

11 Gleichstrommaschine

Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen werden für Antriebe eingesetzt, an die hohe Anforderungen bezüglich der Steuer- und Regelbarkeit der Drehzahl und des Drehmoments gestellt werden. Wegen ihres Betriebsverhaltens als Energiewandler von elektrischer in mechanische Energie und umgekehrt lassen sich Gleichstrommaschinen an viele Arbeitsmaschinen nahezu ideal anpassen, wobei sich das statische und dynamische Betriebsverhalten mit großer Genauigkeit vorherbestimmen läßt. Der Leistungsbereich erstreckt sich von 0,2 W bei Kleinstmotoren bis in den Megawattbereich bei großen Walzwerksantrieben.

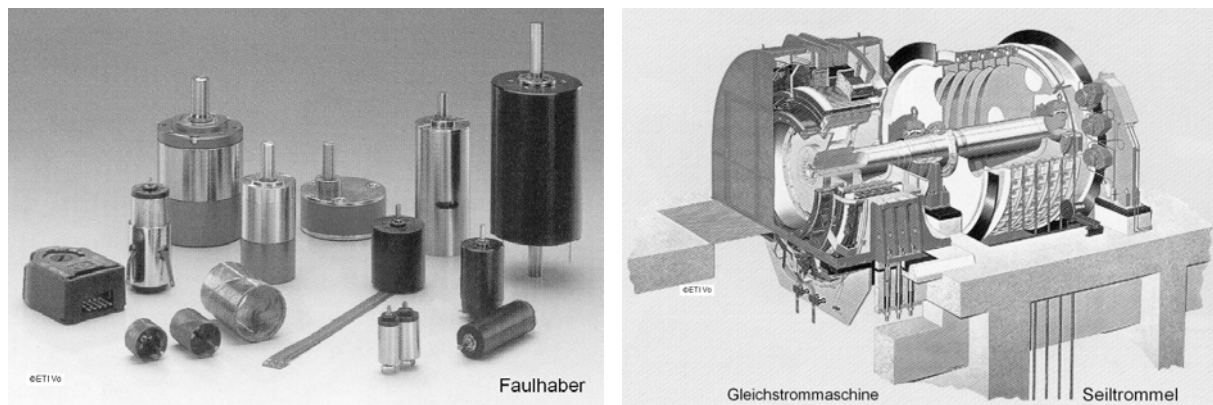


Bild 11.1: Gleichstrommaschinen: Kleine Gleichstrommaschinen mit Leistungen von 0,5 bis 30 W (links); Gleichstrommaschine mit 4,3 MW bei einem Förderantrieb in einer Schachtanlage in Kiruna, Nordschweden (ABB)

Aufgrund der Vorteile werden Gleichstrommaschinen bei den folgenden Antrieben mit wirtschaftlicher Drehzahlverstellung in weiten Grenzen eingesetzt.

- Walzantrieb
- Große Fördermaschinen
- Aufzüge mit besonders guter Geschwindigkeitsregelung
- Hilfsantriebe in Fahrzeugen, z.B. Anlasser
- Universalmaschinen bei Haushaltsgeräten

Den Vorteilen stehen auch einige Nachteile gegenüber. Daher werden Gleichstrommaschinen immer mehr durch umrichter gespeiste Drehstrommaschinen ersetzt.

- Normalerweise ist ein Drehstromnetz vorhanden, daher ist zum Betrieb ein (gesteuerter) Gleichrichter notwendig
- Wegen dem komplizierten Aufbau ist eine GM teurer als ein leistungsgleicher Drehstromantrieb
- Erhöhte Wartung, da Bürsten und Kommutator verschleissen
- Höheres Gewicht als leistungsgleicher Drehstromantrieb
- Ungekapselt in explosionsgefährdeten Räumen wegen dem offenen Stromübergang zwischen Bürsten und Kommutator nicht verwendbar:
- Ausführbare Leistung ist durch den Kommutator wegen der Spannung zwischen den Kommutatorlamellen (Stegspannung max. 35 V) begrenzt

Die Gleichstrom-Reihenschlußmaschine (Kap. 11.6) findet wegen ihrer Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik vor allem beim Antrieb von elektrischen Nahverkehrsmitteln (Straßen-, U- und S-Bahnen, Elektrokarren) sowie bei Haushaltsgeräten Verwendung.

Mit den Bezeichnungen Rotor, Läufer oder Anker ist immer das sich drehende Teil der Maschine gemeint. Hier wird die Bezeichnung "Anker" bevorzugt und die elektrischen Größen mit A indiziert. Das äußere feststehende Gehäuse der Maschine nennt man den Ständer. Bild 11.2 zeigt ein Teilschnittbild einer Gleichstrommaschine für ca. 120 kW abgegebene Leistung.

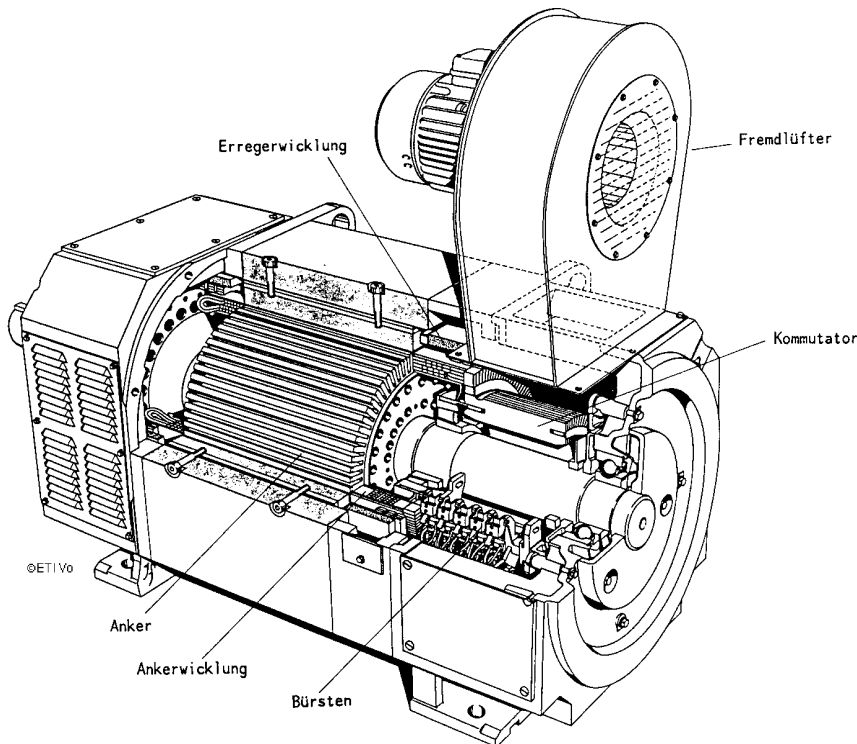


Bild 11.2: Teilschnittbild einer Gleichstrommaschine mit aufgesetztem Lüfter



Gleichstrommaschine 120 kW in einem Maschinensatz (Typenschild siehe Bild Bild 11.32)



Gleichstrommaschine mit aufgesetztem Lüfter bei einem Motorenprüfstand für Verbrennungsmotoren

Bild 11.3: Gleichstrommaschinen

11.1 Wirkungsweise der fremderregten Gleichstrommaschine

Die prinzipielle Wirkungsweise einer Gleichstrommaschine soll anhand eines stark vereinfachten zweipoligen Modells (Bild 11.4) mit nur einer Windung erklärt werden. Mit Hilfe einer Erregerwicklung, die auf den Hauptpolen aufgebracht ist, wird in der Maschine ein konstantes magnetisches Feld erzeugt. Der konstante Hauptfluß Φ schließt sich dabei über die Pole, den Luftspalt, den Läufer und symmetrisch über den Ständer. Der Teil des Ständers, der den magnetischen Fluß führt, wird auch als Joch bezeichnet. Da der Rotor aus Eisen ist, verläuft der Fluß im Luftspalt radial zum Rotor.

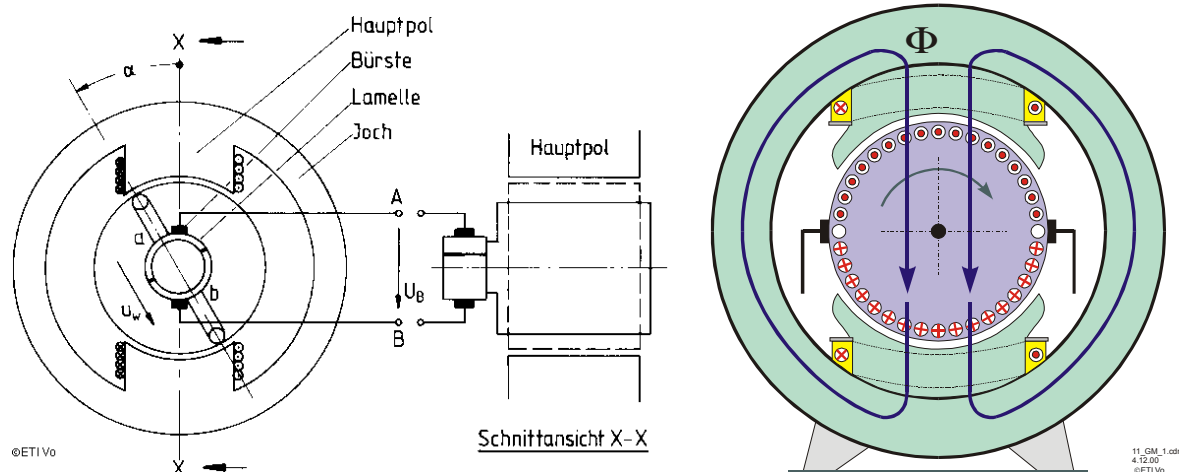


Bild 11.4: Zweipoliges Modell einer Gleichstrommaschine

Die Ankerwicklung besteht bei diesem Modell aus einer Windung, die in zwei um 180° versetzten Nuten des Läufers untergebracht ist (Einschichtwicklung). Die Enden der Läuferwindung sind an zwei Lamellen angeschlossen, die gegeneinander isoliert auf der Welle sitzen. Eine solche Anordnung von gleichartigen Segmenten bezeichnet man als Kommutator (kommutieren gr. vertauschen). Bei realisierten Gleichstrommaschinen besteht der Kommutator aus mindestens drei Segmenten. Auf den Lamellen gleiten die feststehenden Bürsten, die im allgemeinen als Stromzuführung für die Ankerwicklung dienen.

Mit diesem Modell führen wir nun zwei verschiedene Gedankenversuche aus:

- Zum Ersten treiben wir den Läufer von außen mit konstanter Drehzahl n an und untersuchen die Spannung u_w direkt an der Ankerwicklung sowie die Spannung u_B zwischen den Anschlüssen der Bürsten. Diese Betriebsart entspricht dem Leerlauf.
- Beim zweiten Versuch beobachten wir bei verschiedenen Läuferstellungen α das entwickelte Drehmoment der Leiterschleife, wenn ein konstanter Strom I in die Bürstenanschlüsse eingespeist wird (Belastung).

11.1.1 Leerlauf

Der Rotor wird mit konstanter Drehzahl unabhängig vom Drehmoment angetrieben. Beim Drehen des Rotors erfolgt eine Änderung des die Spulenfläche durchsetzenden

Flusses Φ . Wie bei der Erzeugung von Wechselspannung (Bild 5.xxx) wird durch die Drehung eine Spannung u_w erzeugt, die zum Fluß Φ und zur Winkelgeschwindigkeit Ω (Drehzahl) proportional ist (Bild 11.4). Die hier erzeugte Spannung ist fast rechteckförmig, da die Flußänderung aufgrund des ferromagnetischen Rotors bereichsweise fast linear ist. Bei den Läuferstellung $\alpha = 90^\circ, 270^\circ, \dots$ ist die induzierte Spannung $u_w = 0$ und die Spule durch die Bürsten kurzgeschlossen. Bei Läuferstellungen in den Bereichen $-90^\circ + k \cdot 360^\circ < \alpha < 90^\circ + k \cdot 360^\circ$ für $k = 0, 1, 2, \dots$ ist der Anschluß a der Windung über die Lamelle a mit der oberen Bürste und der Anschluß b mit der unteren Bürste verbunden. Die in der Windung induzierte Spannung liegt daher an den äußeren Klemmen A und B an. In den Bereichen $90^\circ + k \cdot 360^\circ < \alpha < 270^\circ + k \cdot 360^\circ$ für $k = 0, 1, 2, \dots$ ist der Anschluß a dagegen mit der unteren und der Anschluß b mit der oberen Bürste verbunden. Die in der Wicklung induzierte Spannung liegt deshalb an den äußeren Klemmen A und A mit umgekehrtem Vorzeichen an. Gleichzeitig ist die induzierte Spannung u_w in diesem Winkelbereich negativ. Der Kommutator bewirkt daher, daß die an den äußeren Klemmen meßbare Spannung auch in diesem Winkelbereich positiv ist (Bild 11.5).

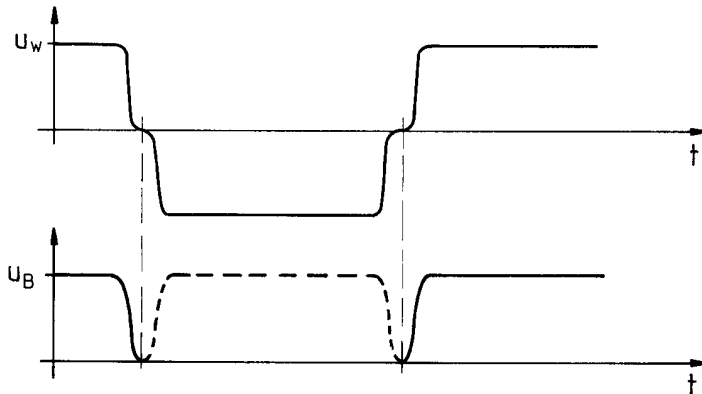


Bild 11.5: Spannungen u_w an der Ankerwicklung und u_B an den Bürstenanschlüssen.

Daher wird der Kommutator manchmal auch als mechanischer Gleichrichter bezeichnet. (Anmerkung: Würden die Bürsten aus der gezeichneten Stellung verdreht, erfolgt die Umpolung der induzierten Spannung bei einer anderen Winkelstellung.)

