

4. Gleichstrommaschinen

Der Fertigungsbereich von Gleichstrommaschinen reicht von Kleinstmotoren mit Leistungen von unter einem Watt für die Feinwerktechnik bis zu Großmaschinen mit Spannungen bis 1500 V und über 10 MW.

Dauermagneterregte Motoren bis rd. 100 W werden in großen Stückzahlen in der Kfz-Elektrik eingesetzt.

4.1 Aufbau und Wirkungsweise

Die Erzeugung eines Drehmomentes basiert bei der Gleichstrommaschine auf dem Kraftwirkungsgesetz.

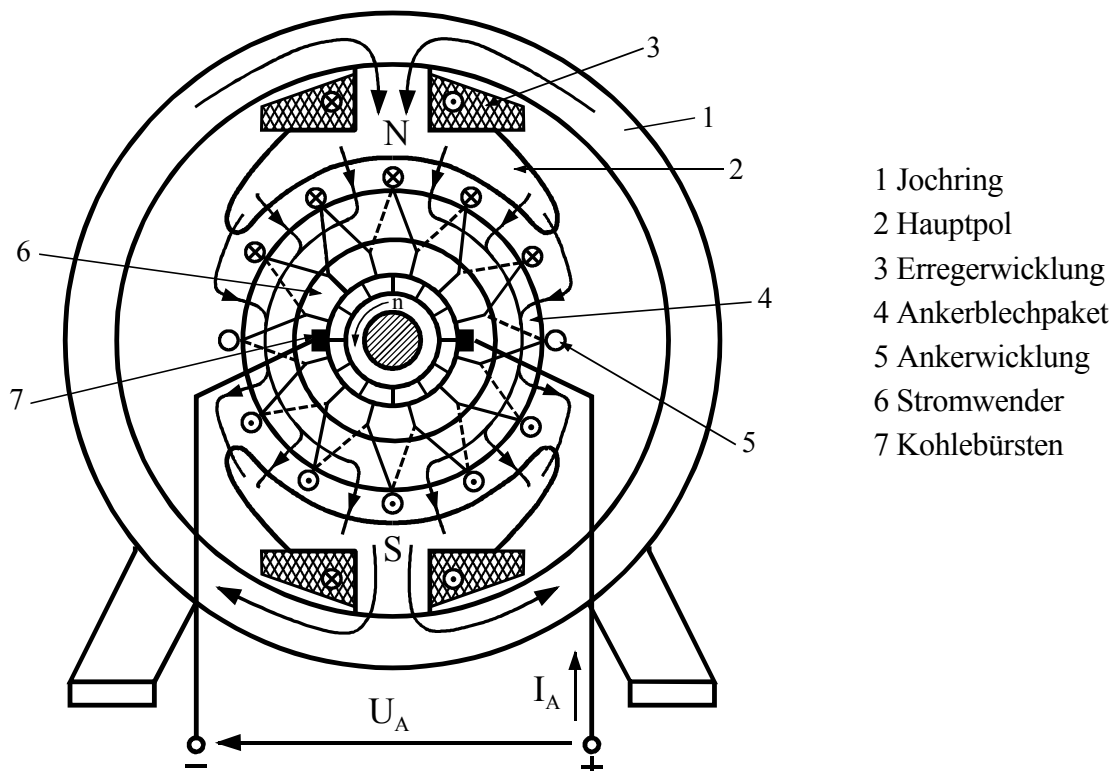
$$\vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (4.1)$$

In einem Magnetfeld der Flußdichte B müssen drehbar Leiter der Länge l angeordnet sein, die einen Strom I führen. Alle Leiter eines Polbereiches müssen dabei gleichsinnig vom Strom durchflossen werden.

Der feststehende Ständer aus massivem oder geblechtem Eisen trägt einen Elektromagneten, dessen Erregerwicklung die zum Aufbau des Feldes erforderliche Durchflutung liefert. Die Enden des Magneten, die Hauptpole, sind nach innen durch sogenannte Polschuhe erweitert, um gleichzeitig eine möglichst große Leiterzahl zu erfassen. Den äußeren magnetischen Rückschluß stellt der Jochring sicher.

Die Welle der Maschine trägt einen aus Dynamoblechen geschichteten Eisenkörper. Alle Stäbe bilden zusammen mit ihren Verbindungen die Ankerwicklung. Man bezeichnet den ganzen rotierenden Teil als Anker der Gleichstrommaschine.

Der magnetische Kreis ist bis auf den Luftspalt ganz aus Eisen mit $\mu_r \gg 1$ aufgebaut.



Prinzipieller Aufbau einer Gleichstrommaschine

Der Stromwender, auch Kommutator oder Kollektor genannt, übernimmt eine Umschaltung der Stromrichtung im Ankerleiter beim Wechsel des Polbereichs.

Der Stromwender besteht aus voneinander isolierten Kupfersegmenten oder Lamellen. Er sitzt mit dem Blechpaket fest auf der Welle.

Die einzelnen Spulen der Ankerwicklung sind mit ihren Anfängen und Enden nacheinander an die Segmente gelötet. Die Stromzuführung in die Ankerwicklung erfolgt über Kohlebürsten. In der neutralen Zone wechselt so in jedem Leiter die Stromrichtung.

Rotiert ein Gleichstromanker im Ständerfeld der Luftspalt-Flußdichte B , so wird in den Leiterstäben entlang des Umfangs eine Spannung induziert.

$$U_q = \vec{B} \cdot (\vec{v} \times \vec{l}) \quad (4.2)$$

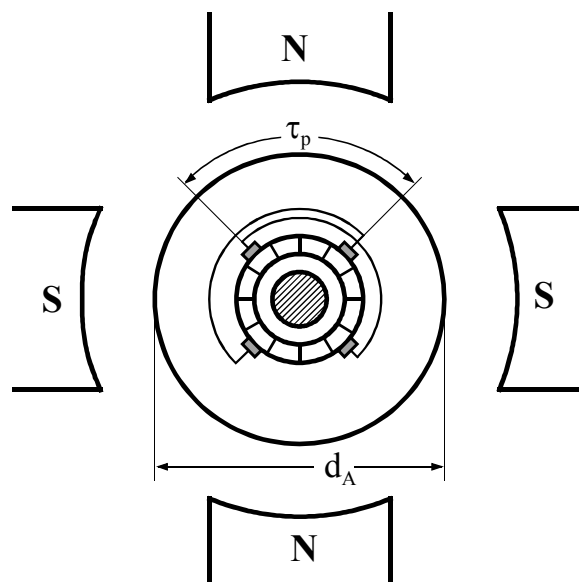
Durch Reihenschaltung der Spulen addieren sich deren Spannungen zwischen benachbarten Kohlebürsten und bilden in ihrer Summe die Quellenspannung. Der Stromwender sorgt dafür, daß stets der Maximalwert und damit eine Gleichspannung an den Ankerklemmen auftritt.

