

Inhaltsverzeichnis

4. Gleichstrommotoren.....	2
4.1 Prinzipieller Aufbau des Gleichstrommotors.....	2
4.2 Drehmomentbildung bei einer Leiterschleife	4
4.3 Induzierte Spannung in einer Leiterschleife.....	6
4.4 Funktion des Stromwenders (Kommutator)	7
4.5 Ausführung der Ankerwicklung	9
4.6 Probleme beim Stromwenden.....	12
4.7 Ankerrückwirkung.....	13
4.8 Induzierte Ankerspannung.....	17
4.9 Berechnung des Drehmomentes.....	19
4.10 Stationäres Betriebsverhalten des Gleichstrommotors.....	21
4.11 Betrieb mit konstantem Feld	25
4.12 Betrieb mit veränderlichem Feld.....	27
4.13 Reihenschlussmotor	28

4. Gleichstrommotoren

4.1 Prinzipieller Aufbau des Gleichstrommotors

Bild 4-1 zeigt schematisiert den Querschnitt eines Gleichstrommotors.

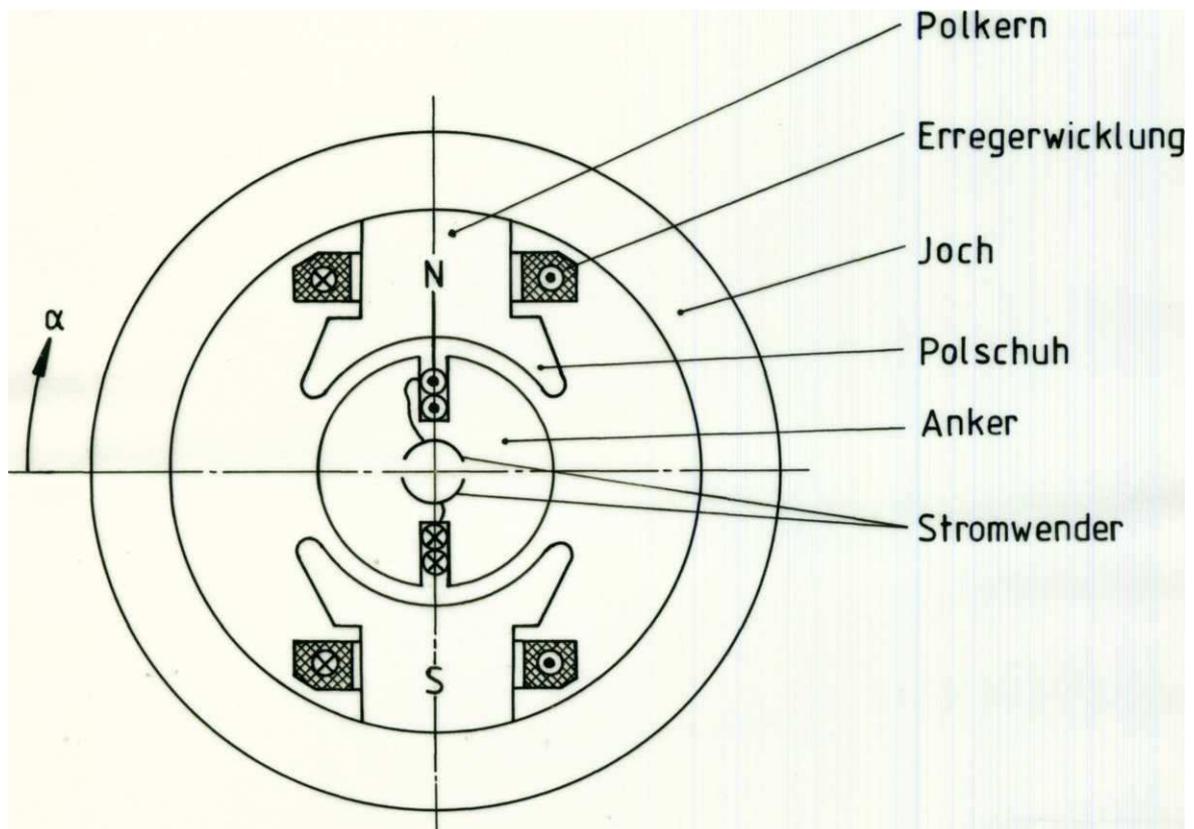


Bild 4-1: Prinzipieller Aufbau des Gleichstrommotors

Der feststehende Teil (Ständer) besitzt stark ausgeprägte Pole, auf denen gleichstromdurchflossene Erregerwicklungen (Feldwicklungen) sitzen. Sie erzeugen eine zeitlich konstante magnetische Flussdichte und damit einen konstanten Fluss. Die magnetischen Feldlinien verlaufen wegen der sehr hohen Permeabilität des Eisens gegenüber der Luft nahezu radial durch den Luftspalt. Den magnetischen Rückschluss bildet das Joch. Der rotierende Teil (Anker) trägt eine gleichmäßig über den Umfang verteilte, in Nuten eingebettete Wicklung. Die Enden der Leiterschleifen sind an Segmente des Stromwenders angeschlossen. Von dieser Wicklung ist im Bild 4-1 nur eine Spule mit zwei Windungen dargestellt.