Die an den Bürsten meßbare Gleichspannung bezeichnen wir als die Ankerspannung u_A

$$u_A \approx \Phi \cdot \Omega \quad (11.1)$$

Durch exakte Herleitung erhält man einen Proportionalitätsfaktor c , der die Maschinenkonstanten enthält.

$$c = \frac{z}{a} \cdot \frac{p}{2\pi} \quad [c] = \frac{[p]}{[a]} \cdot \frac{[z]}{2\pi} = 1 \quad (11.2)$$

Dabei bedeuten:

p Polpaarzahl (reine Zahl)

a Zahl der parallelen Ankerzweigpaare

z Zahl der Leiter am Rotorumfang

$$U_A = c \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (11.3)$$

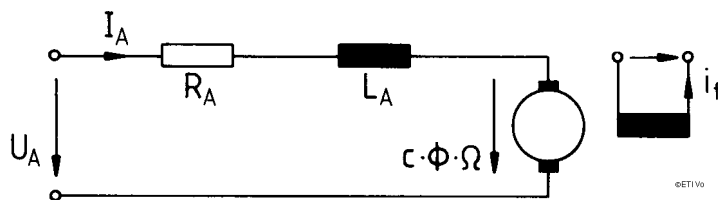
Die Ankerwicklung hat auch einen ohmschen Widerstand. Zusammen mit dem Bürstenübergangswiderstand und allen im Ankerkreis liegenden Widerständen wird dieser Widerstand als Ankerkreiswiderstand R_A bezeichnet.

Bei normalem Betrieb wird ein Strom in der Maschine fließen, so daß man auch einen Spannungsabfall an dem Ersatzwiderstand R_A des Ankerkreises hat. Unter Berücksichtigung dieses Spannungsanteils lautet dann die Spannungsgleichung

$$U_A = R_A \cdot I_A + c \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (11.4)$$

mit der Winkelgeschwindigkeit des Rotors $\Omega = 2\pi \cdot n$

Wenn der Strom in der Maschine schnell verändert wird, ist in einer Ersatzschaltung auch noch die Induktivität L_A des Ankers bzw. die Spannung $L \cdot \frac{dI_A}{dt}$ zu berücksichtigen.



Die Induktivität L_A kann normalerweise bei stationären oder quasi-stationären Vorgängen vernachlässigt werden.

Bild 11.6: Ersatzschaltbild der fremderregten Gleichstrommaschine

11.1.2 Belastung

Speisen wir die Modellmaschine mit konstantem Strom, so befinden sich stromdurchflossene Leiter in einem magnetischen Feld (Bild 11.7). Auf jeden der Leiter wirkt eine Kraft F senkrecht zum Magnetfeld und zur Stromrichtung (Genauere Untersuchungen zeigen, daß die Kräfte am Eisen des Rotors angreifen, wenn dieses vorhanden ist). Im Winkelbereich $-90^\circ + k \cdot 360^\circ < \alpha < 90^\circ + k \cdot 360^\circ$ für $k = 0, 1, 2, \dots$ fließt der konstante Strom I zunächst durch den Anschluß a und bei b wieder zur Quelle zurück. Die Kraft im Leiterstück a ist daher nach links, die im Leiterstück b nach rechts gerichtet. Zusammen bewirkt das Kräftepaar ein Drehmoment, das dem Strom I und dem Fluß proportional ist; $M_i \approx \Phi \cdot I$. Im Winkelbereich $90^\circ + k \cdot 360^\circ < \alpha < 270^\circ + k \cdot 360^\circ$ für $k = 0, 1, 2, \dots$ fließt der Strom I umgekehrt durch die Windung. Da sich aber der Läufer soweit gedreht hat, daß der Anschluß b jetzt oben ist, wirkt eine nach links gerichtete Kraft auf den sich nun oben befindenden Leiter b und unten die nach rechts gerichtete Kraft auf Leiter a .

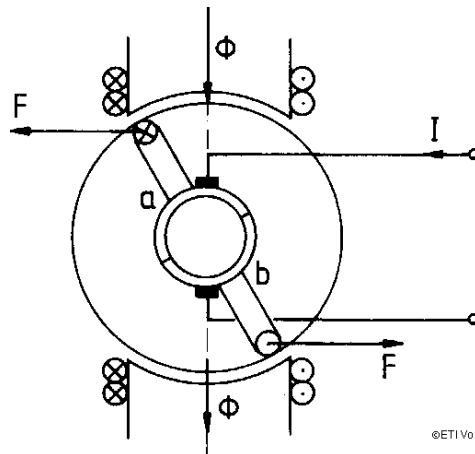


Bild 11.7: Kräftepaar auf die stromdurchflossenen Ankerleiter

Die Richtung des wirksamen Drehmoments ist also unabhängig von der Läuferstellung immer positiv. Bei den ausgezeichneten Läuferstellungen $\alpha = 0^\circ, 180^\circ \dots$ ist die Windung durch die Bürsten kurzgeschlossen, der eingespeiste Strom fließt deshalb nur über den Kommutator. Das entwickelte Drehmoment ist in diesen Stellungen Null. Die Modellmaschine kann daher von diesen Stellungen nicht selbständig loslaufen. In der Praxis sind daher, z.B. bei Spielzeugmotoren, immer mindestens 3 Wicklungen mit einem dreiteiligen Kommutator vorhanden.

Sieht man von den Winkelstellungen $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 180^\circ$ einmal ab, so ist das von der Modellmaschine entwickelte Drehmoment also näherungsweise unabhängig von der Rotorstellung. Wir bezeichnen das Drehmoment als inneres Drehmoment M_i .

$$M_i \approx \Phi \cdot I_A \quad (11.5)$$

Durch genaue Herleitung erhält man mit sehr guter Genauigkeit auch hier die gleiche Maschinenkonstante c , so daß für das Drehmoment gilt:

$$\boxed{M_i = c \cdot \Phi \cdot I_A} \quad (11.6)$$

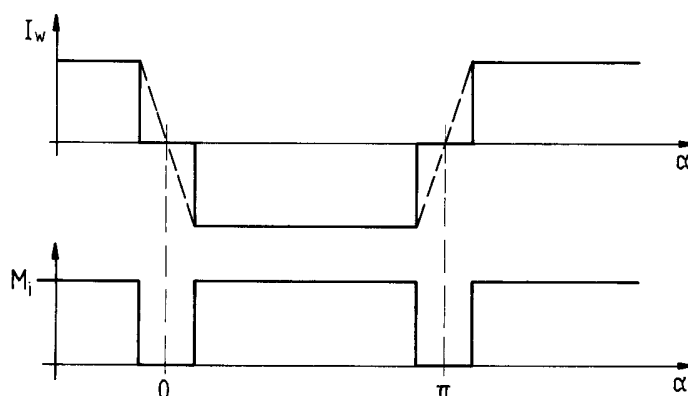
Bild 11.8: Strom i_w in der Ankerwicklung und inneres Drehmoment M_i als Funktion der Läuferstellung α bei dem Modell nach Bild 11.4.

Bild 11.9 zeigt die Abwicklung der Maschine bei verschiedenen Rotorstellungen ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ und 135°). Die Abwicklung beginnt an der Stelle x, wobei der untere

Bereich nach rechts geklappt wird. Da die Hauptpole nur einen Teil des Umfangs bedecken, sind diese in der Abwicklung durch gestrichelte Rechtecke dargestellt. Man erkennt bei dieser Darstellung, daß sich die Rotorschleife an den Hauptpolen vorbeibewegt und dabei die Leitschleife umpolt.

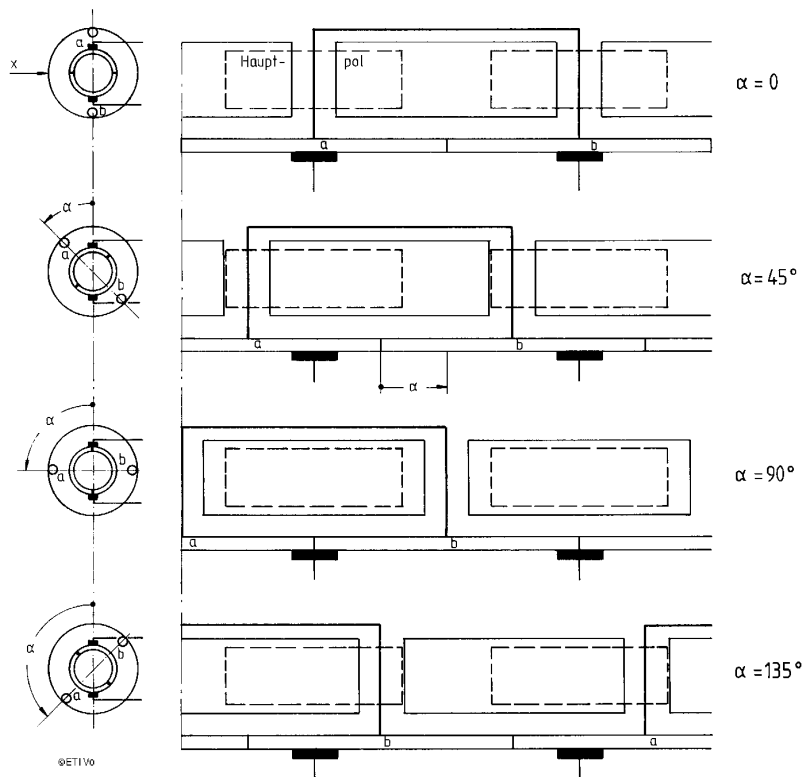


Bild 11.9: Abwicklung der Rotoroberfläche bei verschiedenen Rotorstellungen $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$

11.2 Technische Ausführung

Die einfachste Gleichstrommaschine besteht aus einer Ankerwicklung und einem Permanentmagneten für die Erregung. Die technische Ausführung von Gleichstrommaschinen erfordert aber vor allem bei größeren Maschinen zusätzliche Maßnahmen zur Verringerung der Drehmomentenwelligkeit und zur Kommutierung des Ankerstromes. Diese dafür zusätzlich notwendigen Wicklungen sind nach ihrer Funktion als Kompensations- und Wendepolwicklung bezeichnet.

11.2.1 Mechanischer Aufbau

Das aktive Eisen des Ständers ist in größeren Maschinen ($> 1 \text{ kW}$) zur Vermeidung von Wirbelstromverlusten geblecht. Pole und Joche werden getrennt hergestellt und anschließend mechanisch miteinander verbunden.

Je nach Auslegung werden höhere Polzahlen mit über den Bohrungsumfang abwechselnder Durchflutungsrichtung verwendet. Der Polzahl entsprechend muß dann auch die Anzahl der Bürsten mit über den Umfang abwechselnder Polarität ansteigen. Bürsten gleicher Polarität werden parallelgeschaltet. Im Anker sind die Spulen über den Rotorumfang gleichmäßig verteilt und die Enden an entsprechend viele Segmente des Kommutators angeschlossen (Bild 11.12).

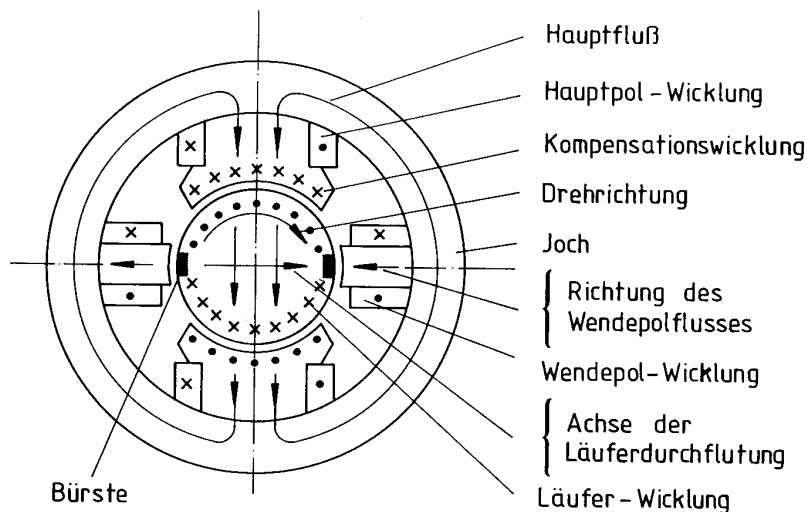
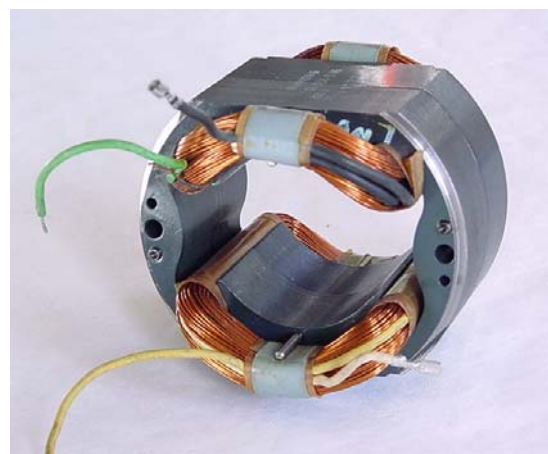
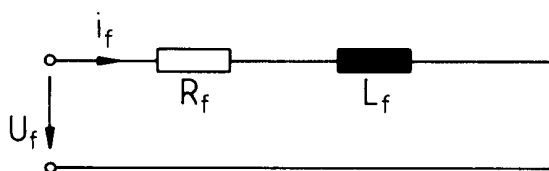


Bild 11.10: Querschnitt einer zweipoligen Gleichstrommaschine mit Wendepol- und Kompensationswicklung.

Bild 11.10 zeigt den Querschnitt einer zweipoligen Gleichstrommaschine mit Wendepol- und Kompensationswicklung. Die Wicklungen und deren Funktion werden im Folgenden näher erläutert.

11.2.2 Erregerwicklung

Die Erregerwicklung ist je zur Hälfte auf jedem der Hauptpole aufgebracht. Erregerwicklungen von fremderregten Gleichstrommaschinen sind in der Regel für hohe Spannung und kleinen Strom ausgelegt (z.B. 400 V / 1A). Sie besitzen also zur Erzeugung der Durchflutung Θ_f eine große Windungszahl bei kleinem Drahtquerschnitt. Wenn als Erregerstrom ein Gleichstrom verwendet wird, können die Hauptpole aus massivem Eisen sein. Bei kleinen und mittleren Maschinen (bis ca. 1 kW) kann die Erregung auch mit Hilfe von Permanentmagneten realisiert werden. Bei elektrischer Erregung erhalten wir mit dem ohmschen Widerstand R_f die Ersatzschaltung für den Erregerkreis der fremderregten Gleichstrommaschine (Bild 11.11).



a)

Bild 11.11: a) Ersatzschaltbild Erregerkreis, b) Erregerwicklung einer GM mit ca. 800 W Leistung (Fa. Siemens)

Im allgemeinen Fall gilt dafür die Spannungsgleichung

$$U_f = R_f \cdot i_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt} \quad (11.7)$$

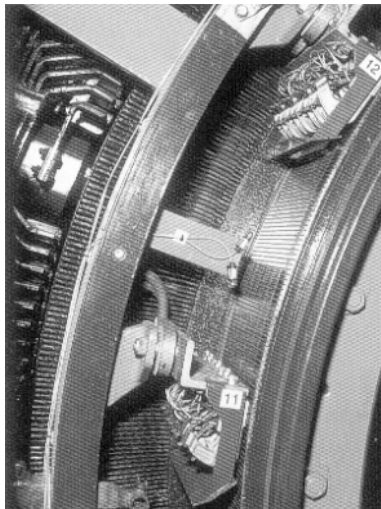
Im stationären Betrieb ($i_f = \text{konst.}$) wird daraus die Spannungsgleichung.

$$U_f = R_f \cdot i_f \quad (11.8)$$

Durch Erwärmung der Maschine kann sich der ohmsche Widerstand R_f erhöhen, was bei Speisung mit konstanter Spannung zum Absinken des Erregerstromes führt.