Gleichstrommaschinen sind ohne Änderungen im Aufbau für den Motor- oder Generatorbetrieb geeignet. Die in der Ankerwicklung induzierte Gesamtspannung zwischen den Kohlebürsten hat beim Generator die Funktion einer Quellenspannung, beim Motor wirkt sie als induzierte Spannung der von außen angelegten Gleichspannung entgegen.

Größere Gleichstrommaschinen werden nicht nur mit zwei Hauptpolen, sondern höherpolig ausgeführt. Der Bereich eines Poles am Ankerumfang, die Polteilung τ_p , berechnet sich aus dem Ankerdurchmesser d_A und der Polpaarzahl p .

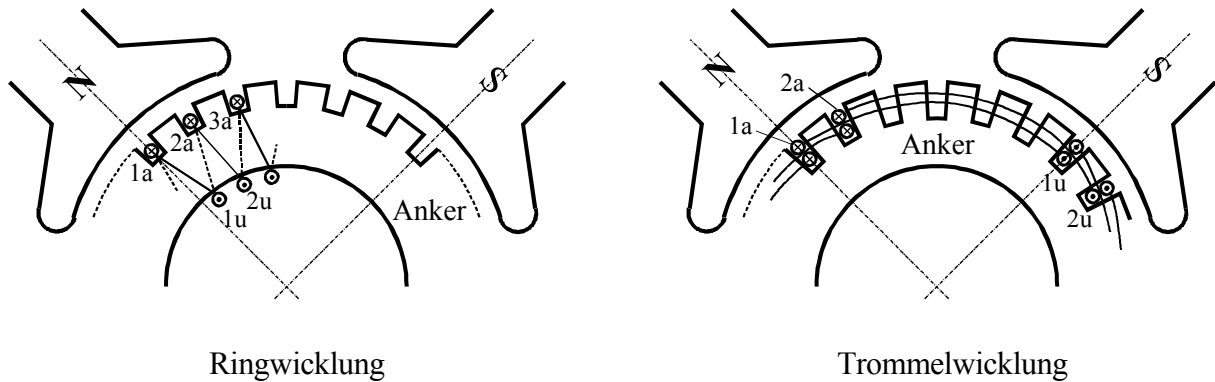
$$\tau_p = \frac{d_A \cdot \pi}{2p} \quad (4.3)$$

Jedes Polpaar erhält je eine Plus- und eine Minusbürste, wobei gleichnamige Bürsten untereinander verbunden sind.



Kohlebürsten und Polteilung der vierpoligen Gleichstrommaschine

Die früher verwendete Anker-Ringwicklung ist heute durch die Trommelwicklung abgelöst worden.

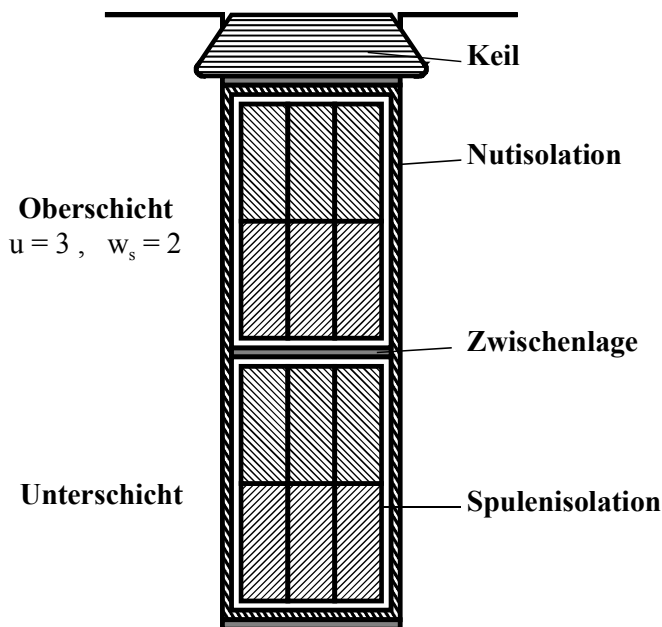


Schaltung der Ankerleiter zur Wicklung

Jede Spule ist mit Anfang und Ende an je eine Stromwenderlamelle angeschlossen. Die Anzahl der Spulen stimmt mit der Lamellen- oder Stegzahl k überein.

Die Nutzahl des Ankers N wird im allgemeinen kleiner als die Lamellenzahl gewählt, so daß u Spulenseiten einer Schicht nebeneinander in einer Nut liegen. Hat die Spule zudem die Windungszahl w_s , so ergibt sich eine Nutfüllung $2u \cdot w_s$ Stäben/Nut. Die Gesamtzahl der Leiterstäbe am Ankerumfang wird z_A bezeichnet. Es gilt:

$$u = \frac{k}{N} \quad z_A = 2 \cdot u \cdot w_s \cdot N = 2 \cdot k \cdot w_s \quad (4.4)$$



Querschnitt durch eine Ankerlut mit parallelen Flanken und Rechteckstab

Die Spulenweite y_1 beträgt bei der Durchmesserwicklung genau eine Polteilung ($y_1 = k/2p$) oder etwas weniger bei der Sehnwicklung ($y_1 < k/2p$).

Will man die u Spulenseiten einer Oberschicht auch in der Unterschicht in einer Nut beieinander haben, dann ergeben sich Spulen gleicher Weite. Für den Nutschritt y_{1n} ergibt sich dann die Bedingung:

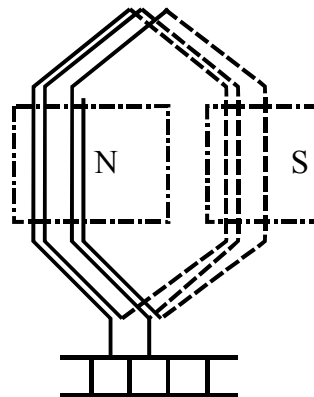
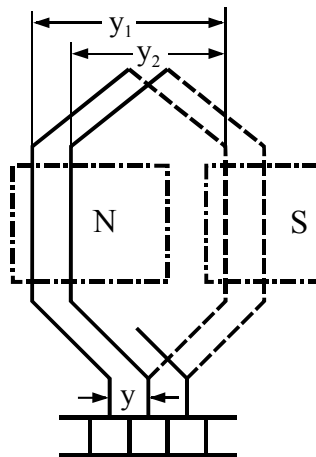
$$y_{1n} = \frac{y_1}{u} = \text{ganzzahlig} \quad (4.5)$$

Die Zusammenschaltung der einzelnen Spulen zu der geschlossenen Ankerwicklung und damit die Addition der Teilspannungen erfolgt mit der Schleifen- oder mit der Wellenwicklung.

