

ET+A

Leistungselektronik und elektrische Antriebe

Kapitel 3

Gleichstrommaschine und Universalmotor

Adrian Omlin

Inhaltsverzeichnis Kapitel 3

3	DIE GLEICHSTROMMASCHINE	3
3.1	Aufbau und Wirkungsweise.....	3
3.2	Ersatzschaltung und Grundgleichungen	4
3.3	Schaltungsarten.....	6
3.3.1	Fremderregte Maschine	6
3.3.2	Die Nebenschlussmaschine.....	11
3.3.3	Die Seriemaschine	12
3.4	Ankerrückwirkung	14
3.4.1	Kompensationswicklungen	14
3.4.2	Wendepolwicklungen	14
3.5	Der Universalmotor	15
3.5.1	Allgemeines	15
3.5.2	Aufbau.....	15
3.5.3	Betriebsverhalten	16
3.5.4	Drehzahlsteuerung	18

3 Die Gleichstrommaschine

3.1 Aufbau und Wirkungsweise

Eine Gleichstrommaschine besteht üblicherweise aus einem feststehenden Stator mit einer Erregerwicklung (E), und aus einem rotierenden Teil, dem Rotor. Der Rotor wird oft als Anker bezeichnet, da in gewissen Ausführungen das Blechpaket eine ankerähnliche Form aufweist (A).

Durch die Erregerwicklung fließt der Erregerstrom, welcher ein magnetisches Feld erzeugt, das den Luftspalt und den Rotor der Maschine durchdringt. Bei permanent-erregten Gleichstrommaschinen wird das Feld mit einem Permanentmagneten erzeugt.

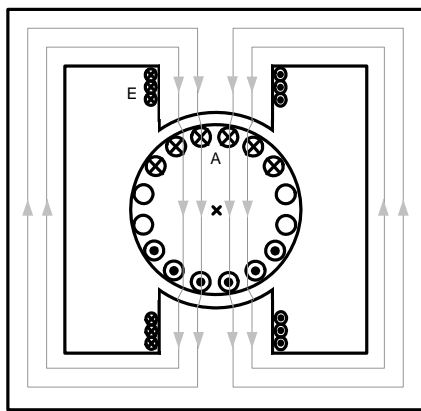


Abbildung 1. Schnitt Gleichstrommaschine

Fließt in den Leitern der Rotorwicklung ein Strom, wird auf jeden einzelnen Leiter eine Kraft ausgeübt (siehe Lorentz-Kraft, Kapitel 2). Die auf die Leiter wirkenden Kräfte bewirken zusammen mit dem Hebelarm, das ist der Abstand der Leiter zum Drehpunkt des Rotors, ein Drehmoment, das die Welle in Drehung versetzt.

Dreht der Rotor, wird in den Leitern eine Spannung induziert, die oft als EMK, elektromotorische Kraft bezeichnet wird.

Damit die stromdurchflossenen Leiter im Rotor fortwährend ein Drehmoment in die gleiche Richtung erzeugen, muss bei sich drehendem Rotor beim Wechsel des Polbereichs eine Umschaltung der Stromrichtung in den einzelnen Leitern erfolgen. Dies erreicht man durch den Kollektor, auch Stromwender oder Kommutator genannt. Er besteht aus voneinander isolierten Kupfersegmenten und sitzt mit dem Blechpaket des Rotors auf der Welle. Die einzelnen Windungen (oder Wicklungsteile, bestehend aus mehreren in Serie oder parallel geschaltete Windungen) sind mit ihren Anfängen und Enden auf den Segmenten angelötet. Die Stromzufuhr erfolgt über Kohlebürsten, die über die Kupfersegmente des Stromwenders gleiten. Wechseln die zu einer Windung gehörenden Leiter durch diese neutrale Zone zwischen den Hauptpolen, so ändert sich Stromrichtung. Der Stromwender erfüllt damit die Funktion eines

Schalters, der den Strom in den einzelnen Leitern zum richtigen Zeitpunkt umpolt. In den einzelnen Ankerstäben fließt dadurch zeitlich ein etwa rechteckförmiger Wechselstrom.

Unten ist der Rotor der Maschine nochmals dargestellt. Links das Schnittbild, rechts der über den Umfang abgewickelte Rotor, der die einzelnen Wicklungen zeigt. Dabei ist die Serieschaltung der einzelnen Wicklungen erkennbar. Die schwarzen Rechtecke stellen die Kohlenbürsten dar, die über die Segmente des Kollektors gleiten.

Dargestellt ist eine Maschine mit 16 Leiterstäben. Je nach Auslegung der Maschine kann sie eine weit grössere Anzahl Leiterstäbe aufweisen oder es sind viele feine Kupferwindungen vorhanden. Das Grundprinzip bleibt sich aber dasselbe.

Die Darstellung zeigt eine Rotorposition, bei der die Bürsten genau zwei benachbarte Kollektorlamellen kurzschliessen. In dieser Übergangsphase wechselt der Strom in den Wicklungen, die über die Kohlebürsten kurzgeschlossen sind, das Vorzeichen. Links sind die betroffenen Leiter ohne Markierung für die Stromrichtung dargestellt, rechts weisen sie keinen Pfeil auf und sind fetter gezeichnet.

Beim Weiterdrehen des Rotors liegen die Kohlebürsten nur noch auf je einem Kollektorsegment auf und in den vorher stromlosen Leitern baut sich ein entsprechender Strom auf. Wird der Rotor noch weiter gedreht, schliessen die Kohlebürsten die nächsten Windungen kurz, die dann auch stromlos werden, bevor sie beim Weiterdrehen einen Strom in umgekehrter Richtung eingeprägt bekommen. So wird erreicht, dass die auf die Leiter wirkende Kraft immer in die gleiche Richtung zeigt.