11.2.3 Ankerwicklung

Zur Verminderung der Drehmomenten- und Ankerspannungswelligkeit verwendet man im Anker möglichst viele, gleichmäßig am Rotorumfang verteilte Wicklungen, die im Folgenden Ankerspulen genannt werden. Die Ankerspulen mit der Windungszahl n werden in der Regel in Nuten des Rotors untergebracht. Jede Spule hat zwei Anschlüsse, die außerhalb des Blechpaketes im sogenannten Wickelkopf mit den Kommutatorlamellen und auch miteinander verbunden sind (Bild 11.12).



Bürsten und Kommutator bei einer GM mit 4,3 MW



Kommutator und Anker einer GM mit 800 W (siehe auch Bild 11.11b)

Bild 11.12: Kommutatoren von GM.

Bei sogenannten Scheibenläufern sind die Ankerspulen direkt auf eine Leiterplatte aufgebracht. Diese Konstruktion verwendet man, um extrem flache und trägheitsarme Motoren zu erhalten. Der Erregerfluß verläuft parallel zur Drehachse und wird durch Permanentmagnete erzeugt (Bild 11.13).

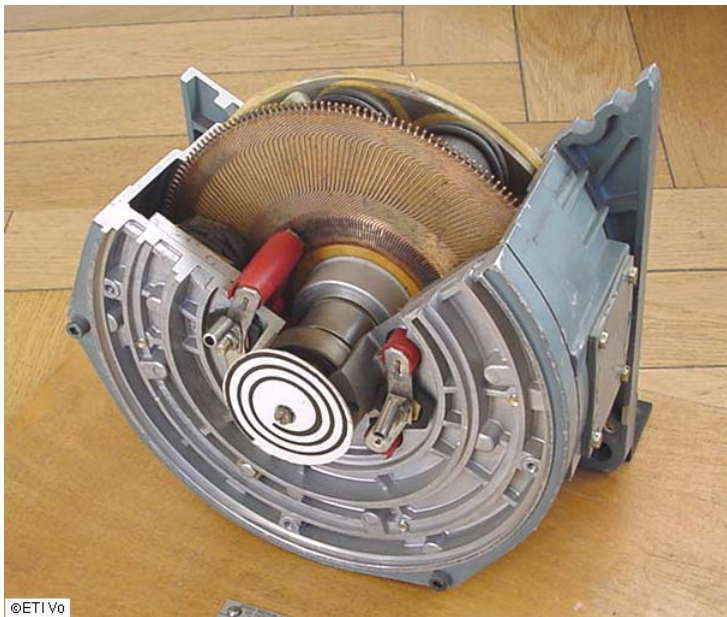


Bild 11.13: Aufgeschnittener Scheibenläufermotor für 60 V/12 A

Je nachdem, wie die Ankerspulen miteinander verbunden sind, spricht man von einer Wellen- oder einer Schleifenwicklung. Das von der Maschine entwickelte Drehmoment ist zu der Anzahl der Ankerspulen proportional. Während der Kommutierung des Stromes in einer Ankerspule reduziert sich das gesamte Drehmoment nur um den Beitrag dieser Spule. Je mehr Ankerspulen also zum Gesamtdrehmoment beitragen, desto geringer wird die Momentenwelligkeit.

Den Abstand zweier zueinander gehörenden Spulenseiten nennt man die Spulenweite w , die etwa eine Polteilung τ betragen soll. Bei einer Einschichtwicklung liegt nur eine Spulenseite in einer Nut. Ist eine Spulenseite im oberen Teil und die entsprechend andere Seite im unteren Teil einer Nut untergebracht, so hat man eine Zweischichtwicklung. Die Ankerwicklung stellt man der Übersichtlichkeit wegen in einem Wickelplan als Abwicklung dar (Bild 11.16). Zur Unterscheidung von Ober- und Unterseite der Ankerspulen zeichnen wir im Wickelplan die Unterschicht gestrichelt. Bild 11.14 zeigt eine zweischichtige, aus drei Wicklungen bestehende Ankerwicklung wie sie meistens in einfachen Spielzeugmotoren verwendet wird. Die dargestellte Gleichstrommaschine besitzt zur Erregung schalenförmige Permanentmagnete. Wenn wir uns nur eine Ankerspule, z.B. Spule x in Bild 11.14, vom Strom durchflossen denken, so läßt sich diese Spule in einem Ersatzschaltbild durch das Schaltzeichen der Induktivität darstellen. Das Schaltzeichen zeigt in die gleiche Richtung wie die von dieser Spule verursachte magnetische Durchflutung Θ . Um im Ersatzschaltbild eine übersichtliche Darstellung zu erhalten, drehen wir den Kommutator mitsamt den Bürsten um 90° gegenüber dem Rotor. Wenn die Ankerströme in den Wicklungen bekannt sind, kann aus dem Ersatzschaltbild die Ankerdurchflutung und das Drehmoment durch vektorielle Addition rekonstruiert werden (Bild 11.14c). Bild 11.17 zeigt die drei durch den Kommutator gleichgerichteten Spulenspannungen und die resultierende Ankerspannung unter Vernachlässigung der Kommutierungszeit.

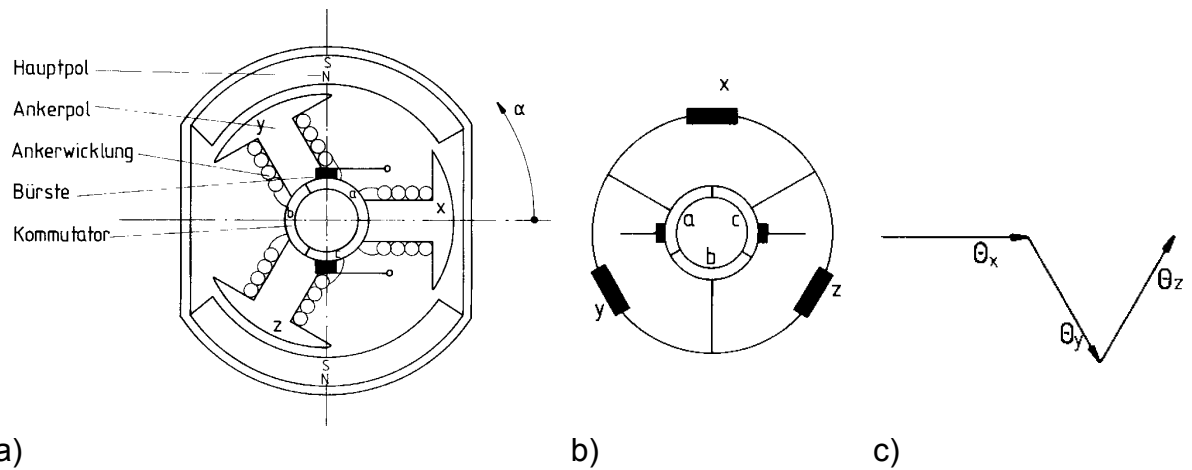
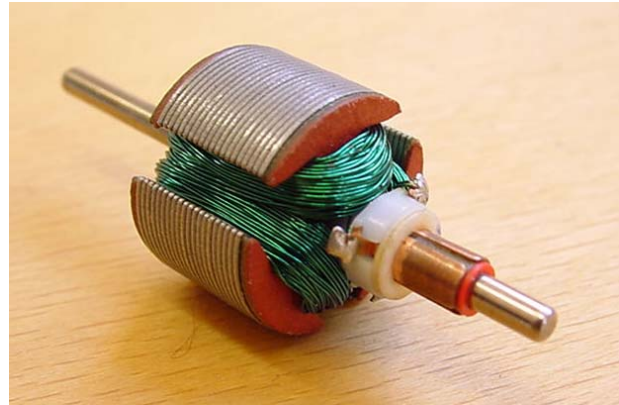


Bild 11.14: a) Querschnitt einer zweipoligen Maschine mit Zweischichtwicklung und Permanentmagnet (Spielzeugmotor), b) Ersatzschaltung der Ankerwicklung und c) vektorielle Summe der Ankerdurchflutung.



a)

b)

Bild 11.15: a) Einzelteile des Spielzeugmotors. Lager mit Bürsten, Permanentmagnete, Anker und Gehäuse; b) Anker

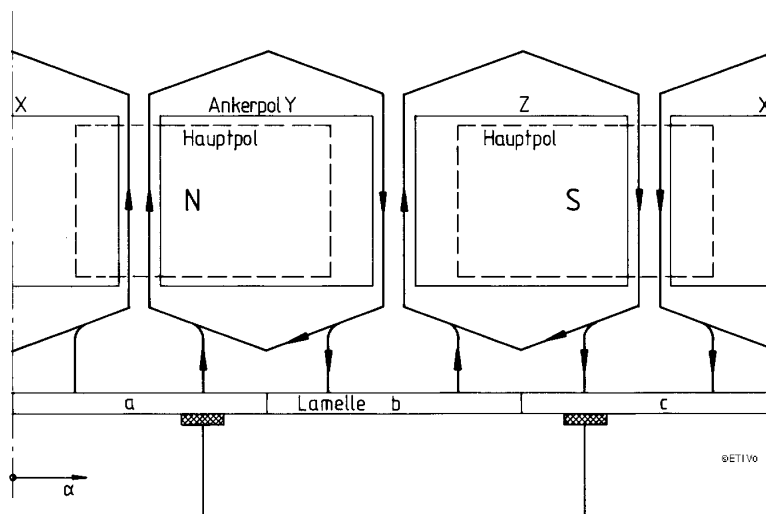


Bild 11.16: Wickelplan (Abwicklung) der Ankerwicklung für die in Bild 11.14 dargestellte Maschine.

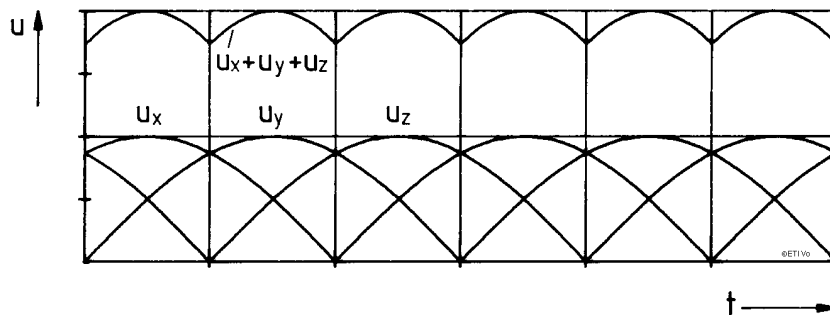


Bild 11.17: Spannungen u_x , u_y , und u_z der Ankerspulen und deren Summe (Ankerspannung) für das Beispiel nach Bild 11.16.

Bei größeren Maschinen sind am Umfang der Maschine 4, 6 oder mehr Hauptpole vorhanden. Entsprechend muß natürlich auch die Ankerwicklung ausgeführt sein. Bild 11.18 bzw. Bild 11.19 zeigt die Ankerwicklung einer zweipoligen Maschine, wie sie für Kleinantriebe in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden.

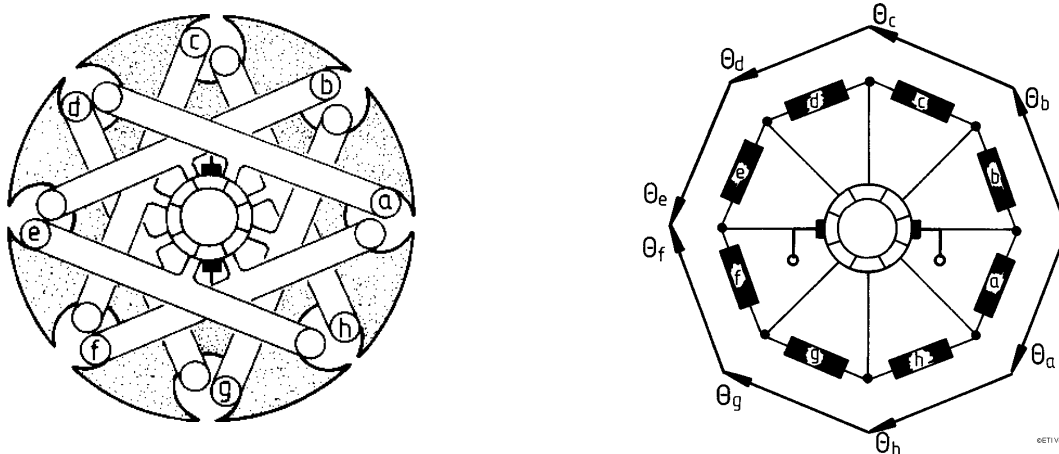


Bild 11.18: Ankerwicklung, Ersatzschaltung und Durchflutungen θ_a bis θ_g bei einer zweipoligen Gleichstrommaschine mit 2 parallelen Ankerzweigen (8 Ankernuten).