$y_1 = \text{Spulenweite}$

$y_2 = \text{Schaltschritt}$

$y = \text{Wicklungsschritt}$



Eine Windung pro Spule, $w_s = 1$

Zwei Windungen pro Spule, $w_s = 2$

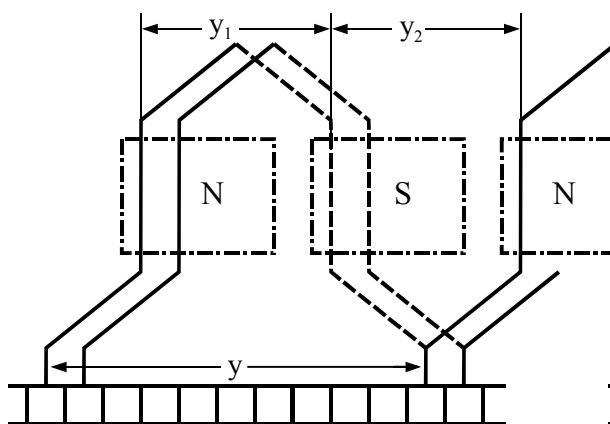
Schaltung einer Schleifenwicklung

Für die Höhe der Gesamtspannung ist die Windungszahl w zwischen zwei ungleichnamigen Kohlebürsten mit der Bürsten-Schrittweite y_B maßgebend. Der Ankerstrom I_A teilt sich entsprechend der Wicklungsart auf und ergibt den Leiterstrom I_s .

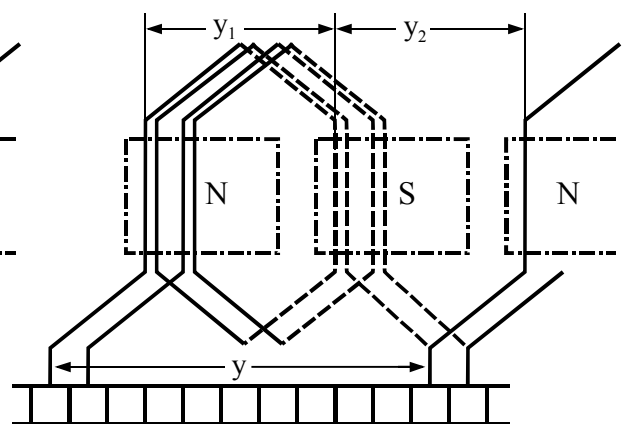
Für die Schleifenwicklung muß N/p ganzzahlig sein. Es gilt:

$$y = 1 \quad y = y_1 - y_2 \quad w = \frac{z_A}{4 \cdot p} \quad I_s = \frac{I_A}{2 \cdot p} \quad (4.6)$$

Bei der Schleifenwicklung werden die gesamten $2p$ Ankerzweige erst durch die Verbindungsleitungen der gleichpoligen Kohlebürsten parallelgeschaltet. Da geringe Unsymmetrien zu Ausgleichsströmen führen, werden zur Entlastung der Kohlebürsten Ausgleichsverbindungen ausgeführt.



Eine Windung pro Spule, $w_s = 1$



Zwei Windungen pro Spule, $w_s = 2$

Schaltung einer Wellenwicklung

Für die Wellenwicklung gilt:

$$y = \frac{k - 1}{p} \quad y = y_1 + y_2 \quad w = \frac{z_A}{4} \quad I_s = \frac{I_A}{2} \quad (4.7)$$

Allgemeine Beziehungen

Die Zahl der parallelen Ankerzweigpaare wird mit a bezeichnet. Für die Schleifenwicklung gilt dann $a = p$ und für die Wellenwicklung $a = 1$.

Für die Windungszahl zwischen zwei Bürsten w , für den Leiterstrom I_s und für die Windungszahl zwischen zwei Lamellen w_k gelten:

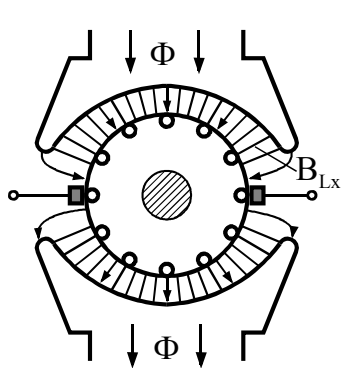
$$w = \frac{k \cdot w_s}{2a} = \frac{z_A}{4a} \quad I_s = \frac{I_A}{2a} \quad w_k = \frac{w_s \cdot p}{a} \quad (4.8)$$

Luftspaltfelder

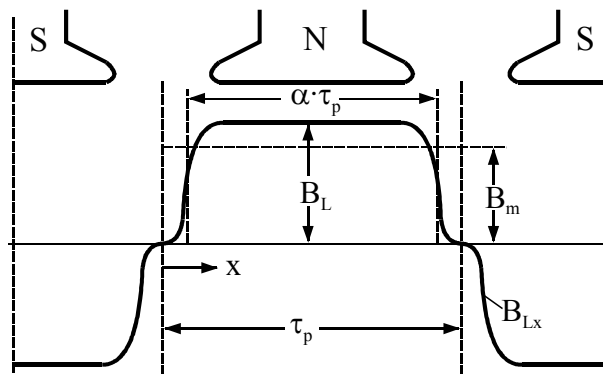
Für den Betrieb der Gleichstrommaschine interessiert vor allem die Radialkomponente der Luftspaltinduktion entlang des Ankerumfangs. Diese Feldkurve bestimmt die Größe des magnetischen Flusses und damit die induzierte Gesamtspannung und das Drehmoment.

Im Leerlauf besteht nur das Magnetfeld der Hauptpole, das als Hauptfeld bezeichnet wird. Es gilt:

$$\Phi = B_m \cdot l \cdot \tau_p = \alpha \cdot B_L \cdot l \cdot \tau_p \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{B_m}{B_L} \quad (4.9)$$



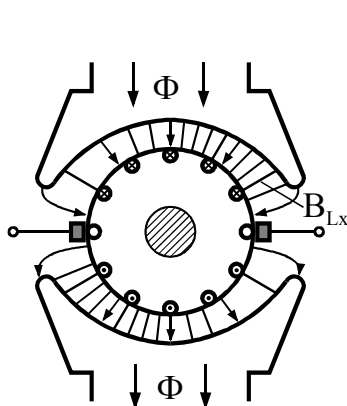
Feldverlauf zwischen Hauptpol und Anker



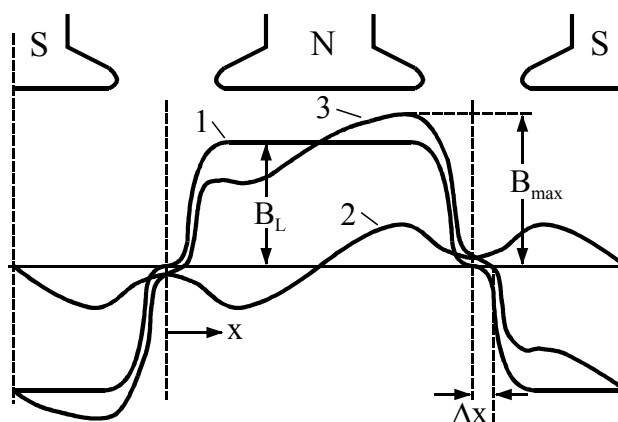
Erregerfeldkurve und Definition des Polbedeckungsfaktors α

Erregerfeld einer Gleichstrommaschine im Leerlauf

Bei Betrieb der Gleichstrommaschine tritt im Anker der Laststrom I_A auf, der ein eigenes Magnetfeld zur Folge hat, das Ankerquerfeld.