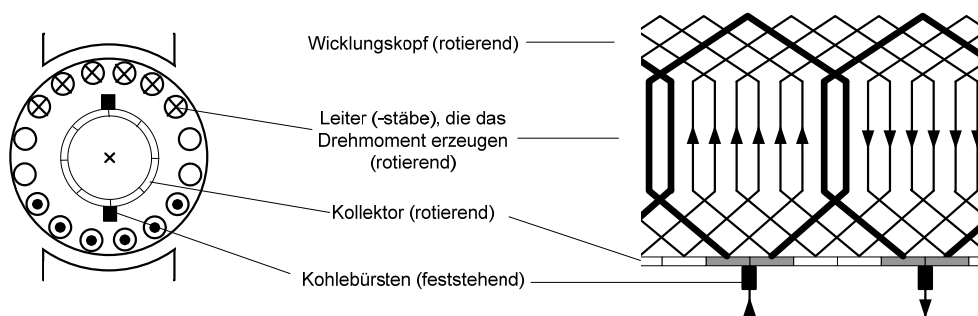


Abbildung 2. Rotor einer GM mit Kommutator, Schnittbild und „abgewinkelte“ Darstellung.

3.2 Ersatzschaltung und Grundgleichungen

Die Gleichstrommaschine enthält normalerweise zwei elektrische Kreise:

1. Den Ankerkreis (Rotorkreis), bestehend aus 'idealem Anker', in dem wie oben gezeigt, die Spannung induziert wird, mit Ankerinduktivität und Ankerwiderstand (ohm'scher Widerstand der Ankerwicklung).

2. Den Erregerkreis (Stator), der den Erregerfluss erzeugt. Die Erregerspule kann ebenfalls durch eine ideale Induktivität und den Wicklungswiderstand beschrieben werden. Je nach Höhe des Stromes in dieser Wicklung muss die magnetische Sättigung des Eisens berücksichtigt werden.

Daraus ergibt sich folgende Ersatzschaltung für den elektrischen Teil der Maschine:

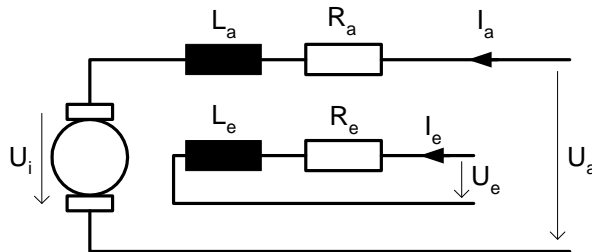


Abbildung 3. Ersatzschaltung der Gleichstrommaschine (fremderregt)

Die eingezeichneten Strom- und Spannungsrichtungen entsprechen dem Verbrauchersystem, das heisst die elektrische Leistung wird im Motorbetrieb positiv.

Auf der mechanischen Seite müssen Trägheitsmoment J und Reibungsmoment M_R berücksichtigt werden, um aus dem elektrischen Moment (oder inneren Moment), das am Anker angreift, auf das Moment M_D an der Welle zu kommen.

Hauptgleichungen (Verbrauchersystem, d.h. positiv, wenn Motorbetrieb):

Elektrisch:

$$\text{Ankerkreis:} \quad U_a = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + U_i$$

$$\text{Erregerkreis:} \quad U_e = R_e \cdot I_e + L_e \cdot \frac{dI_e}{dt}$$

$$\text{Mechanisch:} \quad M_{el} = M_{Welle} + M_R + J \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$\text{Kopplung el.} \leftrightarrow \text{mech:} \quad U_i = c \cdot \phi \cdot \omega_m$$

$$M_{el} = c \cdot \phi \cdot I_a$$

$$\text{Erregerfluss:} \quad \phi = \frac{L_e}{N_e} \cdot I_e$$

c ist eine Maschinenkonstante, die unter anderem die Windungszahl enthält. Sie ist entweder bekannt oder sie kann messtechnisch ermittelt werden. Auch eine Berechnung bei Kenntnis des Aufbaus der Maschine ist möglich [Fi].

3.3 Schaltungsarten

Das Verhalten der Maschine hängt wesentlich davon ab, wie die Erregerwicklung geschaltet ist. Die Erregerwicklung kann vom Ankerkreis völlig unabhängig sein, sie kann parallel oder sie kann in Serie zur Ankerwicklung geschaltet sein.

Die Konsequenzen daraus werden im Folgenden für das stationäre Verhalten untersucht. Das Verhalten wird vor allem durch die äussere Charakteristik (Drehzahl-Drehmoment- Kennlinie n - M und Spannungs-Strom-Kennlinie U - I) beschrieben.

3.3.1 Fremderregte Maschine

Bei der Fremderregten Maschine (Ersatzschema gemäss Abbildung 3) wird der Erregerkreis unabhängig vom Ankerkreis gespeist. Der Erregerfluss kann somit unabhängig vom Ankerstrom eingestellt werden.

Unter diesen Bedingungen gilt stationär:

$$U_a = U_i + R_a \cdot I_a = c \cdot \phi \cdot \omega_m + R_a \cdot I_a$$

Dabei ist ϕ_e konstant, wenn I_e konstant ist.

Daraus folgt, dass die Maschine im Generatorbetrieb eine Spannungsquelle mit Leerlaufspannung U_i und Innenwiderstand R_a darstellt, wenn sie mit konstanter Drehzahl angetrieben wird.

Um im Motorbetrieb die Drehzahl in Abhängigkeit des Flusses, der Ankerspannung und des Moments zu erhalten, wird die Gleichung folgendermassen umgeformt:
Aus

$$\omega_m = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{c \cdot \phi}$$

mit

$$M_{el} = c \cdot \phi \cdot I_a$$

wird

$$\omega_m = \frac{U_a}{c \phi} - \frac{R_a}{c^2 \phi^2} \cdot M_{el}$$

Im Leerlauf ($M = 0 \rightarrow I_a = 0$, d.h. $U_a = U_i$) wird die mechanische Kreisfrequenz:

$$\omega_{m0} = \frac{U_a}{c \phi}$$

und die Leerlaufdrehzahl:

$$n_0 = \omega_{m0} \cdot \frac{60}{2\pi} [U / \min]$$

Bei Belastung nimmt die Drehzahl proportional mit dem Moment ab. Die Steigung beträgt:

$$-\frac{R_a}{c^2 \phi^2}$$

Bei konstantem Fluss und veränderlicher Ankerspannung ergibt sich folgende Kennlinienschar:

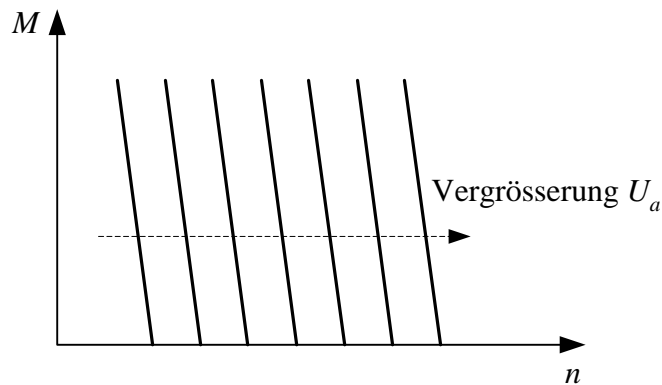


Abbildung 4. Fremderregte GM, M - n -Kennlinie, I_e , $\phi_e = \text{konst.}$, Parameter: U_a

Wird die Ankerspannung konstant gehalten und der Fluss variiert, ergibt sich untenstehende Kennlinienschar:

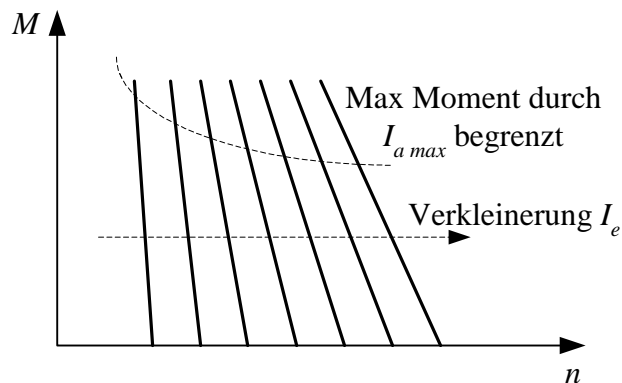


Abbildung 5. Fremderregte GM, M - n -Kennlinie, $U_a = \text{konst.}$, Parameter: I_e

Eine Drehzahlregelung der Maschine kann somit über die Ankerspannung oder über den Erregerfluss erfolgen. Erfolgt die Drehzahlerhöhung durch Verkleinerung des Erregerflusses, spricht man von **Feldschwächung**. Dabei wird auch das Moment verkleinert.

Oft wird bei drehzahlvariablen Gleichstromantrieben sowohl von der Drehzahleinstellung via Ankerspannung als auch von der Drehzahleinstellung via Erregerfeld Gebrauch gemacht.

Im unteren Drehzahlbereich wird bei vollem Fluss eine Erhöhung der Drehzahl durch eine Erhöhung der Ankerspannung erreicht. Bei maximalem Ankerstrom bleibt dabei das Moment konstant. Die Leistung nimmt bei gleich bleibendem Moment und damit gleich bleibendem Ankerstrom linear mit der Ankerspannung zu.

Bei Erreichen der maximal zulässigen Ankerspannung, entweder ist sie begrenzt durch die Isolation der Maschine oder durch die maximale Ausgangsspannung des Umrichters, kann die Drehzahl durch Feldschwächung weiter erhöht werden. Die Ankerspannung bleibt dabei konstant auf ihrem Maximum. Da der Ankerstrom thermisch auf einen Maximalwert begrenzt ist, nimmt im Feldschwächbereich auch das Moment mit $1/\omega_m$ ab. Der daraus resultierende Betriebsbereich ist in Abbildung 6 dargestellt.

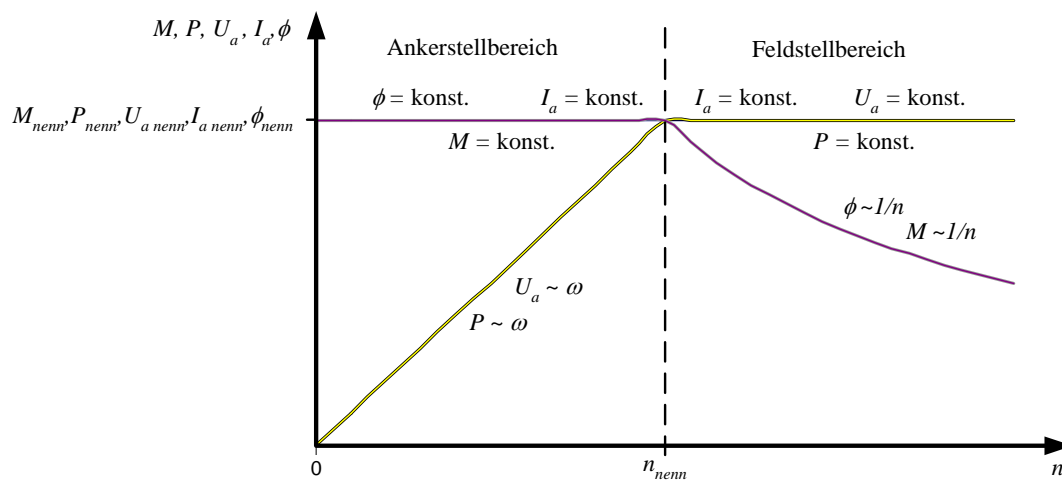


Abbildung 6. Drehzahlstellbereiche der Fremderregten GM

Die Zeitkonstante im Erregerkreis $T_e = L_e/R_e$ ist deutlich grösser als jene im Ankerkreis $T_a = L_a/R_a$. Eine Regelung mit guter Dynamik greift also mit Vorteil auf den Ankerkreis ein, was allerdings ein Stellglied erfordert, das die volle Maschinenleistung liefern kann.

Zur Drehrichtungsumkehr im motorischen Betrieb, d.h. bei gleichzeitiger Umkehrung des Vorzeichens des Drehmoments, kann sowohl der Ankerkreis als auch der Erregerkreis umgepolt werden. Auch hier gilt, dass eine Umpolung des Erregerkreises deutlich mehr Zeit in Anspruch nimmt, da hier die Zeitkonstanten grösser sind.