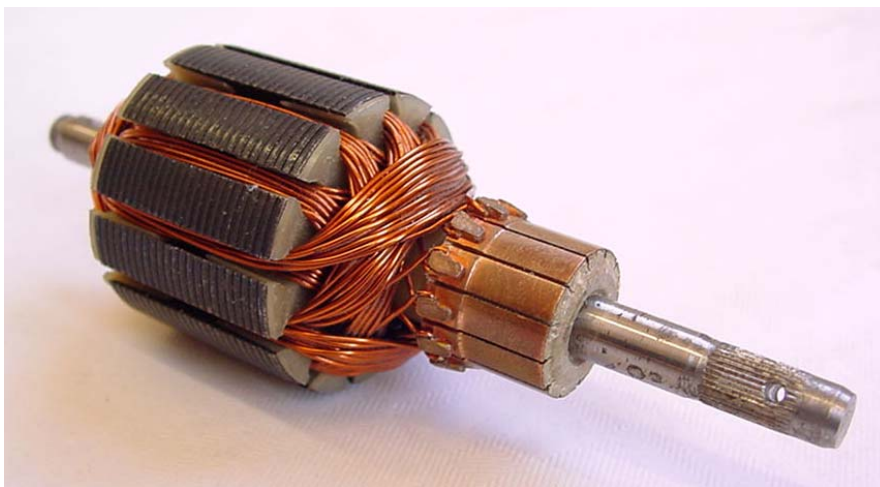


Bild 11.19: Anker einer GM mit 12 Ankernuten (ähnlich zu Bild 11.18)

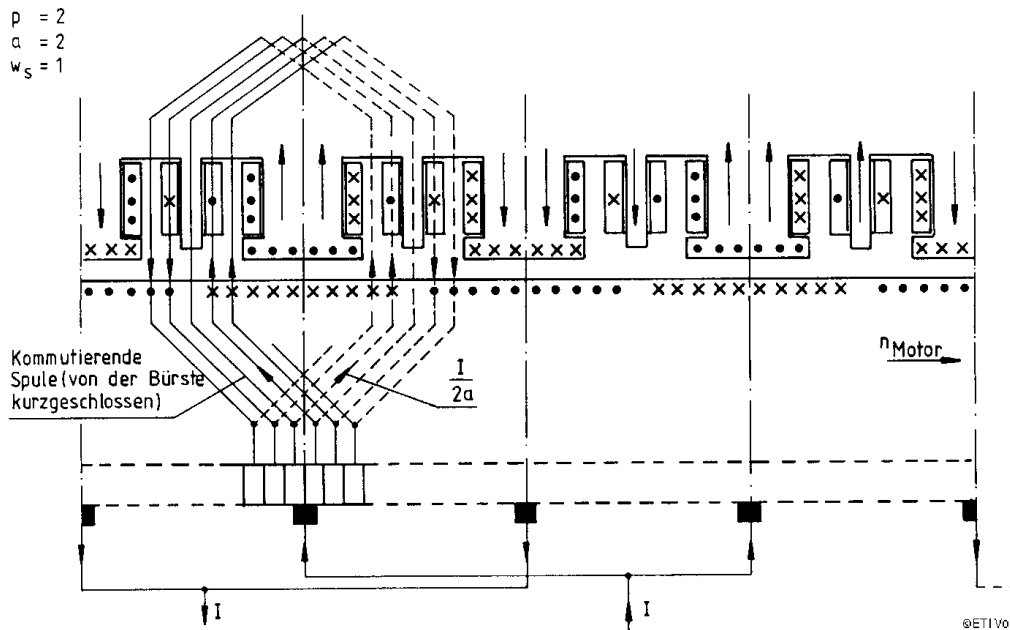


Bild 11.20: Beispiel einer 4-poligen kompensierter Gleichstrommaschine mit eingängiger Schleifenwicklung. Wendepol- und Kompensationswicklung sind eingezeichnet. Anzahl der parallelen Ankerzweige $a = 2$, Polpaarzahl $p = 2$, Windungszahl $w_s = 1$.

Die Ankerwicklungen sind in diesem Beispiel mit a bis f bezeichnet. Wicklungsanfang und Wicklungsende sind jeweils an einer Kommutatorlamelle angeschlossen. In der gezeichneten Stellung des Rotors sind die Wicklungen b, c, d, e und a, h, g, f jeweils in Reihe geschaltet; die beiden Reihenschaltungen sind parallelgeschaltet. Der gesamte über die Bürsten fließende Ankerstrom teilt sich dadurch hälftig auf die beiden Reihenschaltungen auf. Bild 11.20 zeigt den Wickelplan einer 4-poligen Maschine. Die Bürsten sind bei mehrpoligen Maschinen parallelgeschaltet.

11.2.4 Zusatzwicklungen

Bei Maschinen ab ca. 1 kW Leistung baut man zur Verbesserung der Funktion noch Wendepol- und Kompensationswicklungen in die Maschine ein.

11.2.4.1 Wendepolwicklung

Die Wendepole haben die Aufgabe, die verzögernden Wirkung der Rotorinduktivitäten bei der Strom-Kommutierung aufzuheben.

In der momentan kommutierenden Spule muß sich der Strom bei seiner Richtungs-umkehr in kurzer Zeit um den Wert $|2 \cdot I_s|$ ändern. Bei nur ohmschen Widerständen ließe dieser Vorgang linear ab. Im realen Fall wirkt aber die Selbstinduktivität der kommutierenden Spule der Stromänderung entgegen und verzögert den Ablauf. Sobald die kurzgeschlossenen Lamellen die Bürste verlassen, käme es ohne Gegenmaßnahme unter Funkenbildung zum Abreißen des Stroms. Dieses Bürstenfeuer

würde an den Bürsten und Lamellenkanten einen hohen Abbrand zur Folge haben, also zu Maschinenschäden führen.

Um dies zu vermeiden, ist es bereits bei kleinen Maschinen ab 1 kW unerlässlich, die Maschine mit Wendepole in der neutralen Zone auszustatten. Der Wendepolfluß Φ_w induziert in der kommutierenden Spule eine der Selbstinduktionspannung entgegengerichteten Bewegungsspannung, sodaß der Strom bereits gewendet ist, bevor der Kurzschluß durch die Bürsten aufgehoben wird. Damit die induzierte Spannung dem Ankerstrom proportional ist, muß der Wendepolfluß vom Ankerstrom erregt sein.

Durch die Wendepole wird auch das Ankerquerfeld (siehe bei Kompensationswicklung) im Bereich der Wendepolwicklung kompensiert.

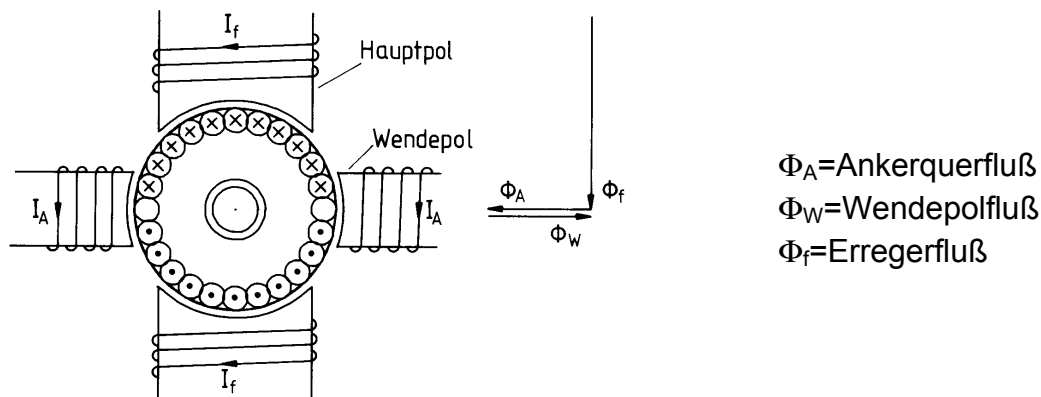


Bild 11.21: Prinzipielle Anordnung der Wendepole

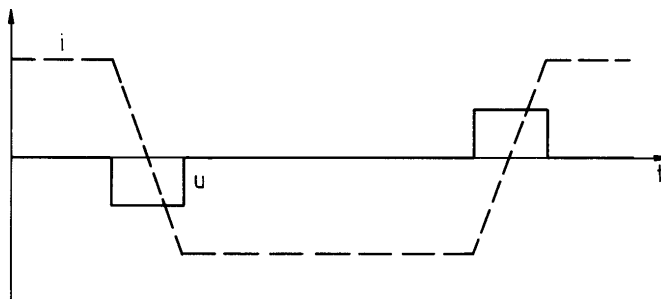


Bild 11.22: Strom und Spannung in einer Ankerspule

11.2.4.2 Kompensationswicklung

Die vom Ankerstrom durchflossene Kompensationswicklung hat die Aufgabe, die feldverzernde Wirkung der Rotordurchflutung aufzuheben.

Neben der Durchflutung Θ_f der Hauptpole ruft auch die durch den Ankerstrom bedingte Durchflutung Θ_A einen magnetischen Fluß Θ_A hervor, der sich dem ursprünglich vorhandenen Fluß Φ_f überlagert, wenn man keine besonderen Maßnahmen ergreift. Als Folge der Überlagerung ist die magnetische Induktion im Bereich der Hauptpole nicht mehr konstant. Zur Erklärung wird das resultierende magnetische Feld Φ in der Gleichstrommaschine betrachtet, wenn jeweils nur Ankerwicklung oder nur Erregerwicklung stromdurchflossen sind. Der Ankerstrom verursacht nach Bild 11.23b ein magnetisches Feld quer zur Richtung des Erregerfeldes

(Ankerquerfeld). Sind beide Wicklungen stromdurchflossen, so ergibt die vektorielle Überlagerung ein Magnetfeld Φ , das in Betrag und Richtung nicht mehr mit dem ursprünglichen ohne Ankerstrom übereinstimmt (Bild 11.23c).

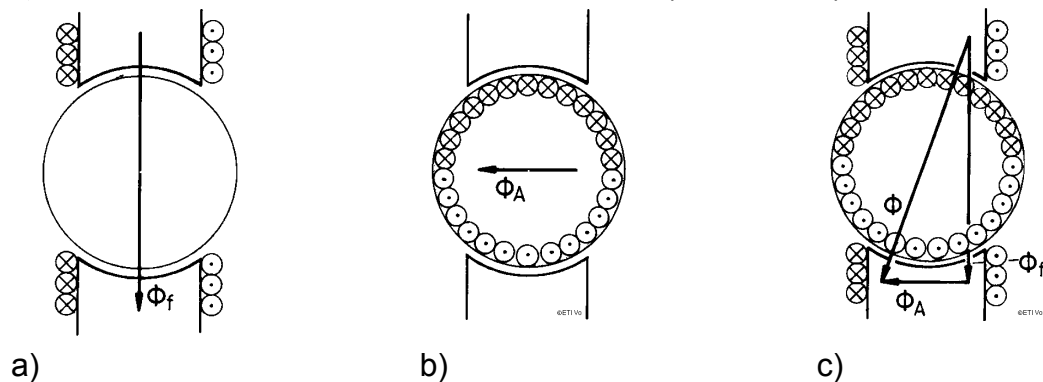


Bild 11.23: Flußrichtungen von: a) nur Erregerfeld, b) nur Ankerquerfeld, c) resultierendes Feld.

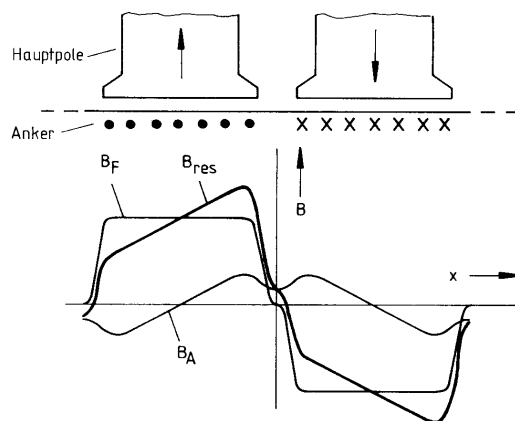


Bild 11.24: Verzerrung der Induktionsverteilung unter den Hauptpolen als Folge der Rückwirkung der Ankerdurchflutung (Abwicklung).

Bild 11.24 zeigt den gleichen Sachverhalt anhand der Induktions-Funktionen $B_f(x)$, $B_A(x)$ und der resultierenden Summe $B_{res}(x)$ über dem Umfang der Maschine. Die Einsattelung von B_A zwischen den Hauptpolen ist durch die Lücke zwischen den Hauptpolen bedingt (die Wendepole sind hier nicht berücksichtigt). Die Verzerrung der Induktion $B_f(x)$ hat auf das Betriebsverhalten der Maschine folgende Auswirkungen:

- Der Nullpunkt von $B_{res}(x)$ hat sich gegenüber dem Nullpunkt von $B_f(x)$ verschoben. Da $B_{res}(x)=0$ die neutrale Zone charakterisiert, hat sich diese also verschoben. Die auftretende Induktion stört die Kommutierung des Stroms.
- In den Spulen eines Ankerzweiges werden unterschiedliche Spannungen induziert. Dies hat zur Folge, daß die Potentialdifferenzen zwischen den Lamellen auf der Seite mit der hohen Induktion zu groß werden können. Dies kann in Verbindung mit abgelagertem Kohlenstaub (Bürstenabrieb) zu örtlichen Überschlügen führen, die sich zu einem Lichtbogen, dem sogenannten Rundfeuer, zwischen

den Bürsten ausweiten können. Die Stegspannung zwischen zwei benachbarten Lamellen soll bei großen Maschinen kleiner 35 V sein.

- Infolge der Überlagerung kann die resultierende Induktion B_{res} so groß werden, daß das Eisen teilweise in die Sättigung gerät. Der wirksame Erregerfluß Φ_{res} ist dann im Vergleich zu Φ_f herabgesetzt. Dies kann sich in der Drehzahl-Drehmomenten Kennlinie als Feldschwächung bemerkbar machen und zu instabilem Betrieb führen.

Um diese nachteiligen Auswirkungen der Ankerquerdurchflutung unter den Hauptpolen zu beseitigen, wird in zusätzlichen Nuten der Hauptpole eine Wicklung, die Kompensationswicklung, untergebracht. Da das Ankerquerfeld Φ_A dem Ankerstrom proportional ist, muß auch diese Kompensationswicklung vom Ankerstrom durchflossen werden. Die Kompensationswicklung liegt daher in Reihe mit der Ankerwicklung und erzeugt ein dem Ankerquerfeld entgegengesetztes Feld Φ_k , sodaß die Überlagerung der drei Felder die ursprünglich gewünschte Magnetisierungsrichtung ergibt (Bild 11.25b).

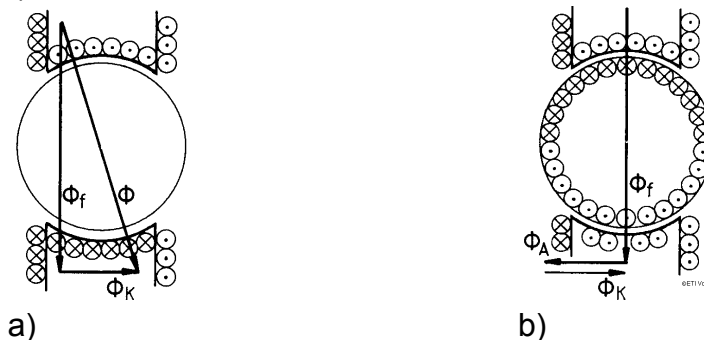


Bild 11.25: Flußrichtungen von: a) Kompensations- und Erregerwicklung, b) Kompensations-, Erreger- und Ankerwicklung.

11.2.5 Bezeichnung der Wicklungsenden

Zur Unterscheidung der einzelnen Wicklungen im Schaltbild und beim Anschluß der Gleichstrommaschinen gelten nach DIN 42401 folgende Vereinbarungen:

- Jede Wicklung wird mit einem Großbuchstaben bezeichnet.
- Anfang und Ende einer Wicklung werden in Richtung des Stroms für Rechtslauf durch die Ziffern 1 und 2 unterschieden.
- Wicklungsenden, die nicht als Anschlußstellen an das Klemmbrett her ausgeführt sind, tragen die Bezeichnung in Klammern.
- Ist ein Wicklungsstrang in räumlich getrennte Abschnitte aufgeteilt, so sind die Teilwicklungen durch dem Buchstaben vorangestellte Ziffern gekennzeichnet.