Feldverlauf zwischen Polschuhen und Anker



Verlauf der Luftspaltinduktion (1 Erregerfeld im Leerlauf, 2 Ankerquerfeld, 3 Resultierender Verlauf)

Resultierendes Hauptpolfeld bei Belastung

Im Betrieb der Gleichstrommaschine treten das Erreger- und das Ankerquerfeld gleichzeitig auf, wobei wegen der magnetischen Sättigung das resultierende Gesamtfeld nicht mit der Addition der zwei Teilfelder übereinstimmt. Man bezeichnet die Beeinflussung der Luftspaltinduktion durch die Ankerdurchflutung als Ankerrückwirkung.

Die Ankerrückwirkung verzerrt das Hauptfeld, so daß unter einer Polhälfte eine höhere Luftspaltinduktion entsteht ($B_{\max} > B_L$). Infolge der magnetischen Sättigung wird das Feld der einen Polhälfte weniger verstärkt als in der anderen geschwächt. Der Fluß ist damit kleiner als bei Leerlauf ($\Phi < \Phi_0$). Die neutrale Zone mit $B = 0$ wird aus der Mitte der Polücke verschoben.

Besteht innerhalb der Polteilung die mittlere Luftspaltinduktion B_m , so wird in jeder Windung der Ankerwicklung eine mittlere Spannung (4.10) induziert.

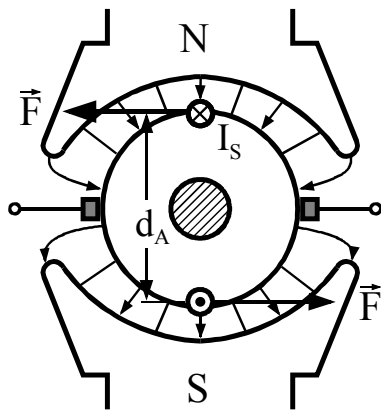
$$U_{qw} = 2 \cdot B_m \cdot l \cdot v \quad (4.10)$$

Zwischen benachbarten Bürsten stehen für die Spannungsbildung w Windungen zur Verfügung, so daß sich die induzierte Ankerspannung einer Gleichstrommaschine wie folgt berechnet.

$$U_q = w \cdot U_{qw} = 4 \cdot w \cdot p \cdot n \cdot \Phi = \frac{z_A}{a} \cdot p \cdot n \cdot \Phi \quad (4.11)$$

Eine wichtige Größe für den Betrieb der Gleichstrommaschine ist die Lamellenspannung U_s , auch Steg- oder Segmentspannung genannt, die zwischen benachbarten Stromwenderlamellen auftritt. Der Mittelwert läßt sich einfach aus der Klemmenspannung U_A des Ankers geteilt durch die Lamellenzahl pro Polteilung berechnen.

$$U_s = \frac{U_A \cdot 2 \cdot p}{k} = \frac{2 \cdot w_s \cdot p}{a} \cdot B_m \cdot l \cdot v \quad (4.12)$$



Das vom Anker der Gleichstrommaschine erzeugte sogenannte innere Drehmoment M_i läßt sich über die Kraft $F = B \cdot l \cdot I$ auf einen stromdurchflossenen Ankerstab berechnen.

Bildung des Drehmomentes aus Tangentialkräften F der Ankerleiter

Das innere Drehmoment M_i ist damit:

$$M_i = B_m \cdot l \cdot I_s \cdot \frac{d_A}{2} \cdot z_A = \frac{p \cdot z_A}{2a \cdot \pi} \cdot \Phi \cdot I_A \quad (4.13)$$

$$\text{mit } B_m = \frac{2p \cdot \Phi}{l \cdot \pi \cdot d_A} \quad \text{und } I_s = \frac{I_A}{2a}$$

Das innere Moment läßt sich mit der Drehzahl zu einer inneren Leistung P_i verbinden. Die innere Leistung ist die Grundlage zur Auslegung einer Maschine.

$$P_i = 2\pi \cdot n \cdot M_i = U_q \cdot I_A \quad (4.14)$$

Beim Motor ist das an der Welle abgegebene Drehmoment M um das Reibdrehmoment M_R kleiner als das innere Drehmoment M_i ($M = M_i - M_R$). Das Reibdrehmoment wird zur Überwindung der Reibungsverluste (einschließlich der Eisenverluste) des Ankers benötigt.

Die abgegebene Leistung ergibt sich zu:

$$P_2 = 2\pi \cdot n \cdot M \quad (4.15)$$

Die Leistungsaufnahme der Maschine beträgt:

$$P_1 = P_2 + P_V = \frac{P_2}{\eta} \quad (4.16)$$

P_V sind die Gesamtverluste und η der Wirkungsgrad.

Zur Kompensation des Ankerquerfeldes sind im Bereich der neutralen Zone Wendepole, deren Wicklungen sind zum Anker gegensinnig in Reihe geschaltet.

Um das Ankerquerfeld auch im Bereich der Polschuhe zu kompensieren, muß in sie eine Kompensationswicklung gelegt werden, die mit Anker und Wendepolen in Reihe geschaltet ist. Da die Kompensationswicklung konstruktiv aufwendig und damit teuer ist, wird bei Maschinen bis zu mittleren Leistungen meist darauf verzichtet.

Die Feldschwächung durch die Ankerrückwirkung wird häufig mit einer Hilfsreihenschlußwicklung (Kompoundwicklung) ausgeglichen. Derartige Maschinen werden auch als Doppelschlußmaschinen bezeichnet.

Sonderbauformen

Beim Dauermagnetmotor werden im Prinzip nur die gleichstromerregten Hauptpole durch Ferrit-Dauermagnete ersetzt (bis 1 kW).

Gegenüber der elektrischen Erregung erreicht man folgende Vorteile:

- kleinerer Außendurchmesser
- einfacherer Aufbau, weniger Anschlüsse
- höheren Wirkungsgrad, da keine Erregerverluste.