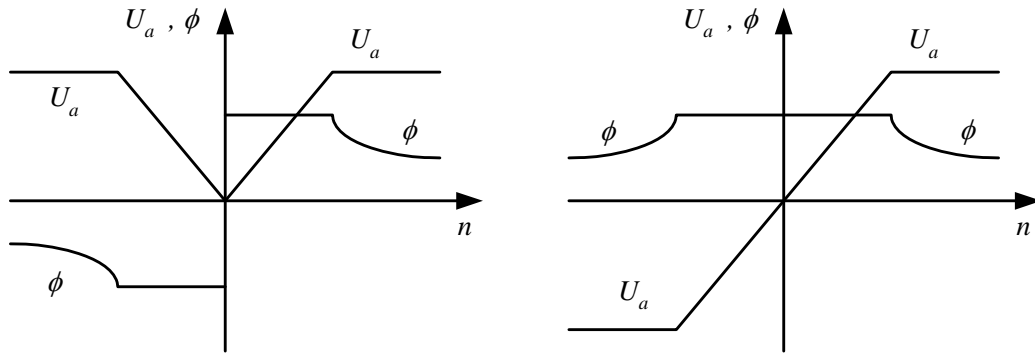


Abbildung 7. Drehrichtungsumkehr bei Fremderregter GM
 Links: Feldumkehr
 Rechts: Ankerspannungsumkehr

Anlauf:

Wird am Ankerkreis einer stillstehenden Gleichstrommaschine bei eingeschalteter Erregung Nennspannung angelegt, fällt die ganze Spannung über R_a und L_a ab, da U_i noch null ist. Es entsteht dadurch ein schnell ansteigender, hoher Gleichstrom, dessen Endwert nur durch R_a begrenzt wird. Damit entsteht zwar ein grosses Anlaufmoment, aber auch eine hohe thermische Beanspruchung der Maschine. Der Strom wird erst mit zunehmender Drehzahl und damit höherem U_i kleiner. Das Lastmoment und die Trägheit des Antriebsstrangs dürfen also beim Anlauf mit Nennspannung nicht zu gross sein, da sonst die Maschine thermisch überlastet werden kann. Bei Verwendung eines Umrichters kann dieser so geregelt werden, dass der Ankerstrom seinen maximal zulässigen Wert nie überschreitet.

Drehmomentumkehr:

Ausgehend von der Drehmomentgleichung ergibt sich, dass für eine Drehmomentumkehr entweder der Fluss oder der Ankerstrom umgekehrt werden muss.

Unter Vierquadrantenbetrieb versteht man den Betrieb in beide Drehrichtungen, wobei sowohl Motor- als auch Generatorbetrieb möglich ist.

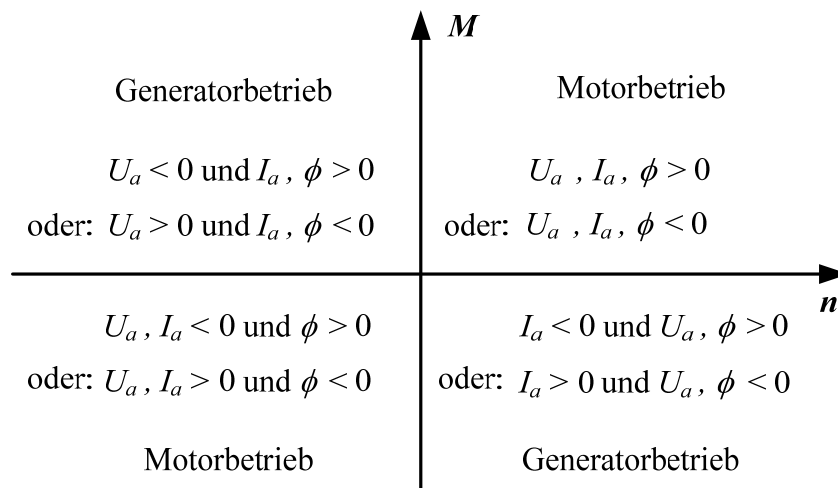


Abbildung 8. Fremderregte GM im 4Q Betrieb

Die Fremderregte Gleichstrommaschine kann, auch wenn nur eine Feldrichtung zur Verfügung steht, wie das z.B. bei einer mit einem Permanentmagneten erregten Maschine der Fall ist, in allen vier Quadranten betrieben werden.

3.3.2 Die Nebenschlussmaschine

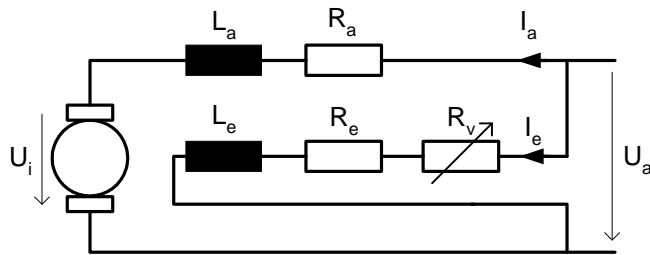


Abbildung 9. Ersatzschaltung der Nebenschlussmaschine.

Bei dieser Schaltungsart sind Erregerkreis und Ankerkreis parallelgeschaltet. ($U_a = U_e$). Die Erregung kann meist über einen Vorwiderstand R_v beeinflusst werden.

$$\phi = \frac{L_e}{N_e} \cdot I_e = \frac{L_e}{N_e} \cdot \frac{U_a}{R_e + R_v},$$

Im Motorbetrieb mit konstanter Klemmenspannung U_a hat die Maschine das gleiche Verhalten (äussere Charakteristik) wie die Fremderregte Maschine. Ohne Berücksichtigung der Sättigung (lineare Magnetisierungskennlinie) wird die Leerlaufdrehzahl aber unabhängig von U_a :

$$\omega_{m0} = \frac{U_a}{c\phi} = \frac{U_a}{c} \cdot \frac{1}{\frac{L_e U_a}{N_e (R_e + R_v)}} = \frac{N_e (R_e + R_v)}{c \cdot L_e}$$

Die Drehzahlabhängigkeit vom Moment gehorcht folgender Formel:

$$\omega_m = \frac{N_e (R_e + R_v)}{c \cdot L_e} - \frac{R_a \cdot (R_e + R_v)^2 \cdot N_e^2}{(c \cdot L_e \cdot U_a)^2} \cdot M_{el}$$