<i>A</i> Ankerwicklung	<i>D</i> Reihenschluß-Erregerwicklung
<i>B</i> Wendepolwicklung	<i>E</i> Nebenschluß-Erregerwicklung
<i>C</i> Kompensationswicklung	<i>F</i> Fremderregte Wicklung

Bild 11.26 zeigt den vollständigen Schaltplan einer kompensierten fremderregten Gleichstrommaschine. Der Rotor wird dabei als Kreis mit angelegten Stromabnehmern (Bürsten) symbolisiert. Die Wendepol- und Kompensationswicklung sind aus

anschlußtechnischen Gründen oft gegenüber dem Rotor beidseitig aufgeteilt. Die Durchflutungspfeile der Wendepolwicklung B und der Kompensationswicklung C stehen gemäß ihrer verlangten Wirkung in Gegenrichtung zum Strompfeil des Läufers A . Bei den meisten Betrachtungen werden die Wendepol- und Kompensationswicklung nicht mit dargestellt.

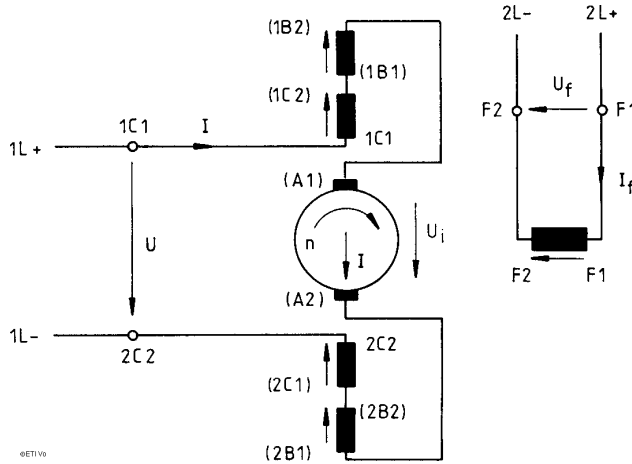


Bild 11.26: Schaltplan einer fremderregten Gleichstrommaschine mit Wendepol- und Kompensationswicklung.

Fließt der Erregerstrom und der Ankerstrom von den Klemmen $F1$ bzw. $1C1$ zu den Klemmen $F2$ bzw. $2C2$, so dreht sich der Rotor der Maschine rechts herum. Falls eine der Stromrichtungen vertauscht wird, kehrt sich die Drehrichtung um. Als Drehrichtung "rechts" wird dabei auf der Abtriebsseite die Richtung im Uhrzeigersinn definiert, wenn man auf die Stirnseite der Maschine schaut.

11.3 Betriebsverhalten

Beim Betrieb der Maschine interessiert man sich in erster Linie für den Zusammenhang der Drehzahl (Winkelgeschwindigkeit) mit dem Drehmoment. Aus der Spannungsgleichung der GM Gl.(11.4) erhält man im stationären Zustand die mechanische Winkelgeschwindigkeit Ω

$$\Omega = \frac{U_A}{c \cdot \Phi} - \frac{R_A}{c \cdot \Phi} \cdot I_A \quad (11.9)$$

Mit der Momentengleichung $M_i = c\Phi \cdot I_A$ wird daraus:

$$\Omega = \frac{U_A}{c\Phi} - \frac{R_A}{(c\Phi)^2} \cdot M_i = \Omega_0 - \frac{R_A}{(c\Phi)^2} \cdot M_i \quad (11.10)$$

Das ist eine Geradengleichung mit dem Achsenabschnitt $U_A / c\Phi$ und der Steigung $R_A / (c\Phi)^2$. Den ersten Term Ω_0 bezeichnet man als die Leerlaufwinkelgeschwindigkeit (Drehzahl), weil diese sich einstellt, wenn das Drehmoment M_i bzw. der Strom I_A Null ist. Liegt speziell die Nennspannung U_{AN} an den Klemmen der Maschine an und ist $\Phi = \Phi_N$, so erhält man die Leerlaufwinkelgeschwindigkeit Ω_{ON} .

$$\Omega_{ON} = \frac{U_{AN}}{c\Phi_N} \quad (11.11)$$

11.3.1 Leerlauf der fremderregten Gleichstrommaschine

Wenn die mechanische Reibung und alle anderen Verluste in der Maschine vernachlässigt werden, bezeichnet man diesen Zustand als theoretischen Leerlauf. In der Praxis kann dieser Fall nur näherungsweise eintreten, da eben immer Reibungsverluste vorhanden sind. Der Ankerstrom I_A und damit das innere Drehmoment M_i ist dann Null. Aus der Spannungsgleichung Gl.(11.4) erhält man in diesem Fall die Leerlaufspannung U_{A0} :

$$\boxed{U_A = U_{A0} = c\Phi \cdot \Omega} \quad (\text{idealer Leerlauf}) \quad (11.12)$$

Im idealisierten Fall liegt daher die Spannung U_A an den Klemmen an und es fließt kein Ankerstrom, da die innere Spannung $c \cdot \Phi \cdot \Omega$ den gleichen Betrag hat wie die von außen angelegte Ankerspannung. Um die Leerlaufspannung zu messen, treibt man den Rotor mit der Drehzahl n an, und verstellt den Erregerstrom. An den Klemmen des Ankerkreises kann dann die Leerlaufspannung U_{A0} gemessen werden.

Der Erregerfluß Φ_f hängt über die Magnetisierungskennlinie mit dem Erregerstrom I_f zusammen. Bei Erregerströmen größer als der Nennerregerstrom, treten deutliche Sättigungserscheinungen auf (Bild 11.27). Wenn der Erregerstrom auf Null zurückgenommen wird, geht die Ankerspannung wegen der Remanenz des Eisenkreises der Feldwicklung nicht auf den Wert Null, sondern auf die sogenannte Remanenzspannung U_{rem} zurück. Die Remanenzspannung beträgt bei Nenndrehzahl ca. 5...10% der Nennspannung U_{AN} . Bei Umkehr des Erregerstromes - in Bild 11.27 mit Pfeilen angedeutet - verlaufen die Kennlinien deshalb nicht deckungsgleich, es entsteht eine Hystereschleife.

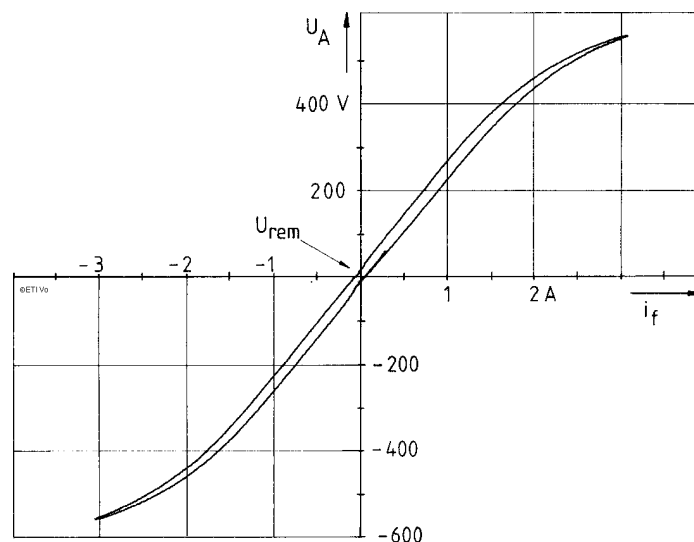


Bild 11.27: Leerlaufspannung einer GM bei konstanter Drehzahl n als Funktion des Erregerstroms.

11.3.2 Belastung der Gleichstrommaschine

Bei konstanter Ankerspannung U_A nimmt mit steigendem Drehmoment und damit Anwachsen des Ankerstroms I_A die Drehzahl nach Gl.(11.13) ab. An dem Ankerwiderstand R_A fällt nämlich mit wachsendem Ankerstrom eine immer größere Spannung ab, sodaß $c \cdot \Phi \cdot \Omega$ kleiner wird. Die Drehzahländerung ist proportional zur Drehmomentenänderung und tritt natürlich auch bei Generatorbetrieb auf. Die Änderung von der Leerlaufdrehzahl n_{0N} (Ω_{0N}) bis zur Drehzahl n_N (Ω_N) bei Nennmoment beträgt bei normal ausgelegten Maschinen ca. 3 %. Wird die Maschine mit dem Nennmoment M_N belastet und liegt Nennspannung U_{AN} an den Klemmen an, so erhält man den Nennbetriebspunkt und es stellt sich die Nenndrehzahl n_N bzw. Ω_N ein. Für Ω_N gilt:

$$\Omega_N = \frac{U_{AN}}{c\Phi_N} - \frac{R_A}{(c\Phi_N)^2} \cdot M_N = \Omega_{0N} - \frac{R_A}{(c\Phi_N)^2} \cdot M_N \quad (11.13)$$

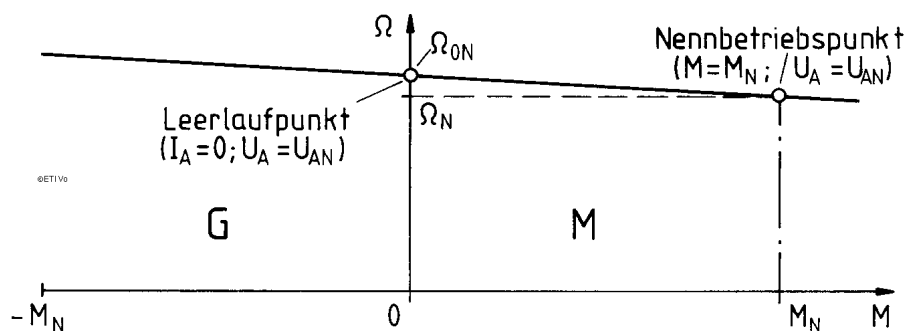


Bild 11.28: Leerlauf- ($M=0$, $\Omega=\Omega_{0N}$) und Nennbetriebspunkt ($M=M_N$, $\Omega=\Omega_N$)

11.3.3 Dynamik

Es soll die Energie betrachtet werden, die eine Gleichstrommaschine im idealen Leerlauf ($I_A = 0$) von dem Gleichspannungsnetz aufnimmt, wenn sich die Netzspannung um einen beliebigen Betrag sprunghaft ändert. Die Drehzahl wird sich dann auf einen der Spannung entsprechenden Wert einstellen.

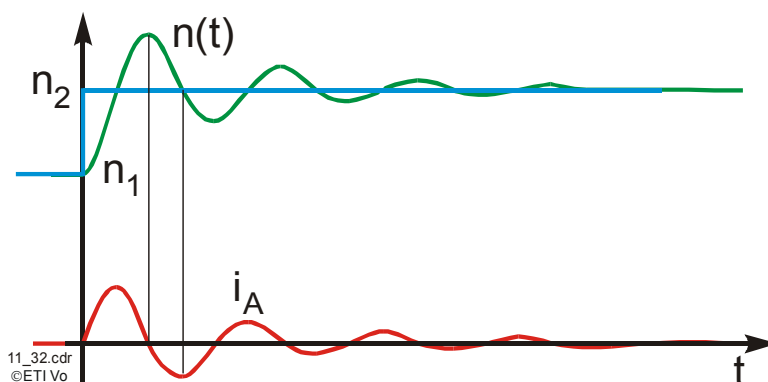


Bild 11.29: Übergangsvorgang der Drehzahl $n(t)$ und Ankerstrom $i_A(t)$ bei sprunghaft veränderter Ankerspannung $U_{A2} > U_{A1}$.

Die Ankerspannung wird im Leerlauf sprunghaft von U_{A1} auf den Wert U_{A2} verändert, wobei U_{A2} größer oder auch kleiner als U_{A1} sein kann. Der Erregerfluß sei während des Übergangsvorgangs konstant.

$$\text{Für } t < 0 \quad \text{gilt} \quad \Omega = \Omega_1 = \frac{U_{A1}}{c\Phi}$$

$$\text{Für } t \rightarrow \infty \quad \text{gilt} \quad \Omega = \Omega_2 = \frac{U_{A2}}{c\Phi}$$

Die aus der Spannungsquelle bezogene Energie ist

$$W_n = \int_0^{\infty} u_A \cdot i_A \, dt = \int_0^{\infty} u_{A2} \cdot i_A \, dt \quad (11.14)$$

Da u_{A2} für $t > 0$ konstant ist, kann u_{A2} vor das Integral gesetzt werden. Es muß die träge Masse des Rotors, ausgedrückt durch das Trägheitsmoment J , auf die Winkelgeschwindigkeit Ω_2 beschleunigt oder verzögert werden. Daher ist

$$m_i = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = c\Phi \cdot i_A \quad \text{oder} \quad i_A = \frac{J}{c\Phi} \cdot \frac{d\Omega}{dt}$$

Für die Energie erhält man mit $U_{A2} = c\Phi \cdot \Omega_2$

$$W_n = \int_0^{\infty} c\Phi \cdot \Omega_2 \cdot \frac{J}{c\Phi} \cdot \frac{d\Omega}{dt} \, dt = J \cdot \Omega_2 \cdot \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} d\Omega \quad \text{oder}$$

$$\boxed{W_n = J \cdot \Omega_2 \cdot (\Omega_2 - \Omega_1)} \quad (11.15)$$

Die aus dem Netz bezogene Energie ist nur von den mechanischen Größen J , Ω_1 und Ω_2 abhängig. Wenn Ω_2 kleiner als Ω_1 ist, wird die aufgenommene Energie negativ, d.h. die Maschine gibt Energie in das Netz zurück.

Die von der rotierenden Masse aufgenommene Energie ist

$$\Delta W_{kin} = W_{kin2} - W_{kin1} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \Omega_2^2 - \frac{1}{2} \cdot J \cdot \Omega_1^2$$

$$\boxed{\Delta W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot (\Omega_2^2 - \Omega_1^2)} \quad (11.16)$$

Auch aus dieser Gleichung sieht man, daß bei $\Omega_2 < \Omega_1$ die Änderung der kinetischen Energie negativ wird.

Die Verlustenergie, die während des Beschleunigungsvorgangs in Wärme umgesetzt wird, erhält man als Differenz zwischen der vom Netz bezogenen und der kinetischen Energie.

$$W_v = \int_0^{\infty} R_A \cdot i_A^2 \, dt = W_n - W_{kin}$$

$$W_v = J \cdot \left[\Omega_2^2 - \Omega_2 \cdot \Omega_1 - \frac{1}{2} \cdot \Omega_2^2 + \frac{1}{2} \cdot \Omega_1^2 \right] = \frac{1}{2} \cdot J \cdot [\Omega_2^2 - 2 \cdot \Omega_2 \cdot \Omega_1 + \Omega_1^2]$$

$$W_V = \frac{1}{2} \cdot J \cdot [\Omega_2 - \Omega_1]^2 \quad (11.17)$$

Die Verlustleistung nach Gl.(11.17) kann nur positive Werte annehmen; d.h. auch beim Abbremsen der Maschine tritt Verlustenergie auf. Wählt man als Winkelgeschwindigkeit Ω_2 den Wert Null, wird nach Gl.(11.17) die gesamte kinetische Energie im Ankerkreiswiderstand R_A in Wärme umgesetzt. Wegen der Abhängigkeit der Rotorverluste vom Trägheitsmoment J sind bei Antrieben, die häufigen Drehzahländerungen unterworfen sind, z.B. Walzwerken und Werkzeugmaschinen, die Trägheitsmomente klein zu halten. Dies wird durch eine schlanke Bauform des Rotors erreicht. Gegebenenfalls ist die Anordnung zweier Maschinen auf der gleichen Welle günstiger, da der Läuferdurchmesser mit der Leistung wächst.