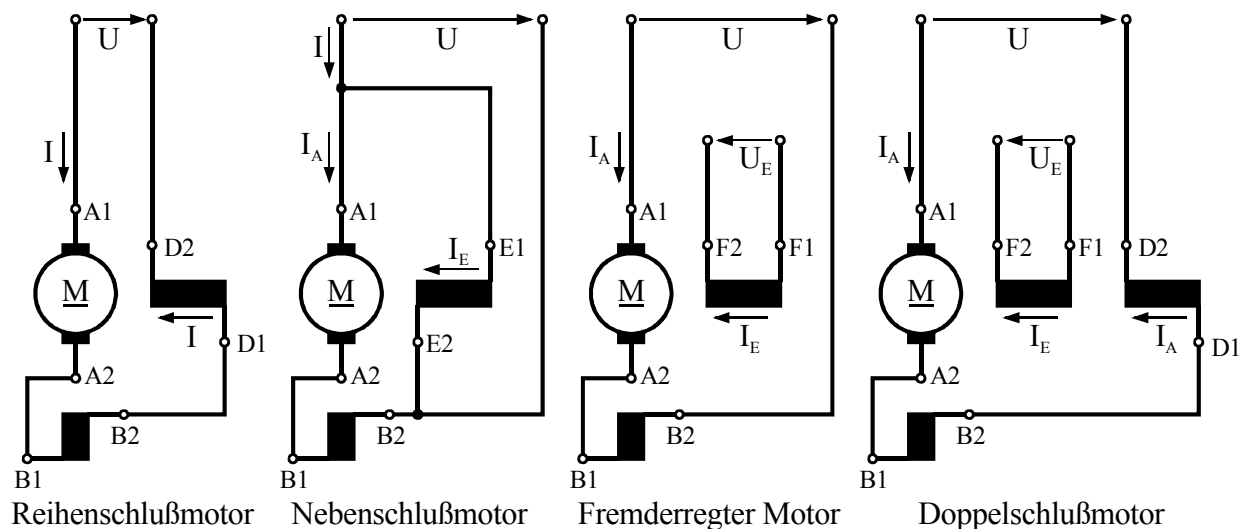
Durch die Entwicklung der Seltenerd-Kobaltnagnete mit ihren Remanenzflußdichten bis 1 T wird die Ausnützung der dauermagneterregten Maschine weiter verbessert.

Beim Elektronikmotor werden anstelle des mechanischen Stromwenders Halbleiter-Stellglieder eingesetzt. Im Bereich der Kleinmotoren fertigt man kollektorlose Maschinen als sogenannte Elektronikmotoren, die über ein Netzgerät mit Gleichspannung versorgt werden. Aus praktischen Gründen erfolgt die Umschaltung des Gleichstromes auf die einzelnen Wicklungszweige der dauermagneterregten Maschine nicht im Läufer, sondern durch eine Umkehr der Anordnung im feststehenden Teil.

4.2 Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine

Für die Darstellung und Schaltzeichen der Wicklungen einer Gleichstrommaschine sowie deren Anschlußbezeichnungen gilt die Norm DIN 42401 T.3.

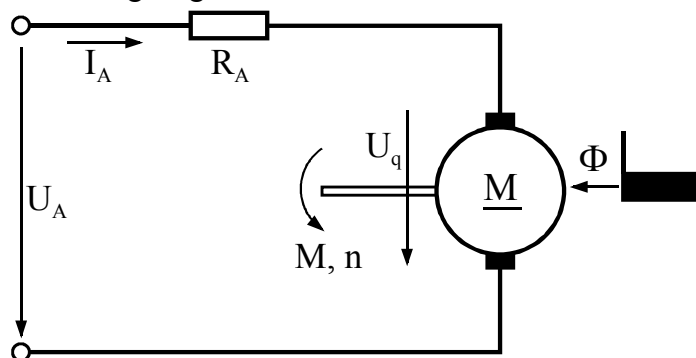
Maschinenteil	Anschlußklemmen
Anker(wicklung)	A1 - A2
Wendepolwicklung	B1 - B2
Kompensationswicklung	C1 - C2
Erregerwicklung (Reihenschluß)	D1 - D2
Erregerwicklung (Nebenschluß)	E1 - E2
Erregerwicklung (Fremderregung)	F1 - F2



Schaltbilder von Gleichstrommaschinen (Motorbetrieb, Rechtslauf)

Kennlinien von Gleichstrommaschinen

Das stationäre Betriebsverhalten einer Gleichstrommaschine läßt sich über die Ersatzschaltung mit den eingetragenen Größen bestimmen.



Ersatzschaltung zur Bestimmung des stationären Betriebsverhaltens der Gleichstrommaschine

Vernachlässigt man zunächst den Bürstenspannungsfall $2 \cdot U_B$, so erhält man die Spannungsgleichung im Ankerkreis.

$$U_A = U_q + R_A \cdot I_A \quad (4.17)$$

Für die Quellenspannung U_q gilt nach Gl. (4.11):

$$U_q = c \cdot \Phi \cdot n \quad \text{mit} \quad c = \frac{z_A \cdot p}{a} \quad (4.18)$$

Die Abhängigkeit der Drehzahl vom Ankerstrom läßt sich aus den Gln. (4.17 und 4.18) herleiten.

$$n = \frac{U_A - R_A \cdot I_A}{c \cdot \Phi} \quad (4.19)$$

Für das innere Drehmoment M_i gilt nach Gl. (4.13) mit der Maschinenkonstante c (4.18):

$$M_i = \frac{c \cdot \Phi}{2\pi} \cdot I_A \quad (4.20)$$

Das innere Drehmoment bilden das an der Welle verfügbare Drehmoment M und das Reibdrehmoment M_R .

$$M_i = M + M_R \quad (4.21)$$

Aus den Gln. (4.19 - 4.21) läßt sich die allgemeine Drehzahl-Drehmomentenbeziehung herleiten.

$$n = \frac{U_A}{c \cdot \Phi} - \frac{2\pi \cdot R_A}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot (M + M_R) \quad (4.22)$$

Alle Gleichungen gelten unabhängig von der Schaltung der Erregerwicklung für jeden stationären Betriebszustand.