Eine höhere Klemmenspannung bewirkt also eine flachere M-n-Charakteristik. Bei Vernachlässigung der Sättigung ergibt sich mit der Klemmenspannung als Parameter folgender Verlauf:

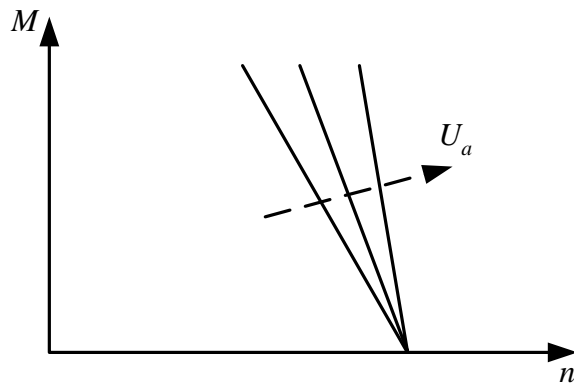


Abbildung 10. M-n Charakteristik des Nebenschlussmotors

Der Nebenschlussgenerator weist ein stark nichtlineares und bei hoher Belastung instabiles Verhalten auf.

3.3.3 Die Seriemaschine

Dieser Maschinentyp wird auch als Reihenschluss- oder Hauptschlussmaschine bezeichnet.

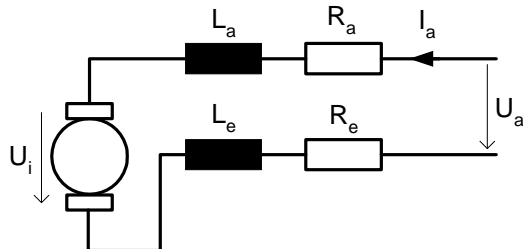


Abbildung 11. Ersatzschaltung der Seriemaschine

Diese Maschine besitzt eine niederohmige Erregerwicklung, die in Serie zum Ankerkreis geschaltet wird. Erregerstrom und Ankerstrom sind also jederzeit gleich gross.

$$I_e = I_a$$

$$\phi = \frac{L_e}{N_e} \cdot I_e = \frac{L_e}{N_e} \cdot I_a$$

$$\omega_m = \frac{U_a - (R_a + R_e)I_a}{c \frac{L_e}{N_e} I_a}$$

Die Maschine kann ohne Last „durchbrennen“: für $I_a \rightarrow 0$ wird $\omega_m \rightarrow \infty$

Für das Drehmoment gilt:

$$M_{el} = c \cdot \frac{L_e}{N_e} \cdot I_a^2$$

Das Moment steigt quadratisch mit I_a . Wird die Maschine bei konstanter Spannung betrieben, hat sie bei niedrigen Drehzahlen ein hohes Moment (hohes Anfahrmoment), das mit zunehmender Drehzahl schnell abfällt. Diese Charakteristik ist für viele Anwendungen erwünscht (elektrische Traktion, viele Werkzeugmaschinen). Der Hauptschlussmotor darf aber nicht im Leerlauf betrieben werden, da die Drehzahl dort sehr hoch wird. Hingegen ist die nichtlineare Charakteristik für geregelte Antriebe ungünstig, dort werden vorwiegend Fremderregte Motoren eingesetzt.

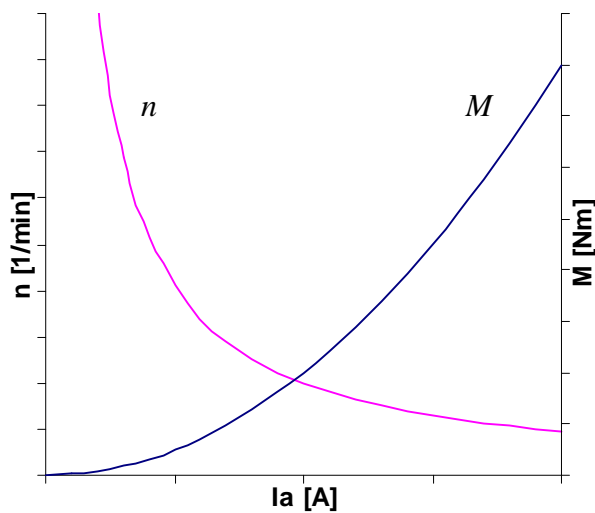


Abbildung 12. Drehzahl und Drehmoment in Funktion des Stromes beim Serimotor

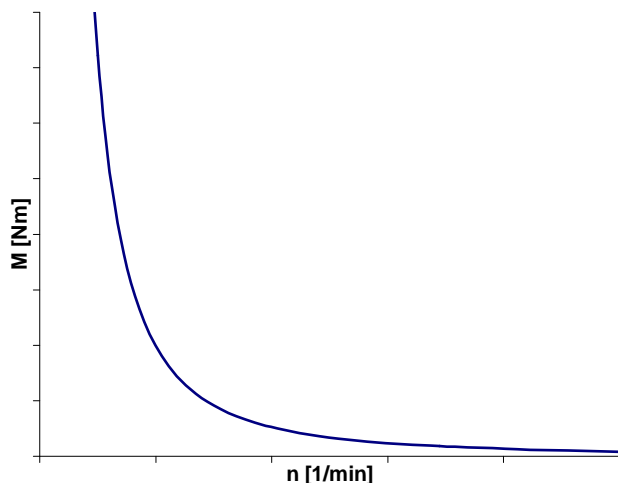


Abbildung 13. Drehmoment in Funktion der Drehzahl beim Serimotor

3.4 Ankerrückwirkung

Bisher wurde angenommen, dass die Luftspaltinduktion allein durch den Erregerstrom verursacht wird. Fliesst auch in der Ankerwicklung ein Strom, so erzeugt dieser ebenfalls einen Fluss, welcher teilweise durch den Luftspalt verläuft. Die Überlagerung des Erregerfeldes durch das Ankerfeld bezeichnet man als Ankerrückwirkung.

Durch die Ankerrückwirkung wird im Motorbetrieb das Luftspaltfeld an den ablaufenden Polkanten geschwächt und an den auflaufenden Polkanten verstärkt. Wird die Maschine im ungesättigten Zustand betrieben, so heben sich Flussverstärkung und Flussschwächung auf. Die induzierte Spannung der Maschine verändert sich als Folge der Ankerrückwirkung also nicht.