Die Ergebnisse sind von der Gleichstrommaschine unabhängig und gelten für alle Beschleunigungs- oder Verzögerungsfälle bei rotierenden Maschinen.

Im Gegensatz zum sprungförmigen Anlegen der Ankerspannung sind die Verluste deutlich kleiner, wenn die Spannung kontinuierlich, z.B. mit Hilfe eines Stromrichters, verändert wird.

11.3.4 Strukturbild der fremderregten Gleichstrommaschine

Aus den Differentialgleichungen der Maschine und der mechanischen Gleichung kann das Strukturschaltbild der fremderregten Gleichstrommaschine angegeben werden.

Ankerkreis
$$u_A = R_A \cdot i_A + c\Phi \cdot \Omega + L_A \cdot \frac{di_A}{dt}$$

Erregerkreis
$$U_f = R_f \cdot i_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt}$$

Momentengleichung
$$m_b = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$$

Das Vorgehen zum Zeichnen des Strukturbildes (Bild 11.30) soll anhand des Erregerkreises gezeigt werden. Dazu bringen wir die Ableitung di_f/dt auf die linke Seite der Gleichung.

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f} \cdot [u_f - R_f \cdot i_f] = \frac{1}{L_f} \cdot x \quad (11.18)$$

Den Erregerstrom erhalten wir daher durch zeitliche Integration der Größe x , wobei $1/L_f$ als konstant angenommen wird. Im Strukturbild ist x die Eingangsgröße eines Integrierglieds, das als Ausgangsgröße den Erregerstrom i_f hat. x ist nach Gl.(11.18) die Ausgangsgröße einer Differenzbildung von $u_f - R_f \cdot i_f$. Wegen der Rückkopplung über R_f bildet der Erregerkreis ein Verzögerungsglied erster Ordnung. Auf die gleiche Weise wird auch für den Ankerkreis vorgegangen, so daß man insgesamt für die Struktur der fremderregten Gleichstrommaschine Bild 11.30 erhält.

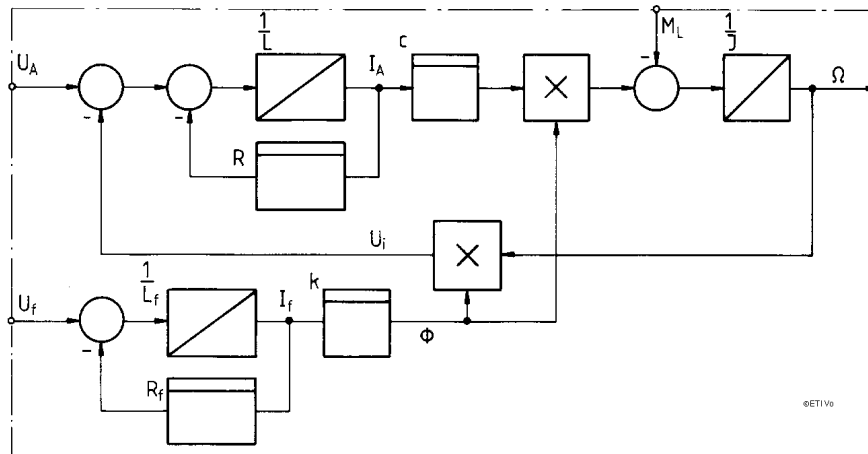


Bild 11.30: Strukturbild der fremderregten Gleichstrommaschine

11.4 Leistungsgleichung, Drehmoment

Die von der speisenden Spannungsquelle aufgenommene Leistung der GM erhält man im stationären Betrieb, wenn die Spannungsgleichung Gl.(11.4) mit dem Ankerstrom I_A multipliziert wird.

$$U_A \cdot I_A = P_A = R_A \cdot I_A^2 + c \cdot \Phi \cdot \Omega \cdot I_A \quad (11.19)$$

Die von der Gleichstrommaschine aufgenommene Leistung P_A setzt sich aus der mechanischen Leistung P_{mech} und den Verlusten zusammen. Die von der Gleichstrommaschine mechanisch abgegebene Leistung P_{mech} ist.

$$P_{\text{mech}} = M \cdot \Omega \quad (11.20)$$

Vernachlässigen wir die Verluste im Ankerwiderstand R_A , so muß die vom Netz aufgenommene Leistung gleich der mechanisch abgegebenen Leistung sein. Oder

$$P_n = P_{\text{mech}} \rightarrow c \cdot \Phi \cdot \Omega \cdot I_A = M \cdot \Omega \quad \text{oder}$$

$$M = c \cdot \Phi \cdot I_A \quad (11.21)$$

$$[M] = [c] \cdot [I_A] = 1 \cdot \text{Vs} \cdot \text{A} = 1 \text{Ws} = 1 \text{Nm}$$

Das innere Drehmoment ist zum magnetischen Erregerfluß Φ und zum Ankerstrom I_A proportional. Üblicherweise gibt man das Drehmoment in Nm und nicht in Ws an. Bild 11.31 zeigt den Leistungsfluß in der Gleichstrommaschine bei Motor- und Generatorbetrieb, wobei die Stromwärmeverluste P_v in beiden Fällen verloren gehen.



Motorbetrieb

Generatorbetrieb

Bild 11.31: Leistungsfluß bei Motor- und Generatorbetrieb

11.4.1 Nennbetrieb und Leistungsschild

Auf dem Leistungsschild der Maschine sind die Daten für den Nennbetriebspunkt angegeben.

Der Nennbetrieb ist dadurch gekennzeichnet, daß

die Maschine an	Nennspannung	U_N	angeschlossen,
das Feld	nennerregt	Φ_N	Ist,
daß	Nennstrom	I_{AN}	fließt und
die Maschine mit dem	Nennmoment	M_N	belastet ist, sich daher
mit der	Nenn Drehzahl	Ω_N	dreht ,
die	Nennleistung	P_N	abgibt und dabei
die	Nenntemperatur	ϑ	erreicht.

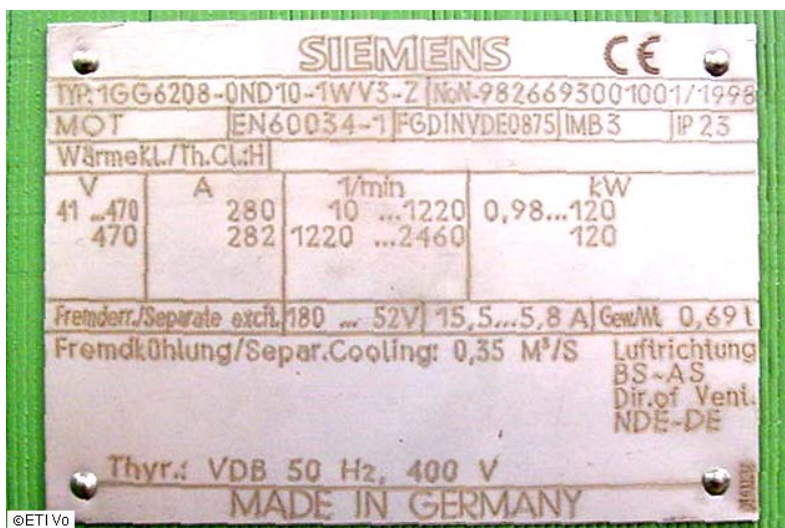


Bild 11.32: Leistungsschild einer fremderregten Gleichstrommaschine 120 kW

11.5 Möglichkeiten der Drehzahlverstellung

Ausgehend von Gl.(11.22) bestehen folgende Möglichkeiten, die Drehzahl der fremderregten Gleichstrommaschine zu verstellen:

- Spannungssteuerung → Veränderung von U_A , verlustarm
- Feldsteuerung → Veränderung von Φ , verlustarm
- Widerstandssteuerung → Veränderung von R_A , verlustbehaftet

$$\Omega = \frac{U_A}{c\Phi} - \frac{R_A}{(c\Phi)^2} \cdot M_i \quad (11.22)$$

Zur Drehrichtungsumkehr wird entweder die Ankerspannung U_A oder der Feldstrom I_f umgedreht.

11.5.1 Verstellen der Ankerspannung

Das verlustärmste und dynamisch günstigste Verfahren zur Drehzahlverstellung der Gleichstrommaschine ist die Variation der Ankerspannung. Durch Verändern der angelegten Ankerspannung U_A , z.B. mit einem Stromrichter, wird die Leerlaufdrehzahl bei konstantem Erregerstrom proportional verstellt. Nach Gl.(11.22) verändert sich die Winkelgeschwindigkeit bei gleichem Lastmoment M proportional zur Ankerspannung U_A (Achsenabschnitt) und die drehzahlstarre Charakteristik der GM bleibt erhalten. Die Ankerspannung darf wegen der begrenzten Stegspannung zwischen zwei Kommutatorlamellen nur im Bereich $-U_N \leq U_A \leq U_N$ verstellt werden. Die Winkelgeschwindigkeit ändert sich in Folge davon im Bereich $-\Omega_{ON} \leq \Omega \leq \Omega_{ON}$.

Bei Umkehr der Ankerspannung U_A ändert sich normalerweise auch die Drehrichtung. Der von der Maschine bei einer bestimmten Spannung aufgenommene Strom ist bei dieser verlustfreien Betrachtung nur vom Drehmoment nach Gl.(11.6) abhängig. Die speisende Spannungsquelle muß daher je nach Stromrichtung eventuell in der Lage sein, auch Energie aufzunehmen.

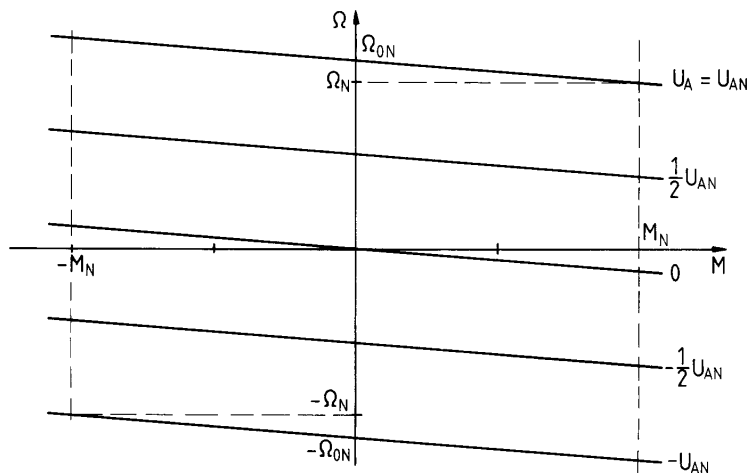


Bild 11.33: Kennlinienfeld der GM bei Ankerspannungsverstellung

11.5.2 Einschalten von Widerständen in den Läuferkreis

Nach Gl.(11.22) ruft der Ankerkreiswiderstand R_A einen vom Belastungsmoment abhängigen Drehzahlabfall hervor. Durch Einschalten eines zusätzlichen Vorwiderstandes R_v in den Ankerkreis kann dieser Einfluß beliebig vergrößert werden. Bei einem gegebenen Lastmoment ist der Ankerstrom unabhängig von der sich einstellenden Drehzahl. Die Steigung wird bei konstantem Erregerstrom proportional zum Widerstand $R_A + R_v$ verändert. Im Vorwiderstand entstehen erhebliche Stromwärmeverluste, so daß diese Drehzahlstellmethode nur für kleine Leistungen, kleine Stellbereiche oder nur kurzzeitig zum Anfahren benutzt wird.

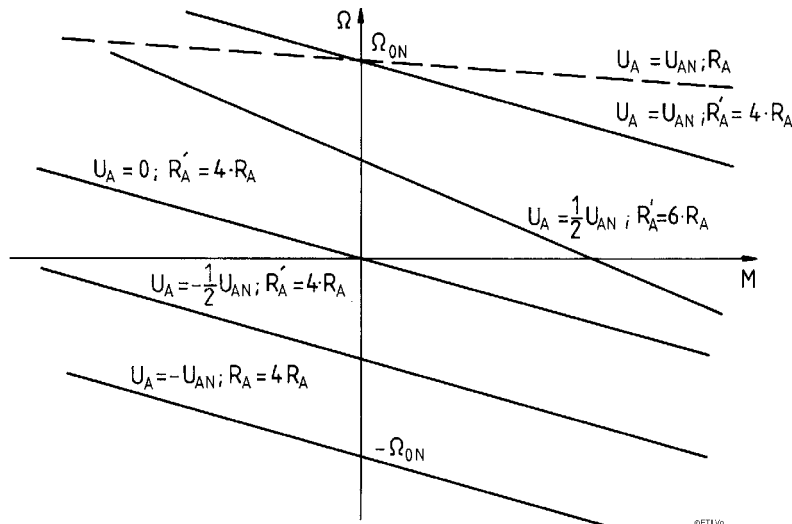


Bild 11.34: Kennlinienfeld der GM bei Steuerung mit Ankervorwiderstand R_v bei konstantem Erregerstrom und Ankerspannung.

Beim Anfahren mit Widerstandssteller (Bild 11.35) wird zunächst ein so großer Vorwiderstand in den Ankerkreis geschaltet, daß näherungsweise Nennstrom fließt ($R_v / R_A = 11$). Nachdem die Winkelgeschwindigkeit den Wert Ω_1 erreicht hat, wird die nächst kleinere Widerstandsstufe $R_v / R_A = 9$ eingeschaltet. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis im eigentlichen Betrieb kein Vorwiderstand mehr wirksam ist (Bild 11.35).

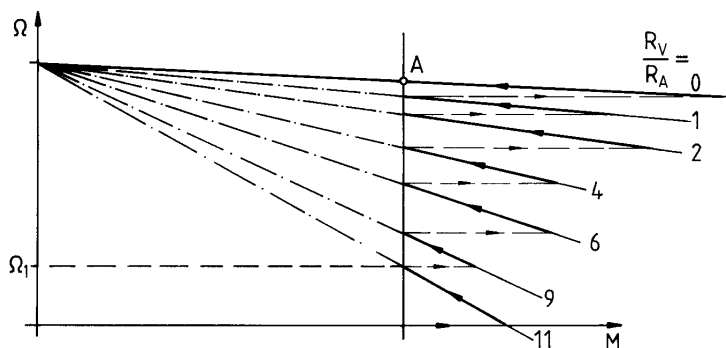


Bild 11.35: Anlassen einer GM mit stufigem Vorwiderstand

11.5.3 Feldschwächung

Feldschwächung wird angewendet, wenn die Drehzahl über die Nenndrehzahl hinaus bei begrenzter Ankerspannung ($U_A = U_{AN}$) angehoben werden soll. Bei permanentenregten Maschinen scheidet diese Stellmöglichkeit selbstverständlich aus.

