb. 1 dargestellt.

Nach der Gleichung von der
elektromagnetischen Induktion
beträgt in einem Ankerleiter die er-
zielbare Spannung: $U = Blv \cdot 10^{-8}$
Volt. Ist z. B. $B = 18\,000 \text{ V sec/cm}^2$,
 $v = 50 \text{ m/sec}$ ($5\,000 \text{ cm/sec}$)
 $l = 60 \text{ cm}$, so ergibt sich die
Spannung U mit 54 Volt.

Nach *Moß* und *Mould*² er-
hält man die gleiche Kraftlinien-
dichte in allen Teilen des Anker-
kernes, wenn man die achsiale
Länge doppelt so groß wie den Ankerdurchmesser macht. Die
höchste zulässige Drehzahl erhält man aus:

$$n = \sqrt{\frac{3,48 \cdot 10^3 v^3}{c \text{ kW}}};$$

¹ Proceedings Am. Inst. of El. Eng. 1905. — ETZ, 831, (1905), *C. Feldmann*. — *Arnold, E.* — *J. L. la Cour*: Die Gleichstrommaschinen. Berlin: Springer, 1909.

² Journ. Inst. Electr. Eng. 49, 804. — ETZ, 713, (1914).

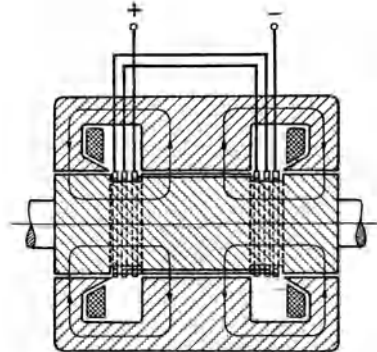


Abb. 1. Querschnitt einer unipolaren Gleichstrommaschine.

wenn $c = \frac{6 \cdot 10^{11}}{\text{Luftinduktion} \times \text{Amp. Stäbe je cm Anker-Umfg.}}$
 und v die Ankerumfangsgeschwindigkeit in m/sec ist.

Noeggerath (GEC) gibt für eine 300 kW Maschine bei 500 Volt und 3 000 UpM 12 Ankerleiter mit 24 Schleifringen an.

Bemerkenswert ist die Anwendung des Unipolarprinzipes bei den Elektro-Trennmaschinen¹ mit rasch rotierenden Scheiben. Die Generatorleistung bei 6 000 Ampere und 8—10 Volt und rund 2 000 UpM beträgt 45 kW.

B. Stromwendermaschinen (Kommutatormaschinen).

Diese werden in Reihenschlu-, fremderregte, Nebenschlu- und Doppelschlu- oder Verbund- oder Compound-Maschinen eingeteilt.

I. Allgemeines.

Gleichstrommaschinen ohne Wendepole, deren Bürsten aus der Ankerachse verschoben sind, besitzen langsmagnetisierende und quermagnetisierende Anker AW (Abb. 2).

Die ersteren schwächen das Erregerfeld unmittelbar, die zweiten verzerren im unteren, geradlinigen Ast der Magnetisierungskurve das Erregerfeld, schwächen es aber nicht. Nur durch die Feld-

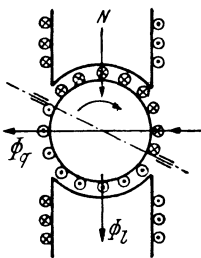


Abb. 2.

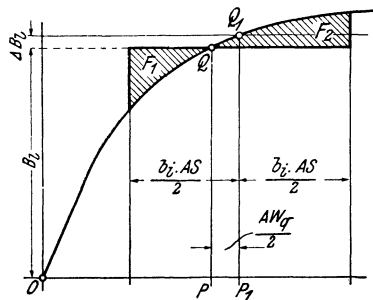


Abb. 3.

sättigung im oberen Teil der Magnetisierungskurve tritt eine Feldschwächung auf.

Bei Maschinen mit Wendepolen, deren Bürsten in der geometrischen neutralen Zone stehen, ist die entmagnetisierende Wirkung der langsmagnetisierenden AW_l gleich Null. Es bleiben daher die quermagnetisierenden Anker AW_q übrig, die nur im Gebiete der Feldsattigung schwächend wirken.

¹ ETZ, 83, (1914), O. Neiß.

Bei Maschinen, die außer Wendepolen auch eine Kompensationswicklung besitzen, entfällt bei Vollkompensierung auch die Feldschwächung durch die quermagnetisierenden AW_q .

Im folgenden wird gezeigt, wie die AW_q durch ein graphisches Verfahren ermittelt werden können. Man trägt in Abb. 3 \overline{OP} , die zu B_l entsprechenden AW auf. Die Induktion im Luftspalt B wird aus folgender Formel gerechnet: $B_l = \Phi / (b_i l)$. Hierbei bedeutet: b_i = ideale Ankerbreite in cm, l = Ankerlänge in cm.

Würden wir uns im geradlinigen Ast der Magnetisierungskurve befinden, so würden die beiden Flächen F bei $\overline{OP} = +\frac{1}{2} b_i A S$ und $-\frac{1}{2} b_i A S$ gleich groß sein.