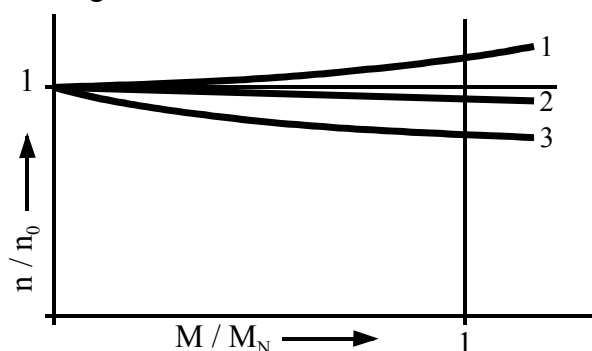
Treibt ein Motor eine Arbeitsmaschine mit dem Momentenbedarf $M_w = f\{n\}$ an, so ergibt sich die Betriebsdrehzahl aus dem Schnittpunkt beider Drehzahl- Drehmomentkurven. Für diesen Arbeitspunkt liegt sogenannte statische Stabilität vor, wenn Gl. (4.23) erfüllt wird.

$$\left(\frac{dM_w}{dn} \right)_{\text{Last}} > \left(\frac{dM}{dn} \right)_{\text{Motor}} \quad (4.23)$$

Da Gleichstrommotoren im allgemeinen als drehzahlgeregelte Antriebe verwendet werden, sind vorwiegend fremderregte Maschinen im Einsatz. Die Erregerwicklung erhält dabei einen konstanten Gleichstrom und ohne Berücksichtigung der Ankerrückwirkung einen von der Belastung unabhängigen Fluß Φ .

Der Drehzahlabfall bis zur Nennlast beträgt bei dem fremderregten Gleichstrommotor nur einige Prozent. Eine derartige Drehzahlkurve bezeichnet man als harte Kennlinie mit Nebenschlußverhalten.

Beim Doppelschlußmotor wird die unfreiwillige Feldschwächung durch zusätzliche Reihenschlußerregung mit einer konstruktiv einfachen Compoundwicklung ausgeglichen. Die Auslegung der Zusatzerregung erfolgt im allgemeinen so, daß ein leichter Drehzahlabfall mit der Belastung erreicht wird.



- 1) Gegenkompoundierung
- 2) normale Kompoundierung
- 3) Überkompoundierung

Drehzahlkennlinien des Doppelschlußmotors

Der Gleichstrom-Reihenschlußmotor besitzt wegen $I_A = I_E = I$ eine laststromabhängige Felderregung, womit ohne Berücksichtigung der magnetischen Sättigung die Beziehung $\Phi = c_I \cdot I$ besteht.

Mit $c_R = c \cdot c_I$ erhält man nach Gl. (4.18) für einen Reihenschlußmotor die Quellenspannung:

$$U_q = c_R \cdot I \cdot n \quad (4.24)$$

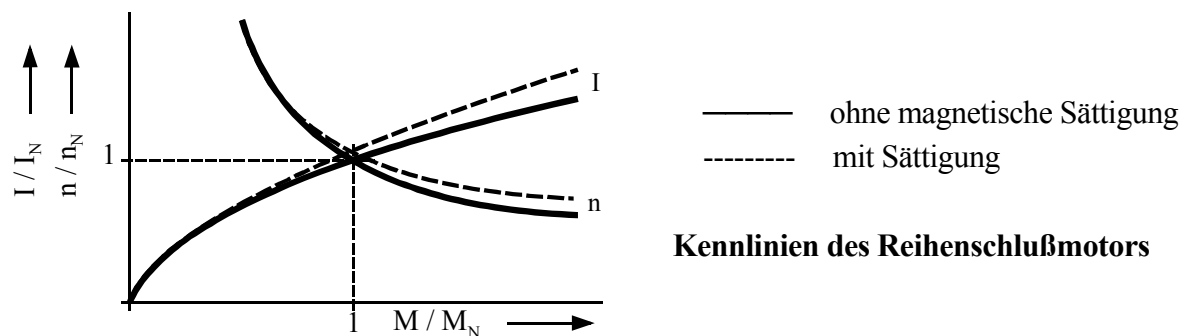
Das innere Drehmoment berechnet sich über Gl. (4.20):

$$M_i = \frac{c_R}{2\pi} \cdot I^2 \quad (4.25)$$

Aus den Gln. (4.17 u. 4.20) läßt sich mit Gl. (4.25) auch die Drehzahl-Drehmomentenbeziehung des Reihenschlußmotors angeben. Es gilt:

$$n = \frac{U}{\sqrt{2\pi \cdot c_R \cdot (M + M_R)}} - \frac{R_A}{c_R} \quad (4.26)$$

Anstelle der harten Kennlinie der fremderregten Maschine ergibt sich beim Reihenschlußmotor ein hyperbolischer Drehzahlverlauf. Da die Drehzahl des Reihenschlußmotors im Leerlauf auf unzulässig hohe Werte ansteigen würde, darf dieser nur unter Belastung betrieben werden.



Der Reihenschlußmotor fand früher seine Anwendung vorwiegend als Fahrmotor in Nahverkehrs- und Industriebahnen. Heute wird er als Universalmotor bei Handbohrmaschinen, Handkreissägen usw. eingesetzt.

4.3 Steuerung von Gleichstrommaschinen

Die Drehzahl-Drehmomentenbeziehung einer Gleichstrommaschine gilt in Anlehnung an Gl. (4.22) allgemein:

$$n = \frac{U_A}{c \cdot \Phi} - \frac{2\pi \cdot (R_A + R_V)}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot (M + M_R) \quad (4.27)$$

Für die Drehzahlverstellung kann ein Vorwiderstand R_V in den Ankerkreis zugeschaltet werden. Die Drehmomenten-Drehzahlkennlinien werden steiler; es entstehen hohe Stromwärmeverluste im Vorwiderstand R_V .

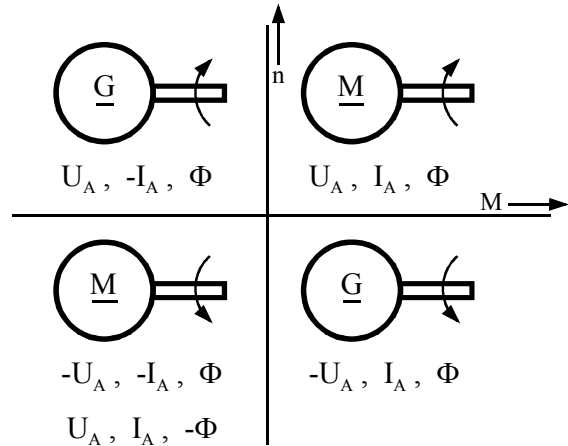
Durch Feldschwächung ($\Phi \leq \Phi_N$) kann die Drehzahl n erhöht werden; gleichzeitig wird das zur Verfügung stehende Drehmoment verkleinert.

Eine Verstellung der Ankerspannung bis zur Ankernennspannung ($U_A \leq U_{AN}$) und damit ein Drehzahlbereich von $0 \leq n \leq n_N$ ist prinzipiell mit dem rotierenden Leonard-Umformer möglich.

Bei stationären Gleichstromantrieben wird heute im allgemeinen die verlustarme Verstellung der Ankerspannung mit einem Stromrichter in Sechspuls-Brückenschaltung B6 realisiert (Leistungen bis 3 kW auch in Zweipuls-Brückenschaltung B2).