Der Maximalwert des Feldstromes I_F , der in der Regel mit dem Nennererregstrom übereinstimmt, wird durch den Eigenwiderstand der Erregerwicklung selbst bestimmt. Durch Verringern des Erregerstroms wird der magnetische Fluß Φ geschwächt. Damit erhöhen sich nach Gl.(11.22) die Leerlauf- und Betriebsdrehzahl (Winkelgeschwindigkeit). Wegen der umgekehrt quadratischen Abhängigkeit der

Drehzahl vom Fluß wird der Drehzahlabfall bei gleichem Belastungsmoment auch größer (Bild 11.36).

Im einfachsten Fall wird der Erregerstrom mit Hilfe von Vorwiderständen im Erregerkreis verringert. In der Praxis stellt man den Erregerstrom im Bereich von $\pm 20 \dots 100 \%$ des Nennererregers ein.

$$I_f = \frac{U_f}{R_f + R_{fv}} \quad (11.23)$$

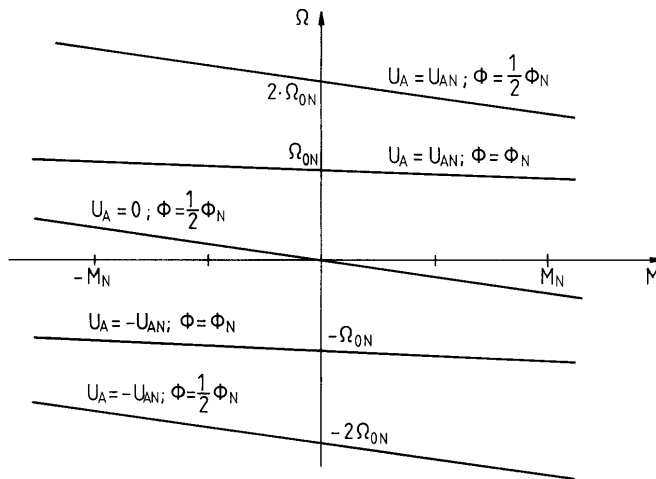


Bild 11.36: Kennlinienfeld der fremderregten GM bei Feldschwächung

Grenzen der Feldschwächung:

Bei Feldschwächung müßte bei konstant gehaltenem Drehmoment $M=M_N$ der Ankerstrom wegen $M_i = c \cdot \Phi \cdot I_A$ ansteigen. Dies ist im Dauerbetrieb mit Rücksicht auf die thermische Belastung der Maschine über den Nennwert I_{AN} hinaus nicht möglich. Bei Feldschwächung muß daher das Drehmoment soweit verringert werden, daß maximal der Ankernennstrom I_{AN} fließt. Die sich einstellende Abhängigkeit zwischen Drehzahl und Drehmoment ergeben Hyperbel. Für den Fluß muß gelten:

$$c \cdot \Phi = \frac{M}{I_{AN}} \quad \text{Eingesetzt in die Drehzahlgleichung wird:}$$

$$\Omega = \Omega_{0N} - \frac{R_A}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot M = \Omega_{0N} - \frac{R_A \cdot (I_{AN})^2}{(M)^2} \cdot M \cdot \frac{c \cdot \Phi_N}{c \cdot \Phi_N} \quad (M_N = c \cdot \Phi \cdot I_{AN})$$

$$\boxed{\Omega = \Omega_{0N} - \frac{R_A \cdot I_{AN}}{c \cdot \Phi_N} \cdot \frac{M_N}{M} = \Omega_{0N} \cdot \left(1 - \frac{R_A \cdot I_{AN}}{U_{AN}} \cdot \frac{M_N}{M} \right)} \quad (I_A = + I_{AN}) \quad (11.24)$$

Diese Grenzkurve ist unter anderen in Bild 11.37 dargestellt.

11.5.4 Vierquadrantenbetrieb

Eine voll kompensierte Gleichstrommaschine erlaubt auch entgegen der genormten Drehrichtung Motor- oder Generatorbetrieb. Die vier Kombinationsmöglichkeiten sind

in einem Koordinatensystem Bild 11.37 dargestellt. Durch die in 11.5.1 bis 11.5.3 erläuterten Verstellmöglichkeiten ist ein Betrieb in allen vier Quadranten möglich, daher der Name.

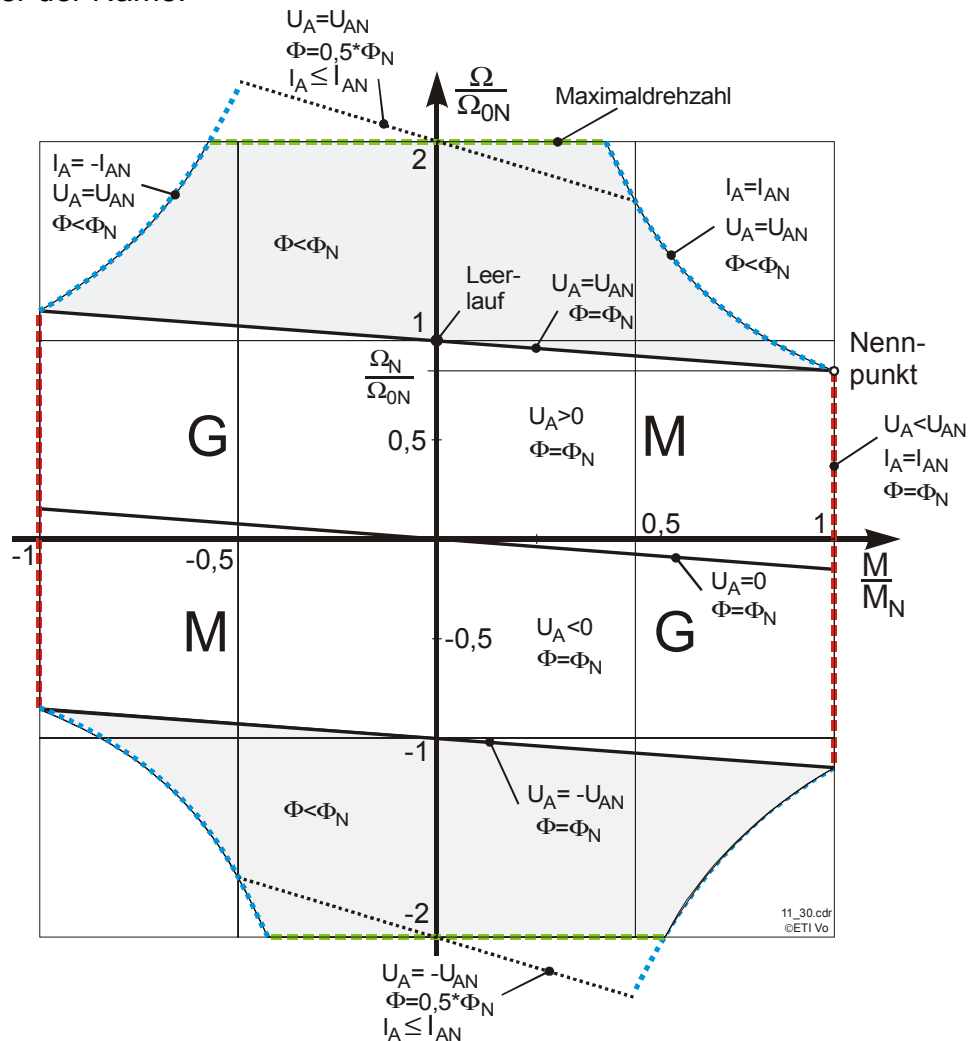


Bild 11.37: Vierquadrantenbetrieb (Bezugswert ist Ω_{0N}):

Beispiel Straßenbahn:

Wir definieren, daß für Rechtslauf die Ankerspannung positiv sei. Wenn sich der Wagen auf der Ebene bewegt, sind dafür nur die Reibungsverluste zu überwinden. Entsprechend klein ist dann auch der Ankerstrom. Da sich der Wagen mit konstanter positiver Geschwindigkeit bewegen soll, ist die Ankerspannung positiv.

Beim Erreichen der Steigung wird der Ankerstrom so groß, daß die Hangabtriebskraft überwunden wird. Der Arbeitspunkt des Antriebs befindet sich dann im Motorbetrieb bei Rechtslauf ($M;r$). Auf der Höhe haben wir wieder Leerlauf. Auf der schiefen Ebene abwärts muß der Antrieb die nach dem Beispiel nun größere Hangabtriebskraft in negativer Richtung aufnehmen. Der Ankerstrom wird daher negativ und Energie wird ins Netz zurückgespeist. Wir haben Generatorbetrieb ($G;r$) im 2. Quadrant.

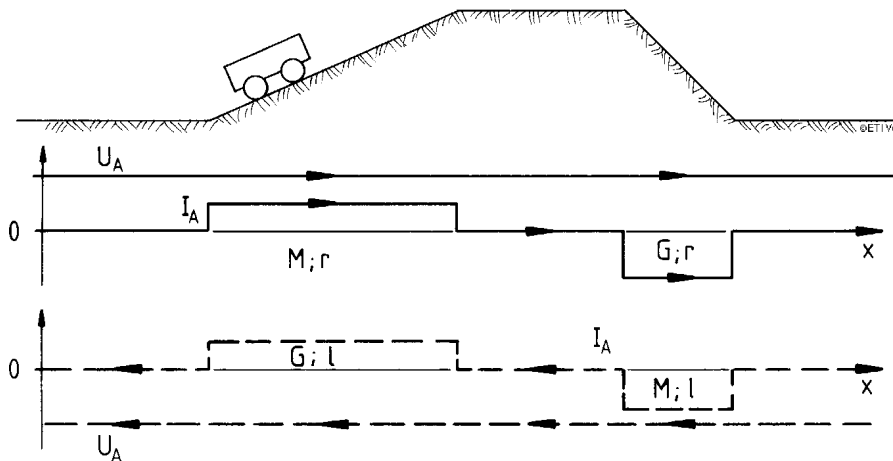


Bild 11.38: Beispiel Straßenbahn ($c\Phi = \text{konst.}$ G=Generator; M=Motor; r=Rechtslauf, l=Linkslauf)

Zum Zurückfahren muß die Drehrichtung der Maschine umgekehrt und damit die Ankerspannung umgeschaltet werden. Die Ankerspannung ist damit negativ. Zum Aufwärtsfahren wird ein negatives Drehmoment $I_A < 0$ benötigt. Der Betriebspunkt liegt daher im 3. Quadranten ($M; l$). Beim Herabfahren auf der linken Seite hat man dann positiven Strom und negative Drehzahl im 4. Quadranten ($G; l$).

11.6 Gleichstrom-Reihenschlußmaschine

Bei der Gleichstrom-Reihenschlußmaschine liegt die Erregerwicklung in Reihe mit dem Ankerkreis und muß daher auch für den Ankerstrom ausgelegt sein. Der Erregerstrom ist damit vom fließenden Ankerstrom I_A abhängig. Der mechanische Aufbau gleicht prinzipiell dem einer Gleichstrom-Nebenschlußmaschine. Alle Wicklungen im Ständer, d.h. die Wendepolwicklung, die Kompensationswicklung und die Reihenschlußwicklung, können vorhanden sein. Wie im Folgenden noch gezeigt wird, entwickelt die Reihenschlußmaschine bei kleinen Drehzahlen und im Stillstand ein sehr hohes Anzugsmoment. Daher wird diese Maschine im oberen Leistungsbereich vorwiegend bei Fahrzeugen (Bahnmotor) und Kranantrieben eingesetzt. Weiterhin sind fast alle Haushaltsgeräte, Heimwerkergeräte usw. mit einer Reihenschlußmaschine ausgerüstet.

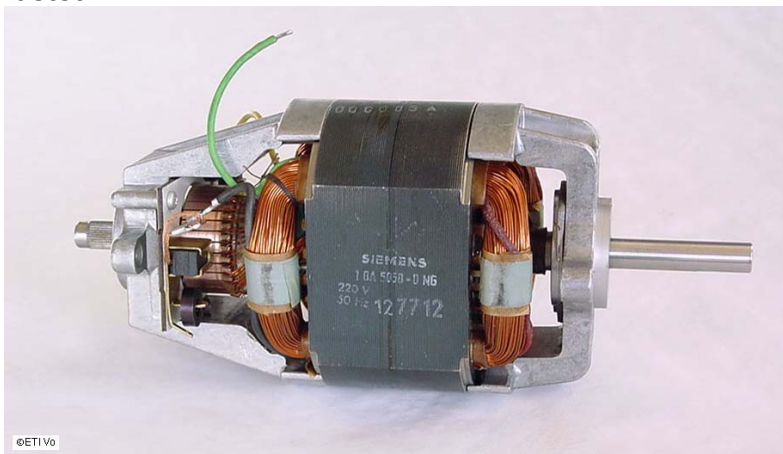
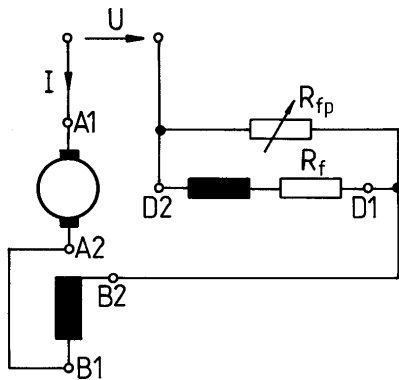


Bild 11.39: Gleichstromreihenschlußmotor als Allstrommotor in einem Staubsauger (Siemens)



Bei einfachen Maschinen sind nur die Ankerwicklung und die Erregerwicklung (D) vorhanden.

Die zusätzlichen Widerstände R_{fp} und R_f sollen die prinzipiellen Stellmöglichkeiten symbolisieren.

Bild 11.40: Schaltbild einer Gleichstromreihenschlußmaschine mit Wendepolwicklung (B) und Reihenschluß-Erregerwicklung (D).