Da dies aber infolge der Sättigung nicht der Fall sein kann, so muß man $b_i A S$ so lange nach rechts verschieben, bis die Flächen F gleich groß werden. Die $AW = \frac{1}{2} b_i A S$ ergeben den Punkt P_1 ; die gesamten Quer AW sind somit $AW_q = 2 \overline{PP_1}$.

Die Erregung ist daher, um $AW_q = 2 \overline{PP_1}$ zu verstärken, damit der Kraftfluß bei Belastung den gewünschten Wert erhält. $\overline{P_1 Q_1}$ ist die Luftinduktion der Polmitte und $\Delta B_l = \overline{P_1 Q_1} - \overline{P Q}$ der Betrag um den die Luftinduktion bei Entfernung des Querflusses ansteigen würde.

1. Ermittlung der Belastungskennlinie.¹

Für konstante Belastung bei veränderlicher Erregung ist $\overline{ba} = J R_a + 2 \Delta P = \text{konstant}$, wobei ΔP die Bürstenübergangsspannung bedeutet. Im unteren geradlinigen Teil der Charakteristik (Abb 4) tritt nur der Spannungsabfall \overline{ba} auf und im

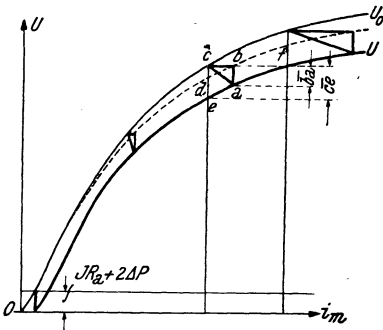


Abb. 4.

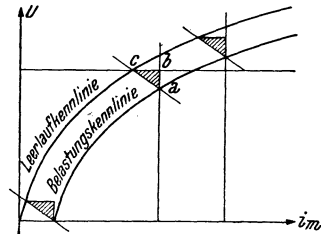


Abb. 5.

oberen Teil kommt noch der Spannungsabfall \overline{cd} durch die Ankerückwirkung hinzu (\overline{ed} Spannungsabfall durch Ankerstrom und

¹ Siehe auch Arnold, E. — J. L. la Cour: Die Gleichstrommaschinen. Bd. 1. Berlin: Springer, 1909.

Bürsten). \overline{cf} entspricht der Erhöhung des Erregerstromes um den gesamten Spannungsabfall ce zu kompensieren.

Da es aber meist nur auf den oberen Teil der Belastungskennlinie ankommt, so genügt es, das charakteristische Dreieck für die normale Spannung zu bilden und nach Abb. 5 parallel zu verschieben, daß c sich auf der Leerlauf-Kennlinie bewegt. Der Punkt a erzeugt dann die Belastungscharakteristik. Dabei erhält man bei kleinen Sättigungen zu kleine und bei großen Sättigungen zu große Werte der Belastungskennlinie.

2. Grundgleichungen für den Motor.

Für den *Gleichstrommotor*, gleichgültig welcher Schaltung, gelten die folgenden Gl.:

Der Anker entwickelt bei seiner Drehung im Magnetfelde eine Gegen-EMK

$$e = k_e n \Phi \text{ in Volt;} \quad (1)$$

k_e = eine Maschinenkonstante, die sich aus den Maschinendaten

$$\text{ergibt } k_e = \frac{z p}{a 60} 10^{-8}. \text{ Hiebei ist:}$$

z = Gesamtzahl der in Reihe geschalteten Ankerleiter.

p = Zahl der Polpaare.

a = halbe Zahl der parallelen Ankerstromzweige.

Φ = Gesamtkraftlinienzahl pro Pol im Luftraum gemessen oder der mit den kurzgeschl. Ankerspulen bei Belastung verkettete Windungsfluß.

n = Umdrehungen in der Minute.

Wird mit D_i das ideelle auf den Anker übertragene Drehmoment und mit L_i die ideelle mechanische Leistung des Motors bezeichnet, so ist $L_i = D_i 2 n/60$ in kgm/sec oder $L_i = D_i \pi n g/30$ in Watt (1 kgm/sec = 9,81 Watt) oder $L_i = J_a e$; daraus ist:

$$D_i = \frac{30}{\pi n} L_i = \frac{30}{\pi n g} J_a e = \frac{30}{\pi n g} J_a k_e n \Phi = \frac{30 k_e}{\pi g} J_a \Phi,$$

$$D_i = k_d J_a \Phi, \text{ wobei } k_d = k_e \frac{30}{\pi g} = k_e 0,97 \text{ ist.}$$

Das tatsächlich am Anker zur Verfügung stehende Drehmoment ist um die Drehmomentverluste (Eisen- und Reibungsverluste) kleiner, so daß

$$D = \varepsilon_1 D_i = \varepsilon_1 k_d J_a \Phi. \quad (2)$$

Das Drehmoment einer allgemeinen Gleichstrommaschine ist demnach von der Spannung nicht direkt abhängig, indirekt nur dadurch, weil J_a und Φ von der Spannung abhängen.