Betrieibt man die Maschine jedoch nahe am gesättigten Zustand, so verringert sich als Folge der Ankerrückwirkung der Fluss eines Poles, da Feldverstärkung und Feldschwächung sich nicht mehr die Waage halten. Die induzierte Spannung der Maschine nimmt ab.

Als Folge der Ankerrückwirkung und der daraus resultierenden Feldverzerrungen können zwischen benachbarten Kollektorlamellen grosse Spannungsdifferenzen entstehen. Dadurch kann ein Rundfeuer längs des Kollektors entstehen.

3.4.1 Kompensationswicklungen

Bei grossen Maschinen ist man bestrebt, auch unter den Hauptpolen die Feldverzerrungen auszugleichen. Dies erfolgt durch Anordnung von Kompensationswicklungen, welche in den Polschuhen der Hauptpole untergebracht werden. Die Kompensationswicklungen werden ebenfalls vom Ankerstrom durchflossen.

Ein ähnliches Verfahren wird bei der so genannten Compoundmaschine verwendet. Sie hat sowohl eine Serieerregerwicklung als auch eine fremderregte Nebenschlusswicklung. Durch die vom Ankerstrom durchflossene Serieerregerwicklung kann der am Ankerwiderstand entstehende Spannungsabfall kompensiert werden. Es kann so z.B. ein Gleichstromgenerator mit lastunabhängiger Ausgangsspannung realisiert werden.

3.4.2 Wendepolwicklungen

In der geometrisch neutralen Zone werden zur Verbesserung der Kommutierung Pole angeordnet, deren Wicklungen vom Ankerstrom durchflossen werden. Sie induzieren in den Windungen, in denen der Strom das Vorzeichen wechselt, eine Spannung, die diese „Stromwendung“ (deshalb der Name „Wendepolwicklung“ unterstützt. Bei kleinern, günstigen Motoren werden diese Wicklungen weggelassen.

3.5 Der Universalmotor

3.5.1 Allgemeines

Dieser Motor ist praktisch baugleich mit der Serieerregten Gleichstrommaschine. Da diese Maschinen einen Kollektor benötigen, werden sie auch Kollektormotoren genannt. Serieerregte Kollektormotoren können, da ihr Drehmoment proportional zum Produkt aus Ankerstrom und Fluss ist, auch mit Wechselstrom betrieben werden. Dabei ändern pro Periode sowohl der Strom als auch der Fluss zweimal ihre Vorzeichen. Das Drehmoment pulsiert also mit der doppelten Netzfrequenz. Sein Mittelwert ist ungleich Null. Diese Motoren sind vor allem in Haushalt und Gewerbe stark verbreitet. Sie können mit Gleich- und Wechselspannung betrieben werden und werden deshalb "Universalmotoren" genannt.

Oft werden sie einphasig über einen AC - Steller gespeist. Der Leistungsbereich erstreckt sich dabei bis zu einigen kW (Staubsauger, Handbohrmaschine etc.).

Daneben sind serieerregte, einphasig AC - gespeiste Kollektormotoren eingesetzt als Fahrmotoren bei 16,7 Hz – Bahnen. Gespeist sind sie über einen Stufenschalter ab einem Transformator mit verschiedenen Anzapfungen. Beispiel: Fahrmotor der sechsmotorigen SBB Lokomotive Serie 620, Leistung ca. 1300 kW pro Motor. Heute werden diese Motoren für Bahnanwendungen kaum mehr neu gebaut, da sie durch Umrichter gespeiste Drehstrom-Asynchronmaschinen abgelöst wurden.

3.5.2 Aufbau

Universalmotoren sind meist zweipolig aufgebaut, in der Regel mit symmetrischem Statorquerschnitt. Über die beiden Polkerne ist je eine Hälfte der Erregerwicklung gelegt. Zudem sind wegen der AC - Speisung sowohl Rotor als auch Stator geblecht ausgeführt:

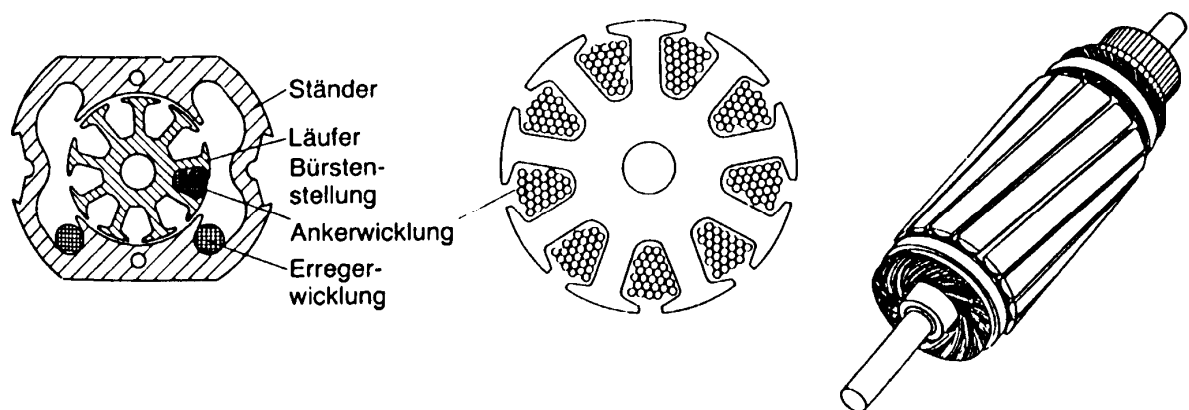


Abb. 3-1: Querschnitt durch Universalmotor, rechts Ansicht Rotor
Abbildung aus Skript H. Burtscher [Bu]

Wendepole sind im Allgemeinen aus Kosten- und Volumengründen nicht vorhanden, weshalb die Kommutierung erschwert ist. Von Auge sind Funkensprünge zu

erkennen. Deshalb muss der Universalmotor in der Regel mit einem Entstörfilter versehen werden.