11.6.1 Betriebsverhalten der Gleichstrom-Reihenschlußmaschine

Das Betriebsverhalten kann aus den Gleichungen der fremderregten Maschine hergeleitet werden. Der Ankerwiderstand R_A ist hier der Gesamtwiderstand von Anker-, Wendepol-, Kompensations-, Erregerwicklung und einem eventuell vorhandenen Vorwiderstand nach Bild 11.40. Parallel zu der Erregerwicklung nehmen wir noch einen verstellbaren Parallelwiderstand R_{fp} an, durch den ein Teil des Ankerstroms fließt. Der wirksame Erregerstrom ist dann

$$I_f = I_A \cdot \frac{R_{fp}}{R_{fp} + R_f} = \varepsilon \cdot I_A \quad (11.25)$$

Mit dem Parallelwiderstand kann man den Erregerstrom I_f um den Faktor ε kleiner als den Ankerstrom I_A einstellen ($\varepsilon \leq 1$). Unter der Annahme eines linearen magnetischen Kreises tritt keine Sättigung auf und der Erregerfluß ist dem Erregerstrom proportional.

$$\Phi = \Phi_N \cdot \varepsilon \cdot \frac{I_A}{I_{AN}} \quad (11.26)$$

In die Momentengleichung eingesetzt ist

$$M_i = c \cdot \Phi \cdot I_A = c \cdot \Phi_N \cdot \varepsilon \cdot \frac{I_A}{I_{AN}} \cdot I_A = C' \cdot \varepsilon \cdot I_A^2 \quad (11.27)$$

mit der Maschinenkonstanten C'

$$C' = c \cdot \frac{\Phi_N}{I_{AN}} \quad (11.28)$$

Die Konstante C' führen wir auch bei der Spannungsgleichung ein und erhalten

$$U_A = R_A \cdot I_A + c \cdot \Phi(\varepsilon I_A) \cdot \Omega = R_A \cdot I_A + C' \cdot \varepsilon \cdot I_A \cdot \Omega \quad (11.29)$$

Aus der Spannungsgleichung Gl.(11.29) und der Momentengleichung Gl.(11.27) kann die Abhängigkeit der Drehzahl (Winkelgeschwindigkeit) vom Belastungs-

ment $\Omega = f(M_i)$ abgeleitet werden, welche auch als Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinie bezeichnet wird.

$$\Omega = \frac{U_A - R_A \cdot I_A}{C' \cdot \epsilon \cdot I_A} = \frac{U_A}{C' \cdot \epsilon \sqrt{\frac{M}{\epsilon \cdot C'}}} - \frac{R_A}{C' \cdot \epsilon}$$

$$\boxed{\Omega = \frac{U_A}{\sqrt{M \cdot C' \cdot \epsilon}} - \frac{R_A}{C' \cdot \epsilon}} \quad (11.30)$$

Nach Gleichung Gl.(11.30) verlaufen die Drehzahl-Drehmomentenkennlinien hyperbolisch und sind um den konstanten Anteil $R_A / (C' \epsilon)$ verschoben (Bild 11.41). Bei geringer Belastung $M \approx 0$ wird entsprechend Gl.(11.27) nur ein kleiner Strom aufgenommen und die Drehzahl steigt nach Gl.(11.30) stark an. Damit besteht die Gefahr, daß der Läufer durch Fliehkraftbeanspruchung mechanisch zerstört wird. Aus diesem Grund dürfen Gleichstromreihenschlußmaschinen nicht unbelastet betrieben werden. Wenn an den Motor eine Arbeitsmaschine angekuppelt ist, besteht die Gefahr im Allgemeinen nicht mehr. In Bild 11.41 sind die Winkelgeschwindigkeit und der Ankerstrom bezogen auf die Nennwerte dargestellt. Im Nennbetriebspunkt, gekennzeichnet durch M_N , I_{AN} , Ω_N und $\epsilon=1$ ($R_V=0$; $R_A=R_{AN}$) haben die bezogenen Größen Ω/Ω_N und I_A/I_{AN} den Wert 1.

Das Anfahrmoment erhält man aus Gl.(11.30) für $\Omega = 0$.

$$\boxed{M_0 = \frac{U_A^2}{R_A^2} \cdot C' \cdot \epsilon} \quad (11.31)$$

Bei Ankernennspannung U_{AN} würden Anzugsmoment M_0 und Ankerstrom unzulässig hohe Werte annehmen. Deshalb wird durch Vergrößern des Ankerkreiswiderstandes mit Hilfe eines Vorwiderstandes R_V oder durch Verminderung der Ankerspannung U_A das Anfahrmoment auf einen für die Maschine ungefährlichen Wert reduziert.

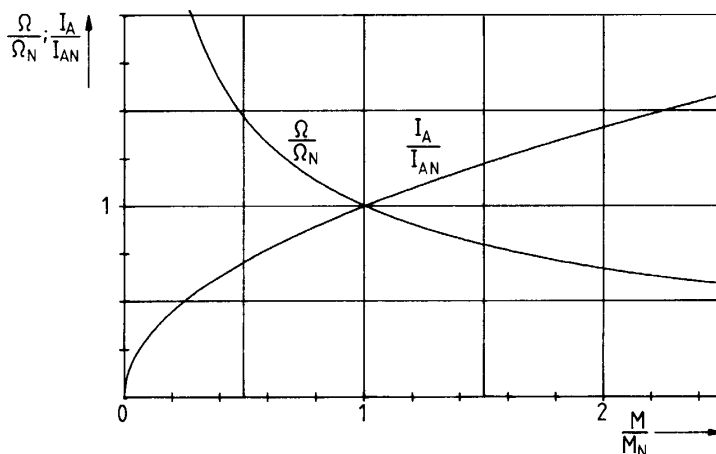


Bild 11.41: Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinie und Ankerstrom der Gleichstromreihenschlußmaschine ($\epsilon=1$; $U_A=U_{AN}$).

11.6.2 Drehzahlstellmethoden bei der Reihenschlußmaschine

Nach der Gleichung Gl.(11.30) für die Winkelgeschwindigkeit (Drehzahl) kann man die Ankerspannung U_A , den Gesamtwiderstand R_A , den Parallelwiderstand $R_{\mathcal{P}}(\varepsilon)$ oder Kombinationen davon verstellen. Die Veränderungen der Drehzahl-Drehmomentenkennlinien bei den verschiedenen Verstellmöglichkeiten werden im Folgenden gezeigt.

11.6.2.1 Spannungsverstellung

Durch die Ankerspannungsverstellung U_A verändert sich nur der Koeffizient, welcher die Abhängigkeit des Drehmoments beschreibt. Der bei einem bestimmten Moment aufgenommene Ankerstrom I_A ist entsprechend Gl.(11.27) nur vom Drehmoment nach einer Wurzelfunktion abhängig. Bei kleinen Ankerspannungen kann auch bei Drehzahl Null ein hohes Drehmoment erreicht werden ($U_A/U_{AN} = 0,1$ in Bild 11.42).

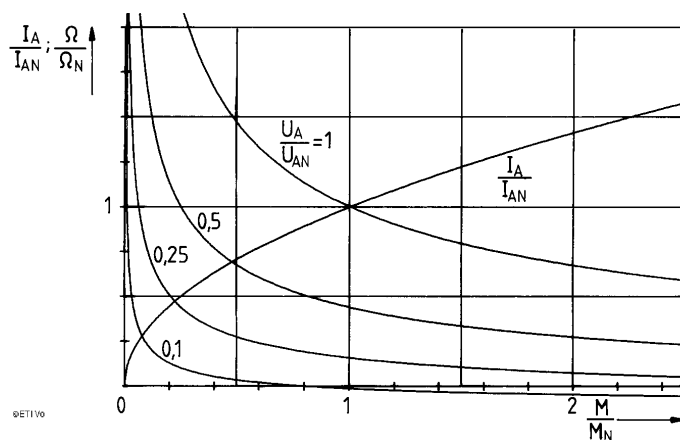


Bild 11.42: Kennlinienfeld der GM bei Ankerspannungsverstellung bei $\varepsilon=1$ und $R_{\mathcal{P}} = \infty$. $U_A/U_{AN} = 1, 0,5, 0,25, 0,1$.

11.6.2.2 Vorwiderstand

Durch die Änderung des Vorwiderstandes R_v verändert sich der Gesamtwiderstand R_A . Nach Gl.(11.30) verschieben sich die Kennlinien bei steigendem Vorwiderstand parallel zur Winkelgeschwindigkeits-Achse in Richtung Drehmomenten-Achse (Bild 11.43). Der Ankerstrom ist wie bei der Spannungssteuerung nur vom Drehmoment abhängig.

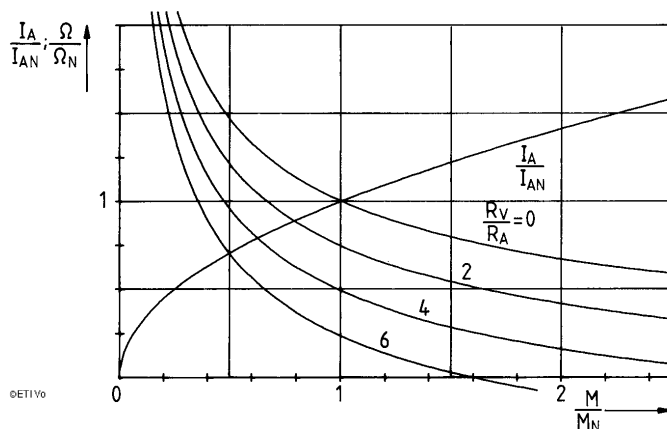


Bild 11.43: Kennlinienfeld der Gleichstrom-Reihenschlußmaschine bei Veränderung

des Vorwiderstandes $R_V/R_A=0; 2; 4; 6$.

11.6.2.3 Parallelwiderstand zur Erregerwicklung

Wenn der Parallelwiderstand R_p verstellt wird, entspricht dies einer Änderung des Faktors ε . Nach Gl.(11.30) verändert sich dadurch sowohl die Verschiebung auf der Ordinate als auch der Koeffizient beim Drehmoment. Um diese Drehzahlstellmethode anwenden zu können, ist die Ankerspannung abzusenken, weil sonst der Ankerstrom zu groß werden kann. In Bild 11.44 sind die Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinien nur soweit gezeichnet, bis der doppelte Nennstrom fließt. Da diese Drehzahlstellmethode stark verlustbehaftet ist, eignet sie sich nur für Kurzzeitbetrieb bzw. zum Anfahren.

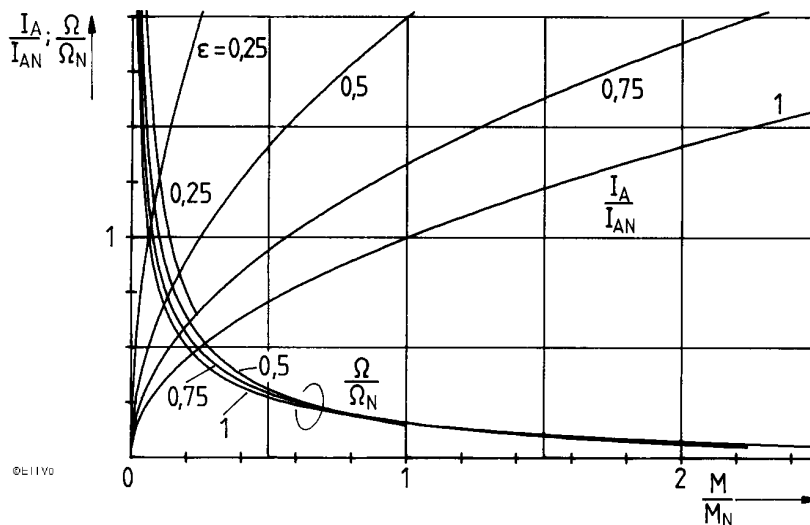


Bild 11.44: Kennlinienfeld der Gleichstrom-Reihenschlußmaschine mit Parallelwiderstand bei $U_A/U_{AN}=0,1$ und $\varepsilon=1$.

11.6.2.4 Drehrichtungsumkehr

Um die Drehrichtung der Maschine umzukehren, muß wie bei der Gleichstrom-Nebenschlußmaschine entweder der Erregerstrom oder der Ankerstrom umgekehrt werden. Da bei der Reihenschlußmaschine Erregerwicklung und Ankerkreis in Reihe geschaltet sind, bewirkt die alleinige Umkehrung der Ankerspannung keine Drehrichtungsumkehr. Aus diesem Grund sind Gleichstromreihenschlußmaschinen auch für Wechselspannung geeignet. Das Drehmoment ist dann aber nicht mehr gleichförmig, sondern pulsiert mit der doppelten Frequenz der Wechselspannung. Die Gleichstromreihenschlußmaschine wird daher und wegen ihrer Drehzahl-Drehmomenten-Charakteristik bei der Bahn als Traktionsantrieb eingesetzt, wobei die Speisefrequenz $16 \frac{2}{3}$ Hz beträgt. Zur Drehrichtungsumkehr bei Wechsel- oder Gleichspannung muß nur die Erreger- oder nur die Ankerwicklung umgeschaltet werden.

11.6.3 Beispiel für eine Reihenschlußmaschine

Eine als Bahnmotor eingesetzte Gleichstromreihenschlußmaschine hat folgende Daten. Bild 11.41 bis Bild 11.44 sind mit diesen Daten gezeichnet.

Ankernennspannung	$U_N = 300 \text{ V}$	Nenndrehzahl	$n_N = 1285 \text{ min}^{-1}$
Ankernennstrom	$I_N = 170 \text{ A}$	Ankerwiderstand	$R_A = 0,2 \Omega$
Nennleistung	$P_N = 46 \text{ kW}$	Trägheitsmoment	$J = 1,28 \text{ Ws}^3$

Aus der Nennleistung $P_N = M_i \cdot \Omega_N$, die immer die abgegebene Leistung der Maschine ist, kann das Nennmoment berechnet werden.

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{P_N}{2 \cdot \pi \cdot n_N} = \frac{46 \text{ kW } 60 \text{ s}}{2 \cdot \pi \cdot 1285} = 341 \text{ Nm}$$

Aus der Momentengleichung kann nun die Maschinenkonstante C' bestimmt werden ($\varepsilon = 1$).

$$C' = \frac{M_N}{\varepsilon \cdot I_{AN}^2} = \frac{341 \text{ Nm}}{170^2 \text{ A}^2} = 0,011828 \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

Die Drehzahlgleichung kann nun auf die Nennwerte bezogen werden. Dazu werden alle Faktoren durch ihre Nennwerte dividiert und die verbleibenden Faktoren zu Konstanten zusammengefaßt. Die bezogenen Größen werden mit Kleinbuchstaben bezeichnet.

$$\omega = \frac{u}{\sqrt{m \cdot \varepsilon}} \cdot k_1 - \frac{r_A}{\varepsilon} \cdot k_2 \quad (11.32)$$

mit

$$k_1 = \frac{U_{AN}}{\sqrt{C' \cdot M_N} \cdot \Omega_N} \quad \text{und} \quad k_2 = \frac{R_{AN}}{C' \cdot \Omega_N}$$

Bei der Beispielmachine ist $k_1 = 1,156$ und $k_2 = 0,1256$. Die aufgenommene Leistung ist $P_{zu} = U_N \cdot I_N = 51 \text{ kW}$. Der Wirkungsgrad im Nennbetrieb ergibt sich daraus zu $\eta = 0,901$.