Der gesamte ohmsche Spannungsverlust ist durch folgende Gl. gegeben: $E_a - e = J_a R_a$. Im Widerstand R_a ist der Bürstenübergangswiderstand bereits enthalten.

$$J_a = \frac{E_a - e}{R} \quad \text{und} \quad e = E_a - R_a J_a = k_e n \Phi;$$

daraus ist

$$n = \frac{1}{k_e} \frac{E_a - R_a J_a}{\Phi}. \quad (3)$$

Durch Multiplikation mit der Gl. (2) erhält man die allgemeine Gl. der Gleichstrommaschine:

$$D n = \varepsilon_1 J_a \frac{k_a}{k_e} (E_a - R_a J_a) = \varepsilon_1 \frac{30}{\pi g} (E_a - R_a J_a) J_a.$$

Die vorstehenden Gl. legen die allgemeinen Beziehungen zwischen den einzelnen Größen fest und gelten für Hauptstrommotoren ebenso wie für Nebenschluß- und Compoundmotoren.

Es soll nun auf die Verluste eingegangen werden, die in ε_1 zusammengefaßt sind. Wie aus den obigen Gl. ersichtlich ist, wurde bei der Ermittlung des auf den Anker übertragenen Drehmomentes mit der Gegenspannung e gerechnet und somit dem durch die ohmschen Widerstände verursachten Spannungsabfall Rechnung getragen. In ε_1 sind daher die Reibungsverluste, die durch Lager- und Luftreibung hervorgerufen werden und die Eisenverluste enthalten, die als Wirbelstrom- und Hysteresisverluste auftreten.

Die Reibungsverluste V_R sind abhängig von der Drehzahl n . Die Eisenverluste V_{Fe} setzen sich zusammen aus den Wirbelstromverlusten V_w und den Hysteresisverlusten V_h .

a) Die Wirbelstromverluste nach *Arnold*:

$$V_w = \sigma_w \left(\delta \frac{p n}{6\,000} \frac{B_{max}}{1\,000} \right)^2 V \text{ Watt.}$$

Hiebei bedeuten:

σ_w = Konstante rd. 2,5.

δ = Blechstärke in cm.

V = Eisenvolumen in dm^3 .

b) Die Hysteresisverluste (nach *Steinmetz*) betragen:

$$V_h = 10^{-4} \sigma \frac{p n}{60} B^{1.6} V \text{ in Watt; hiebei bedeutet}$$

V = Eisenvolumen in cm^3 .

σ = Materialkoeffizient (0,0012—0,0016).

An Stelle der getrennt berechneten Hysteresis- und Wirbelstromverluste kann auch auf Grund der Eisenmessungen mit der sogenannten Verlustziffer V_{10} , bzw. V_{15} als Größe der gesamten Eisenverluste bei 50 Hertz und 10, bzw. 15 000 Gauß je kg Eisenblech gerechnet werden. Bei 0,5 mm Dynamoblechen beträgt z. B. $V_{10} = 3,5$ und $V_{15} = 8,6$ Watt/kg.

Außer den Hysteresis- und Wirbelstromverlusten sind noch die bei Belastung auftretenden zusätzlichen Kupferverluste zu be-

rücksichtigen, die mit rd 0,5 v. H. der Ausgangsleistung geschätzt werden können.

Der Gesamtwirkungsgrad eines Motors ist das Verhältnis von der abgegebenen zur aufgenommenen Leistung: $\eta = L_m/L_e$, wobei $L_m = D n \pi g/30$ in Watt ist. Setzt man für $D \cdot n$ den bereits gefundenen Ausdruck, so wird:

$$L_m = \varepsilon_1 (E_1 - R_a J_a) J_a = \varepsilon_1 e J_a, \quad (4)$$

wobei $e = (E_a - R_a J_a)$ ist.

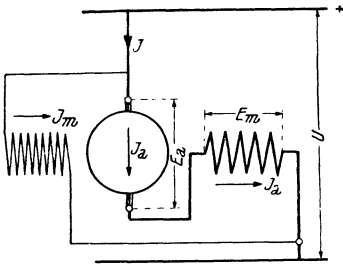


Abb. 6. Gleichstrommaschine mit Haupt- und Nebenschlußerregung.

Die aufgenommene elektrische Leistung ist $L_e = U J$.

Die allgemein geschaltete Maschine ist im folgenden Schaltungsschema (Abb. 6) dargestellt:

Es gelten für Strom und Spannung die beiden Gl.:

$$\begin{aligned} J &= J_a + J_m, \\ U &= E_a + E_m. \end{aligned} \quad (5)$$

Die aufgenommene Leistung ergibt sich daher zu

$$L_e = (E_a + E_m) (J_a + J_m) \quad (6)$$

und der Wirkungsgrad beträgt:

$$\eta = \varepsilon_1 \frac{(E_a - R_a J_a) J_a}{(E_a + E_m) (J_a + J_m)} = \varepsilon_1 \left(\frac{e}{U} \right) \left(\frac{J_a}{J} \right) = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3. \quad (7)$$

II. Die Reihenschlußmaschine (Hauptschluß- oder Serienmaschine).

1. Generator.

Bei der Reihenschlußmaschine sind nach Abb. 8 Anker und Feld stets in Reihe geschaltet und werden daher vom selben Strom durchflossen. Da der Anker- und der Feldstrom nicht unabhängig voneinander geregelt werden können, gibt es hier weder eine eigentliche Leerlauf- noch eine Belastungskennlinie. Will man aber die in der Abb. 7 dargestellten Kurven, die man für die Ermittlung der übrigen Kennlinien benötigt, aufnehmen, so muß man die Maschine fremd erregen.