3.5.3 Betriebsverhalten

Das Verhalten des Wechselstrom-Kollektormotors kann mit dem Modell des Gleichstrommotors beschrieben werden. Dabei ist zu beachten, dass die Eisenverluste im magnetischen Pfad der Erregerwicklung sowie die Stromwärmeverluste in den kurzgeschlossenen, kommutierenden Ankerspulen vernachlässigt sind. Es werden nur die Grundwellen betrachtet. Bei gesättigten Maschinen wird die Sinus-Form des Stromes verzerrt, so dass Oberwellen auftreten, welche im Folgenden auch nicht berücksichtigt sind.

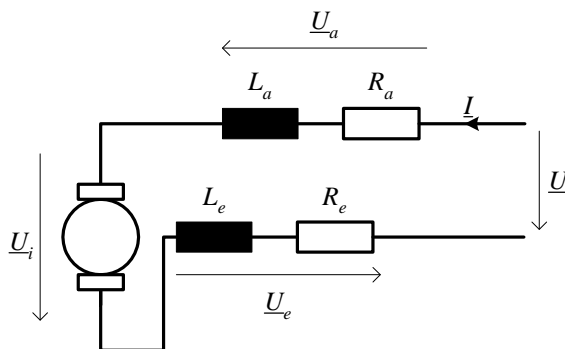


Abb. 3-2 Modell des Kollektormotors in Serieschaltung

Bei Speisung mit AC müssen auch im stationären Zustand die Induktivitäten berücksichtigt werden. Mit der komplexen Wechselstromtheorie ergibt sich dabei:

$$\underline{U}_e = \underline{I} \cdot R_e + j\omega L_e \underline{I}$$

$$\underline{U}_a = \underline{I} \cdot R_a + j\omega L_a \underline{I}$$

$$\underline{U}_i = c \underline{\phi} \omega_m = c \frac{L_e}{N_e} \underline{I} \omega_m \quad \text{da} \quad \underline{\phi} = \frac{L_e}{N_e} \underline{I}$$

Ohne Berücksichtigung der Sättigung ist $\Phi \sim I$, das heisst $U_i \sim I$: Strom und induzierte Spannung sind somit in Phase. Des Weiteren gilt für die Serieerregung:

$$\underline{U}_a + \underline{U}_e + \underline{U}_i = \underline{U}:$$

$$\underline{U} = \underline{U}_i + \underline{I}(R_a + R_e) + j\omega \underline{I}(L_a + L_e)$$

Obige Gleichung kann als Zeigerdiagramm dargestellt werden:

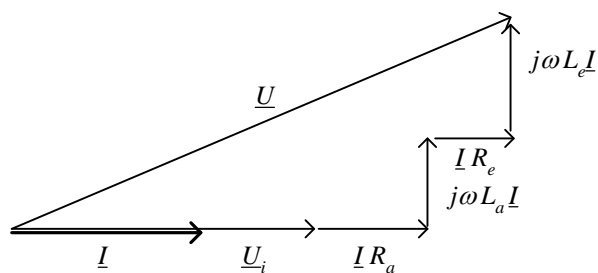


Abb. 3-3: Zeigerdiagramm der Spannungen

Da bei Vernachlässigung der Sättigung der Fluss proportional zum Strom ist, ist das Drehmoment proportional zum Strom im Quadrat:

$$M_{el} = c \Phi I = c \frac{L_e}{N_e} I^2$$

Und somit ergibt sich folgende Abhängigkeit der Drehzahl (bzw. der mech. Kreisfrequenz) vom Drehmoment (\sim in der rechten Gleichung bedeutet proportional):

$$\omega_m = \frac{|\underline{U} - (R_a + R_e) \underline{I} - j\omega(L_a + L_e) \underline{I}|}{\sqrt{c \frac{L_e}{N_e} M_{el}}} \quad \text{bzw.} \quad \omega_m \sim \frac{U_i}{\sqrt{M_{el}}}$$

Die zeitlichen Verläufe von Strom, Spannung und Drehmoment sind in Abb. 3-4 ersichtlich. Das Drehmoment pulsiert mit der doppelten Netzfrequenz. Wegen der Trägheit des Rotors ist an der Welle das mittlere Moment (linearer Mittelwert) wirksam.

Für Speisung mit konstanter Spannung \underline{U} ergibt sich die Drehmoment - Drehzahl - Kennlinie des Universalmotors gemäss Abb. 3-5:

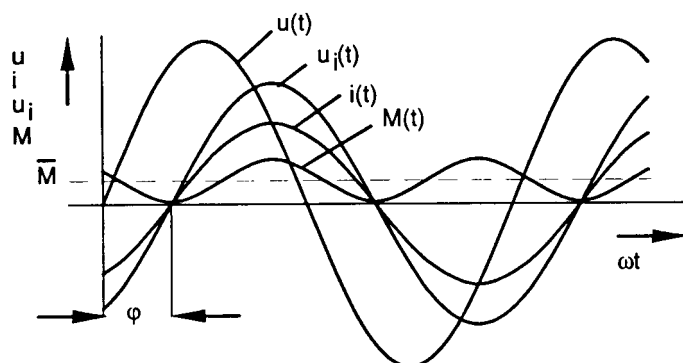


Abb. 3-4: Zeitverlauf von Spannung, Strom und Moment
Abbildung aus Skript H. Burtscher [Bu]

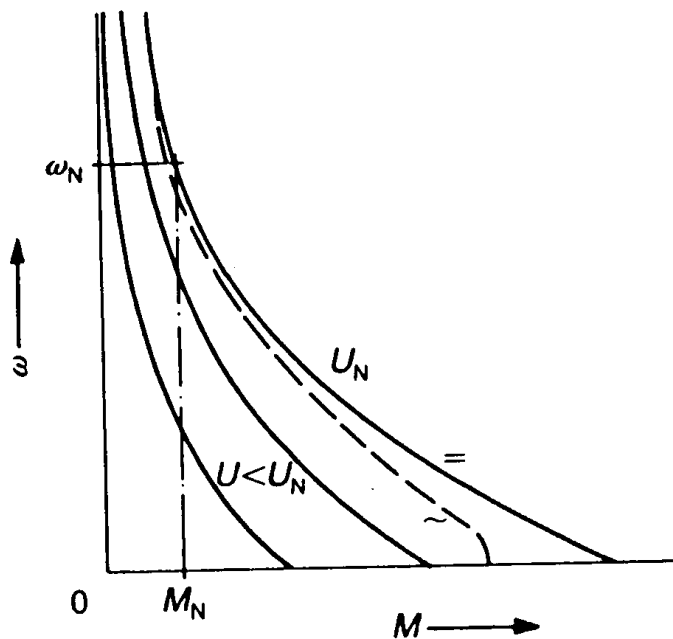


Abb. 3-5: Drehmoment - Drehzahl - Kennlinie bei Gleich- (=) und Wechselspannungsspeisung (~) und bei reduzierter Spannung
Abbildung aus Skript H. Burtscher [Bu]