Bei der Projektierung eines Gleichstromantriebs muß neben den Nenndaten P_N , U_N und n_N auch bekannt sein, ob ein Motorbetrieb für eine oder beide Drehrichtungen und ggf. eine Nutzbremung erforderlich ist. Die verschiedenen Betriebszustände einer Gleichstrommaschine lassen sich durch die Lage ihrer Drehzahl-Drehmomentenkurve $n = f\{M\}$ in einem der vier Quadranten angeben.

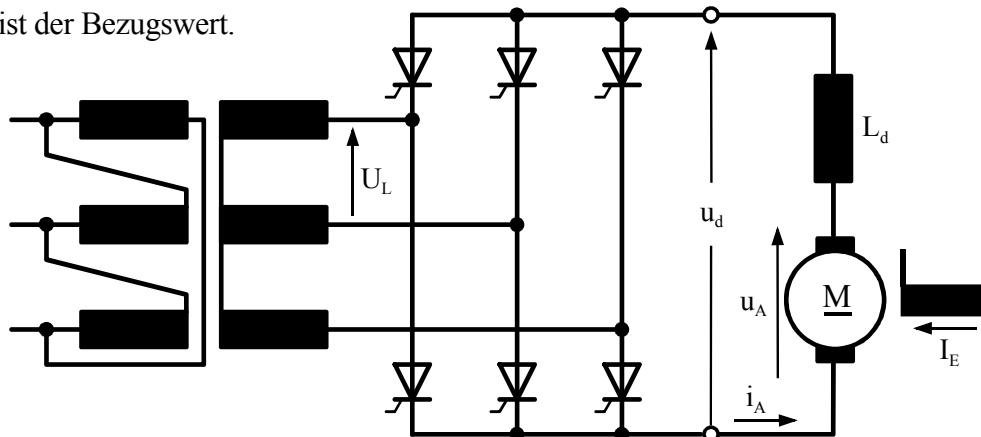
Steuerung einer Gleichstrommaschine im Vierquadrantenbetrieb



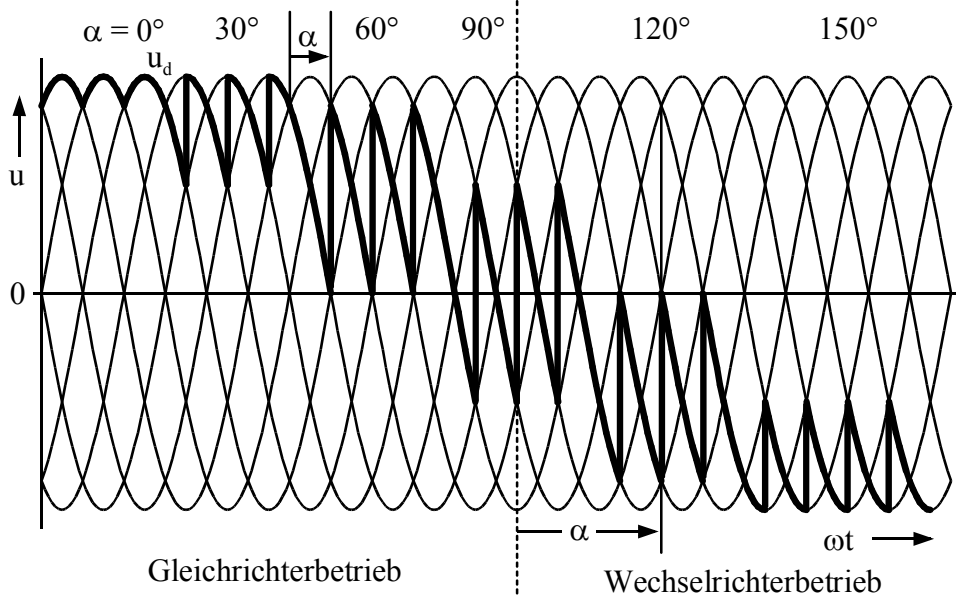
Durch die Beziehungen

$$n \sim \frac{U_A}{\Phi} \quad \text{und} \quad M \sim I_A \cdot \Phi$$

liegt dabei fest, welche Vorzeichen Ankerspannung, -strom und Hauptfeld in den verschiedenen Arbeitsweisen haben. Der Motorbetrieb im ersten Quadranten, in dem alle Größen positiv gezählt werden, ist der Bezugswert.



Gleichstromantrieb mit Stromrichter in Sechspuls-Brückenschaltung



Bildung der Gleichspannung u_d bei einer Sechspuls-Brückenschaltung

Die Bildung der momentanen Stromrichterspannung u_d erfolgt nach dem für die Drehstrom-Brückenschaltung gültigen Diagramm.

Der maximale Mittelwert U_{d0} entsteht durch die Hüllkurve der Netzspannung U_L und beträgt bei der Zweipuls-Brückenschaltung B2:

$$U_{d0} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_L \quad (4.28)$$

Bei der Sechspuls-Brückenschaltung B6 (Drehstrom-Brückenschaltung) beträgt dieser Wert:

$$U_{d0} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_L \quad (4.29)$$

Durch eine Anschnittsteuerung, d.h. verspätete Zündung der Thyristoren um den Zündwinkel α , sinkt der Mittelwert U_d der Gleichspannung nach:

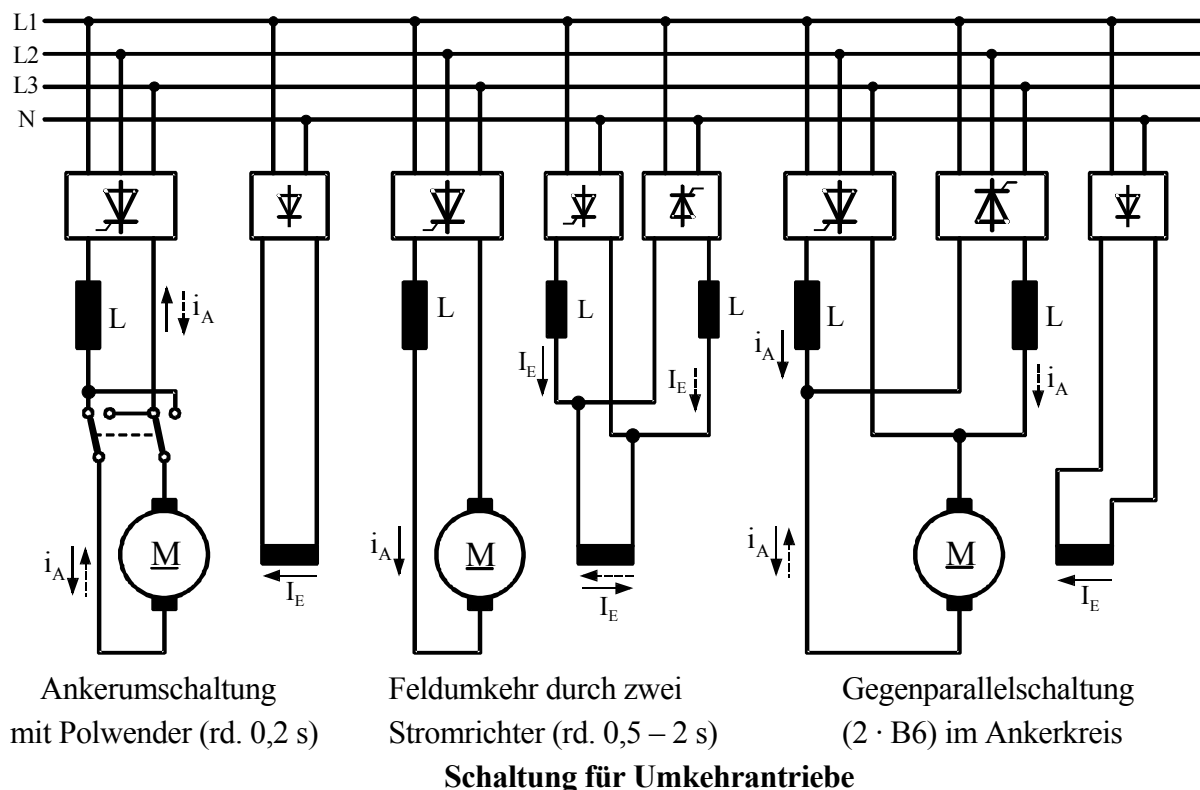
$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha \quad (4.30)$$

Für $\alpha > 90^\circ$ entstehen negative Gleichspannungs-Mittelwerte, was auf Grund der durch die Ventilwirkung vorgegebenen Stromrichtung eine Umkehr der Energierichtung bedeutet (Wechselrichterbetrieb). Mit Rücksicht auf einen einwandfreien Betrieb des Stromrichters beträgt die maximale Aussteuerung $\alpha \approx 150^\circ$.

Werden keine negativen Gleichspannungen benötigt, so kann man die Hälfte der Thyristoren durch Dioden ersetzen und erhält eine halbgesteuerte Schaltung. Die Abhängigkeit der Gleichspannung vom Steuerwinkel α berechnet sich hier nach:

$$U_d = \frac{1}{2} U_{d0} \cdot (1 + \cos \alpha) \quad (4.31)$$

Sind für einen Gleichstromantrieb beide Drehrichtungen vorgesehen, so muß eine Momentenumkehr und damit bei fester Erregung eine Umpolung des Ankerstromes möglich sein. Die Ankerstromrichtung kann beibehalten werden, wenn eine Änderung der Feldrichtung erfolgt.



Antriebe mit Gleichstromsteller

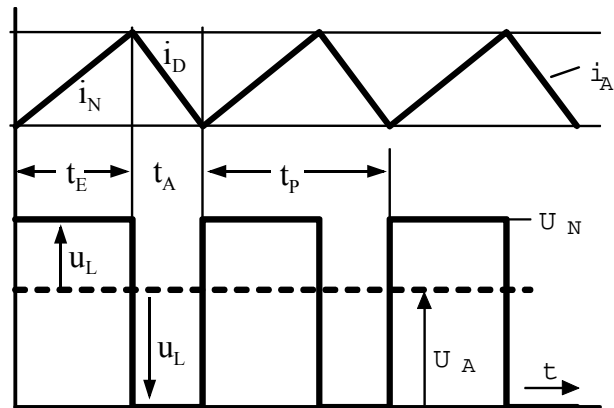
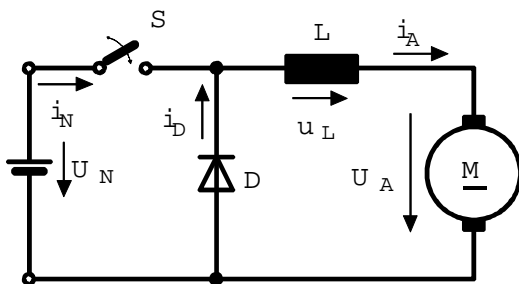
Während bei allen netzgeführten Stromrichterschaltungen die Bildung der variablen Ankerspannung durch Phasenanschnittsteuerung der Netzwechselfspannung erfolgt, arbeitet der Gleichstromsteller bereits mit einer konstanten Gleichspannung am Eingang (z.B. Batterie).

Beim Gleichstromsteller wird durch ein elektronisches Stellglied S die Netzspannung U_N mit möglichst hoher Frequenz f_p pulsformig auf den Antrieb geschaltet. Bei der häufig verwendeten Pulsbreitensteuerung ist dabei innerhalb der konstanten Periodendauer $t_p = 1/f_p$ die Einschaltzeit t_E einstellbar. In den Pausen fließt der Ankerstrom über einen Freilaufkreis mit der Diode D weiter.

S elektronischer Ein-Ausschalter

L Glättungsinduktivität

D Freilaufdiode



Prinzipschal

$$U_N = U_A + u_L \quad \text{mit} \quad u_L = L \cdot \frac{di_A}{dt} \quad (4.32)$$

Wenn das Stellglied S während der Zeit t_E geschlossen ist, nimmt der Antrieb mit $i_A = i_N$ Energie aus dem Netz auf. Die Spannungsgleichung des Kreises lautet:

In der Zeit t_A ist das Stellglied S geöffnet; der Strom $i_A = i_D$ klingt infolge der magnetischen Energie der Induktivität L nur langsam über den Freilaufkreis ab. Im Freilaufkreis gilt:

$$U_A + u_L = 0 \quad (4.33)$$

Der Ankerstrom schwankt um den Wert Δi , der um so kleiner ist, je größer die Pulsfrequenz f_p und die Induktivität L gewählt werden.

Als Mittelwert der Spannungsimpulse stellt sich die Ankerspannung U_A nach Gl. (4.34) ein.

$$U_A = U_N \cdot \frac{t_E}{t_p} = U_N \cdot \frac{t_E}{t_E + t_A} \quad (4.34)$$

Die Ankerspannung kann so stufenlos zwischen Null und U_N variiert werden.

Als Stellglied werden heute eingesetzt:

- Feldeffekttransistoren bei kleinen Leistungen mit hoher Schaltfrequenz ($f_p > 20$ kHz);
- IGBTs bei mittleren bis hohen Leistungen ($f_p < 20$ kHz);
- GTO-Thyristoren bei sehr hohen Leistungen ($f_p < 2$ kHz).

Durch Vertauschen der Anordnung von Freilaufdiode und Stellglied kann eine Rücklieferung von Energie in die Batterie beim Gleichstromsteller erfolgen.