Die *Außenkennlinie* stellt die Abhängigkeit des Stromes von der erzeugten Spannung dar. Da der Ankerstrom auch durch die Erregerwicklung fließt, so muß die Klemmenspannung der Maschine mit zunehmender Belastung ansteigen, bis der Spannungsabfall durch die von der Ankerrückwirkung hervorgerufene Feldschwächung $\overline{b_1 d_1}$ und der Ohmsche Spannungsabfall $\overline{a_1 b_1}$ im Anker, in der Reihenschlußwicklung und an den Bürsten so

groß wird, daß die Spannung wieder sinkt. Zur Ermittlung der äußeren Kennlinie berechnet man für verschiedene Ströme J die charakteristischen Dreiecke z. B. für $J : \overline{a_1 b_1} = J (R_a + R_m) + 2 \Delta P$, $\overline{b_1 c_1} = AW_r / W_m$; wobei $\overline{b_1 c_1}$ der Erregerstrom zur Kompensierung der Ankerrückwirkung ist.

AW_r sind die Amperewindungen zum Ausgleich der Ankerrückwirkung und W_m die in Serie geschalteten Windungen der Erregerwicklung.

Unter der Annahme, daß die Dreieckseiten sich proportional mit dem Strom ändern, kann man, wie in Abb. 7 dargestellt, in einfacher, allerdings nur angenäherter Weise die äußere Kennlinie konstruieren.

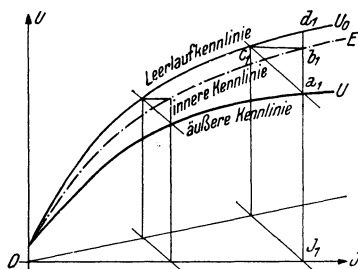


Abb. 7. Kennlinien der Reihenschlußmaschine.

Die Kurve E/J wird die innere Kennlinie genannt.

2. Reihenschlußmotor (Serienmotor, Hauptschlußmotor).

Allgemeine Eigenschaften und Kennlinien. Bei dem Motor liegen ebenso wie beim Seriengenerator die Magnet- und Ankerwicklungen in Serie und werden daher vom gleichen Strom durchflossen. Die Größe der Erregung der Magnete ist vom Ankerstrom abhängig. Die Schaltskizze (Abb. 8) stellt die Anordnung und Verbindung der einzelnen Wicklungen des Motors dar. Es ist hier entsprechend den Gl. (5)

$$J = J_a = J_m = f(\Phi) \text{ und} \\ U = E_a + E_m; E_m = R_m J.$$

Die Gegen-EMK $e = E_a - R_a J = U - E_m - R_a J = U - J (R_a + R_m)$, da $R_a + R_m = R$, so ist $e = U - J R$.

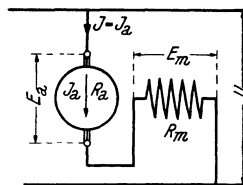


Abb. 8.

Die Kurve Φ_0 (Abb. 9) stellt die Feldform bei kleiner Belastung dar. Mit zunehmender Belastung wächst der Inhalt dieser Fläche (Kurve Φ_b). Da auch die Ankerrückwirkung (Kurve Φ_a) immer größer wird, so wird die Verzerrung immer größer. Unterhalb der Sättigung wird die Fläche durch die Ankerrückwirkung nicht verändert, während sie oberhalb der Sättigung durch die Ankerrückwirkung (Queramperewindungen) verkleinert wird (Kurve Φ_{res}).

Es ist $\Phi = f(J)$ und $e = k_e n \Phi$, daher ist $\Phi = \frac{1}{k_e} \left(\frac{e}{n} \right)$ und daraus $\left(\frac{e}{n} \right) = k_e f(J)$. Trägt man die Feldstärke als Funktion der Stromstärke auf, so kann dieselbe Kurve bei entsprechend gewähltem Maßstabe sowohl Volt pro Umdrehung als auch die Kraftlinienzahl pro Pol ergeben. Es läßt sich aber leichter mit

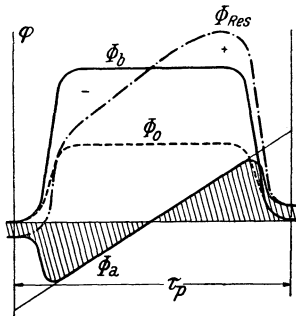


Abb. 9. Erreger-Anker- und resultierendes Feld.