Bei kleinen Drehzahlen ist die induzierte Spannung U_i klein und der Strom I wird nur durch die Widerstände und Reaktanzen im Stator- und Rotorkreis begrenzt. Da insbesondere die Induktivität der Feldwicklung relativ gross ist, liegen die Anfahrströme kaum über dem 3- bis 5-fachen Nennstrom. Allerdings wird bei kleinen Drehzahlen der $\cos\phi$ schlecht (siehe Zeigerdiagramm).

Für kleine Ströme müsste die Drehzahl theoretisch unendlich gross werden; wegen der Bürsten- und Lagerreibung wird die Leerlaufdrehzahl in der Praxis jedoch auf den doppelten bis dreifachen Nennwert begrenzt.

3.5.4 Drehzahlsteuerung

Die Drehzahl kann beim Universalmotor wie bei der Serieerregten Gleichstrommaschine durch Variation der Speisespannung, durch Vorwiderstände oder durch Feldschwächung eingestellt werden.

Für billige und kleine Anwendungen (z.B. Stabmixer) genügt die Anzapfung der Erregerwicklung über Stufenschalter, die so genannte **Feldumschaltung**:

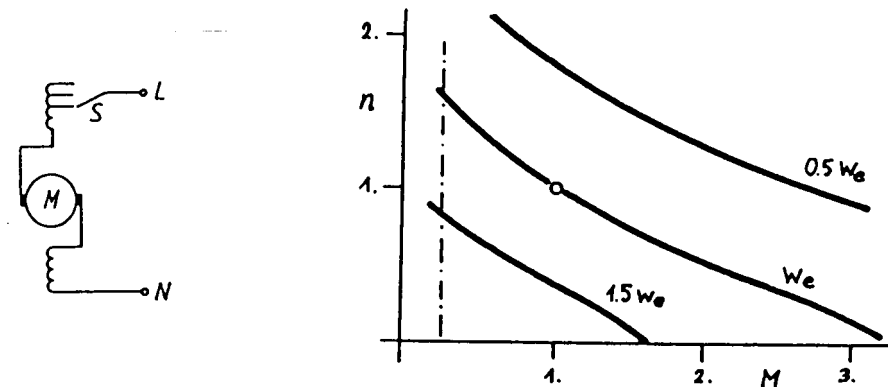
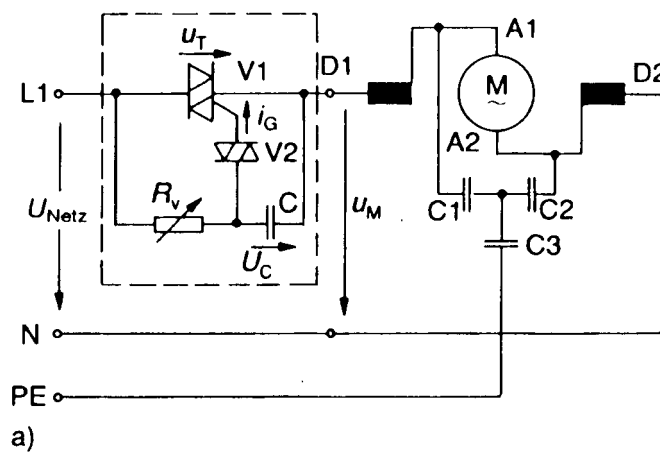


Abb. 3-6: Drehzahleinstellung durch Feldumschaltung
Abbildung aus Skript H. Burtscher [Bu]

Für eine stufenlose Steuerung hat sich heute der AC - Steller durchgesetzt. Als Stellglied dient bei kleinen Leistungen ein Triac (zwei antiparallel geschaltete Einschaltthyristoren), oft gezündet über einen Diac. Abb. 3-7 zeigt ein Schaltungsbeispiel für einen AC-Steller mit Diac und Netzfilter. Ist Drehrichtungsumkehr erforderlich, braucht lediglich entweder der Anker oder das Feld umgepolt zu werden.



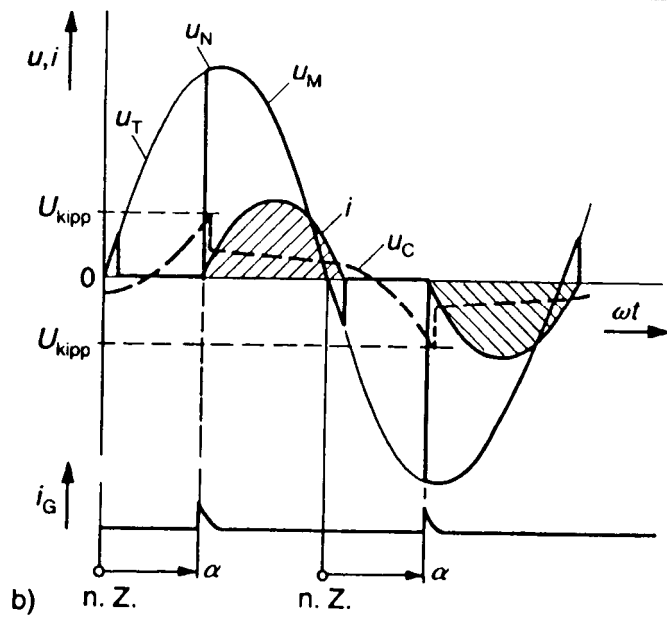


Abb. 3-7: Universalmotor an AC - Steller
 a) Schaltung
 b) zugehöriger Strom- und Spannungsverläufe
 Abbildung aus Skript H. Burtscher [Bu]