Wert von U und J den zugehörigen Wert von n ermitteln. Man kann nun n daraus rechnen oder konstruieren. Wendet man das graphische Verfahren an, so wählt man die Maßstäbe:

$$\begin{aligned} \mu_e \text{ in mm} &= 1 \text{ Volt}, \mu_n \text{ in mm} = 1 \text{ Umdr./sec}, \\ \mu_\varphi \text{ in mm} &= 1 \text{ Volt/Umdr.}, \end{aligned}$$

daraus ist:

$$\frac{n \mu_n}{c} = \frac{e \mu_e}{\left(\frac{e}{n} \right) \mu_\varphi}; \quad \text{oder} \quad \frac{\left(\frac{e}{n} \right) \mu_\varphi}{e \mu_e} = \frac{c}{n \mu_n}.$$

$c = \mu_n \frac{\mu_\varphi}{\mu_e}$ für die Einheiten von Volt, Umdrehung und $\left(\frac{e}{n} \right)$. Den Abstand c müssen wir wegen der Verhältnis-Konstruktion einführen. c ist eine Streckenlänge, die sich aus den Maßstäben von μ_n , μ_φ und μ_e ergibt.

Nach der Wahl der Maßstäbe wird c gerechnet und in Abb. 10 auf der Abszissenachse aufgetragen. Nun ist $\left(\frac{e}{n} \right)_1$ mit c zu verbinden, eine Parallele durch e_1 zu ziehen, die auf der Abszisse die Strecke n_1 abschneidet. Diese Strecke n_1 um 90° gedreht, ergibt einen Punkt der n/J -Linie. Setzt man dieses Verfahren für ver-

$\left(\frac{e}{n} \right)$ statt mit Φ rechnen, da sich dieser Quotient unmittelbar aus dem Versuch ergibt. $\left(\frac{e}{n} \right)_0 / J$ ist somit die magnetische Kennlinie bei Leerlauf oder die statische Kennlinie.

Aus Gl. (4) ergibt sich die Drehzahl $n = \frac{e}{\left(\frac{e}{n} \right)} = \frac{U - RJ}{\left(\frac{e}{n} \right)}$. Ist $\left(\frac{e}{n} \right)$

als Funktion von J gegeben, so kann man für jeden beliebigen

schiedene Werte von J fort, so erhält man die n/J -Linie, die einen hyperbolischen Verlauf aufweist und deren Grenzwerte im folgenden ermittelt werden.

Für $J = 0$ ist $\left(\frac{e}{n}\right)$ ein sehr kleiner nur von der Remanenz herrührender Betrag. Der zugehörige Wert der Drehzahl $n = \frac{U}{\left(\frac{e}{n}\right)}$

ist daher sehr groß, der Motor nimmt sehr hohe Drehzahlen an, er „geht durch“. Praktisch wird er mit Rücksicht auf die Reibungsverhältnisse nur die drei- bis vierfache Normaldrehzahl erreichen. Bei Leerlauf ist die Stromstärke nicht Null, sondern sehr klein; sie entspricht den elektrischen und mechanischen Verlusten. Für $n = 0$ muß $U - R J' = U/R$ sehr groß sein.

Die Selbstinduktion der Magnet- und Ankerwicklung, die beim plötzlichen Einschalten in Erscheinung tritt, verhindert das augenblickliche hohe Anwachsen des Stromes, so daß der Strom den durch vorstehende Gl. errechneten statischen Wert nicht erreicht.¹

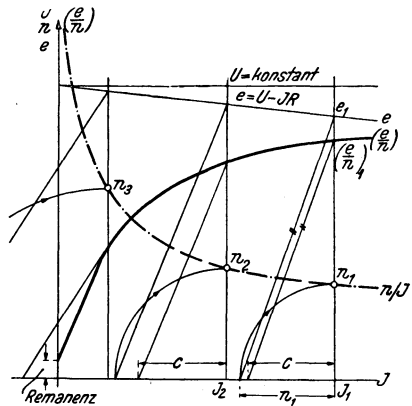


Abb. 10. Ermittlung der n/J -Kennlinie.

Die Drehzahllinie n/J geht mit größer werdendem J fast in eine Gerade über, welche die J -Achse bei sehr großem J schneidet. Der Verlauf des Drehmomentes ergibt sich aus der allgemeinen Gl. (2)

$$D = \varepsilon_1 k_a J \Phi, \text{ da } \Phi = f(J), \text{ so ist } D = \varepsilon_1 k_a J f(J).$$

Das Drehmoment ist daher im wesentlichen eine Funktion des Stromes und von der Spannung unabhängig; es wächst, so lange Φ eine geradlinige Funktion von J ist, quadratisch und später nahezu linear.

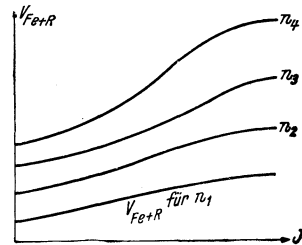


Abb. 11.

Der in der Gl. des Drehmomentes enthaltene Teilwirkungsgrad ε_1 kann aus der Gl.:

¹ Siehe *Trettin*, ETZ, 759 u. f., (1912).

$$D n = \varepsilon_1 \frac{30}{\pi g} (U - R J) J$$

als Funktion von J bestimmt werden, wenn $\Phi = f_\varphi(J)$ und $n = f_n(J)$ und R gegeben sind.

Man kann aber auch von den einzelnen Verlusten ausgehen, die aus Messungen vorliegen.

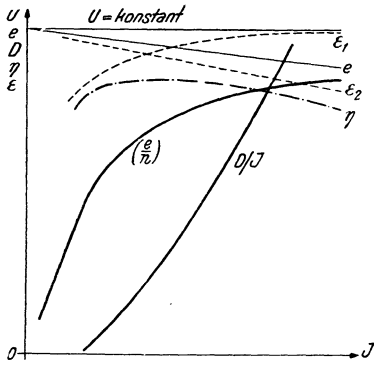


Abb. 12. $\frac{e}{n}/J$ - und D/J -Kennlinien.

Bezeichnet man mit L_e die elektrisch zugeführte, mit L_i die auf den Anker übertragene und mit L_m die mechanische abbremsbare Leistung und ist ferner V_{Fe+R}/J in Abb. 11 für eine bestimmte Spannung U gegeben, so ist: $V_{Fe+R} = L_i - L_m = e J - \varepsilon_1 e J = e J (1 - \varepsilon_1)$, daraus berechnet man $\varepsilon_1 = 1 - \frac{V_{Fe+R}}{e J}$ und der Verlauf von ε_1/J und D/J kann punktweise ermittelt werden. (Abb. 12.) Die D/J -Kurve schneidet wegen der Reibungsverluste schon vor dem Nullpunkt in der x Achse ein.

Der Gesamtwirkungsgrad wird nach Gl. (7) berechnet:

$$\eta = \frac{L_m}{L_e} = \frac{L_m L_i}{L_i L_e} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 = \frac{e J - V_{Fe+R}}{e J} \frac{e J}{U J} = \left(1 - \frac{V_{Fe+R}}{e J}\right) \frac{e}{U},$$

daher ist:

$$\varepsilon_1 = \left(1 - \frac{V_{Fe+R}}{e J}\right); \quad V_{Fe+R} = L_i (1 - \varepsilon_1),$$

$$\varepsilon_2 = \frac{e}{U} = \frac{U - J R}{U} = 1 - \frac{J R}{U} = 1 - \frac{V_{cu}}{U J}.$$

Der Verlauf von ε_2/J (Abb. 12) ist eine Gerade, und zwar ist für $J = 0$, $\varepsilon_2 = 1$. Ferner ergibt sich: $V_{cu} = U J (1 - \varepsilon_2) = L_e (1 - \varepsilon_2)$. Die abbremsbare mechanische Leistung kann aus dem entwickelten Drehmoment wie folgt berechnet werden:

$$L_m = D \frac{\pi n}{30} \text{ in kgm/sec} = D \frac{\pi n}{30} g \text{ in Watt} = D \frac{\pi n}{30 \cdot 75} \text{ in PS.}$$

a) *Verhalten des Serien-Motors bei geänderter Spannung.* Für die Spannung U ist die n/J -Linie gegeben, deren Verlauf für die Spannung U' ermittelt werden soll.

Es ist:

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{1}{k_e} \frac{U - R J}{\Phi} \text{ für } U, \\ n' &= \frac{1}{k_e} \frac{U' - R J}{\Phi} \text{ für } U' \end{aligned} \right\} \text{ für } J, \text{ bzw. } \Phi = \text{konstant.}$$

Man kann daher das Verhältnis bilden:

$$\frac{n'}{n} = \frac{U' - R J}{U - R J},$$

woraus n' berechenbar ist. Diese Beziehung läßt sich auch graphisch in Abb. 13 darstellen. Nach Einführung der Maßstäbe kann man schreiben:

$$\frac{n' \mu_n}{n \mu_n} = \frac{(U' - R J) \mu_e}{(U - R J) \mu_e}.$$

Man muß daher die n' -Werte im Verhältnis der Gegen-EMK berechnen oder konstruieren, da die tatsächliche n'/J -Kurve etwas tiefer liegt, als sich nach dem Verhältnis U/U' ergeben würde.

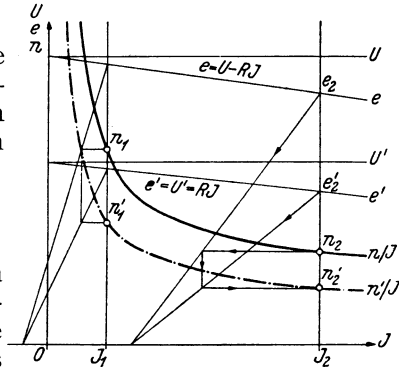


Abb. 13.

Das Drehmoment D'/J bei der geänderten Klemmenspannung U' kann aus D/J für U ermittelt werden:

Es ist

$$\left. \begin{aligned} D &= \varepsilon_1 k_D \Phi J \\ D' &= \varepsilon_1' k_D \Phi J \end{aligned} \right\} \text{ für } J, \text{ bzw. } \Phi \text{ konstant,}$$

damit ist

$$\frac{D'}{D} = \frac{\varepsilon_1'}{\varepsilon_1}.$$

Die genauen Eisen- und Reibungsverluste kann man aus experimentell aufgenommenen Kurvenscharen (Abb. 11) bestimmen und zu jedem J und n den Wirkungsgrad ε_1 ermitteln. Für überschlägige Rechnungen genügt es meist $\varepsilon_1' = \varepsilon_1$ zu setzen; daher ist $D'/J \doteq D/J$.

Der Wirkungsgrad η' bei der geänderten Spannung U' ergibt sich aus dem Wirkungsgrad bei der normalen Spannung U durch Division der beiden Gl.:

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \varepsilon_1 \varepsilon_2 \dots \text{ für } U \\ \eta' &= \varepsilon_1' \varepsilon_2' \dots \text{ für } U' \end{aligned} \right\} \eta' = \eta \frac{\varepsilon_1'}{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon_2'}{\varepsilon_2}.$$

Unter der Annahme konstanter Stromstärke steigt mit zunehmender Spannung $U' > U$ die Drehzahl n , wodurch der Eisenverlust größer und ε_1 kleiner wird. ε_2 hingegen wird bei zunehmender Spannung größer, da $\varepsilon_2 = e/U = 1 - RJ/U$. Für überschlägige

Rechnungen kann man in diesem Falle näherungsweise $\eta' \doteq \eta$ setzen.

b) *Verhalten des Serien-Motors bei geänderter Feldstärke.*
 Die Drehzahl des Motors kann durch Verkleinerung der Feldstärke bei gleichbleibendem Ankerstrom erhöht werden. Es geschieht dies entweder durch einen Widerstand parallel zur Feldwicklung nach Abb. 14 oder durch eine Feldwicklung mit mehreren Anzapfungen oder unter gleichzeitiger Anwendung beider Mittel. Ist $R_s = \text{konstant}$, so ist auch $J_m/J = \text{konstant} = \xi$. Mit Rücksicht auf die Kommutierung soll $\xi > 0,6$ gewählt werden, da sonst die Ankerrückwirkung das Feld zu stark verzerrt.

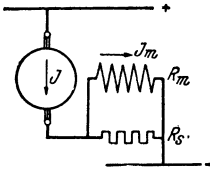


Abb. 14.

Es soll nun das Verhalten des Motors für eine bestimmte Magnetstromstärke J_m ermittelt werden, wenn das Verhalten bei vollem Feld bekannt ist. Wir betrachten den Motor nach Abb. 15 bei

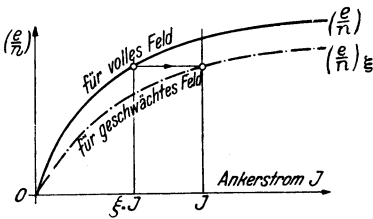


Abb. 15 a.

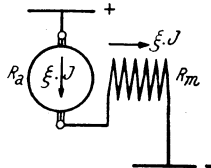


Abb. 15 b.

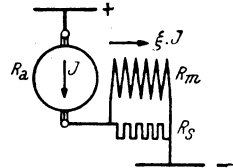


Abb. 15 c.

zwei verschiedenen Belastungszuständen, aber bei derselben Erregung. Die Zahl der Magnetamperewindungen ist daher in beiden Fällen $\xi J w$. Die Felder sind gleich groß und daher können die Drehzahl- und Momentkennlinien für die Feldschwächung aus den Kennlinien für das volle Feld bei gleicher Klemmenspannung und gleichen Anker- und Feldwiderständen abgeleitet werden.

Ungeshunteter Motor

Geshunteter Motor

Ges.-Widst. $R = R_a + R_m.$

Ges.-Widst. $R_\xi = R_a + \frac{R_m R_s}{R_m + R_s}$

Ankerstrom: $\xi J.$

Ankerstrom: $J.$

Feldstrom: $\xi J,$ Feld: $\Phi.$

Feldstrom: $\xi J,$ Feld: $\Phi.$

$$n = \frac{1}{k_e} \frac{e}{\Phi} = \frac{1}{k_e} \frac{(U - R \xi J)}{\Phi}, \quad n_\xi = \frac{1}{k_e} \frac{e_\xi}{\Phi} = \frac{1}{k_e} \frac{(U - R_\xi J)}{\Phi}.$$

Da die Felder gleich sind, verhalten sich:

$$\frac{n_\xi}{n} = \frac{U - R_\xi J}{U - R \xi J} = \frac{e_\xi}{e}.$$

Daraus kann n_ξ gerechnet oder nach Abb. 16 konstruiert werden.

Das Drehmoment des geshunteten Motors ergibt sich aus dem des normalen Serienmotors durch Division der Drehmomentgleichungen für diese beiden Fälle unter der Annahme gleicher Felderregung*:

$$D = \varepsilon_1 k_d \Phi \xi J \text{ für den normalen Motor,}$$

$$D_\xi = \varepsilon_{1\xi} k_d \Phi J \text{ für den geshunteten Motor.}$$

Solange die Drehzahlen n und n_ξ nicht sehr verschieden sind, kann man $\varepsilon_1 \doteq \varepsilon_{1\xi}$ setzen, wodurch D_ξ sich ergibt zu:

$$D_\xi = D \frac{\varepsilon_{1\xi}}{\varepsilon_1} \frac{1}{\xi} \doteq D \frac{1}{\xi}.$$

Die Konstruktion der Linie D_ξ/J ergibt sich aus D/J gemäß obigem Verhältniswert. Der zum Feld parallel geschaltete Widerstand wird meistens als induktiver Widerstand ausgebildet, damit beispielsweise bei elektrischen Bahnen beim Springen des Bügels die Stromverteilung im Feld und Shunt nicht gestört wird.

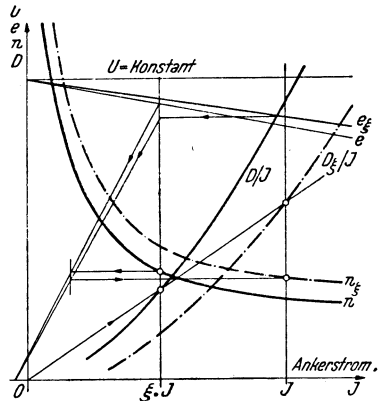


Abb. 16. Kennlinien des Motors mit Feldshunt.

c) Verhalten des Serienmotors bei geschwächtem Ankerstrom (mit Anker Shunt).¹ Wie beim feldgeschunteten Motor denkt man sich hier zwei verschiedene Belastungszustände bei gleichem Feldstrom, so daß wieder beide Motore das gleiche Feld Φ besitzen. Es ist nach Abb. 17:

$$U = (J_a + J_x) r_y + J_x r_x + (J_a + J_x) r_m,$$

$$U = J_a (r_y + r_m) + J_x (r_x + r_y + r_m) \text{ und}$$

$$J_x = \frac{U - J_a (r_y + r_m)}{r_x + r_y + r_m}, \text{ da } J_m = J_a + J_x$$

ist, wird

$$J_m = J_a + \frac{U - J_a (r_y + r_m)}{r_x + r_y + r_m}.$$

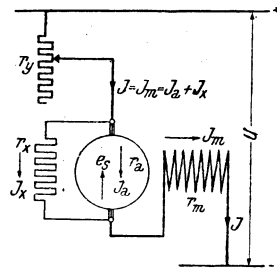


Abb. 17.

Den Feldstrom J_m kann man in zwei Teile zerlegen, und zwar in einen konstanten Teil, den Grundstrom J_0

$$J_0 = \frac{U}{r_x + r_y + r_m}$$

und in einen vom Ankerstrom abhängigen Zusatzstrom $J_a \lambda$.

¹ Siehe auch ETZ, 1197, (1934).

$$J_a \lambda = \frac{J_a r_x}{r_x + r_y + r_m},$$

wobei

$$\lambda = \frac{r_x}{r_x + r_y + r_m},$$

das Feldschwächungsverhältnis der Hauptstromwicklung darstellt. Somit ergibt sich für den Feldstrom $J_m = J_0 + J_a \lambda$.

Zur Ermittlung der Motorcharakteristik benötigen wir noch die Gegen-EMK aus der Spannungsgleichung. Es ist:

$$e_s = k_e \Phi n_s = U - (J_a + J_x)(r_y + r_m) - J_a r_a.$$

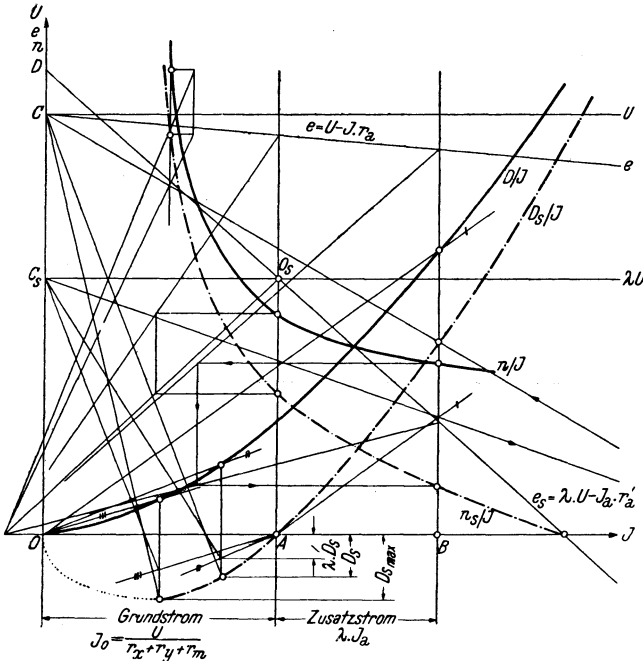


Abb. 18. Kennlinien des Motors mit Ankershunt.

Das Feld ist dasselbe wie beim ungeschunteten Motor, der mit der Stromstärke J belastet ist. Dieser Strom war aber

$$J_a + J_x = J_a + \frac{U - J_a (r_y + r_m)}{r_x + r_y + r_m} = \frac{U + J_a r_x}{r_x + r_y + r_m}.$$

Dieser Wert in obiger Gl. eingesetzt, ergibt

$$e_s = U - \frac{U + J_a r_x}{r_x + r_y + r_m} (r_y + r_m) - J_a r_a;$$

diese Gl. geordnet ergibt