Alle Teile des magnetischen Kreises der Maschine, außer dem Anker, bestehen aus massivem oder bei Stromrichterspeisung aus geblechtem Eisen. Der Anker ist in jedem Fall geblecht ausgeführt, da er bei Drehung einer zeitlich veränderlichen Magnetisierung ausgesetzt ist.

Die Wirkungsweise der Gleichstrommaschine lässt sich gut an der folgenden einfachen Prinzipdarstellung der Maschine mit einem Anker, der nur eine einzige Leiterschleife trägt (Bild 4-2), erläutern.

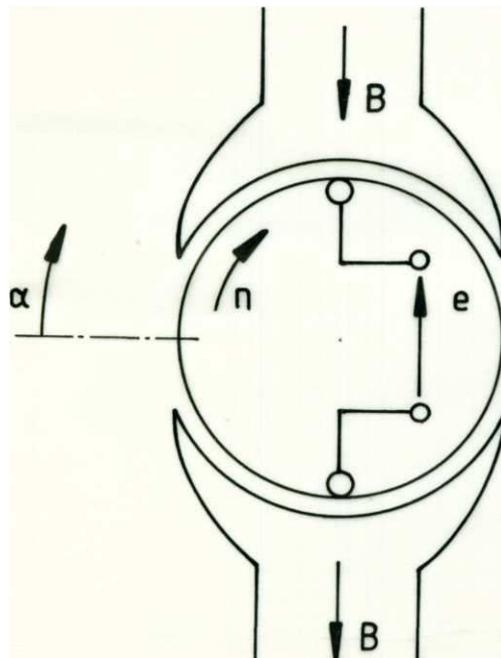


Bild 4-2: Anker mit einer Leiterschleife

4.2 Drehmomentbildung bei einer Leiterschleife

Befindet sich ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld, so wird auf ihn eine Kraft ausgeübt, die vom Strom und von der magnetischen Flussdichte abhängt:

$$F = i l B(\alpha) \quad (4.1)$$

Diese Gleichung gilt nur, wenn Strom und magnetische Flussdichte senkrecht zueinander gerichtet sind. Das ist bei elektrischen Maschinen wegen der Ausführung des magnetischen Kreises gegeben, wie im Kapitel 1 erläutert wurde. Zur Berechnung des Drehmomentes, das auf einen Anker mit nur einer einzigen Leiterschleife ausgeübt wird, gilt dann die folgende Beziehung:

$$d_M = 2i l B(\alpha)r \quad (4.2)$$

In Gleichung (4.2) ist r der wirksame Hebelarm eines Leiters. Bei konstanter Größe und Richtung des Stromes durch die Leiterschleife sind der Verlauf der magnetische Flussdichte und des Drehmomentes als Funktion des Umfangswinkels gleich. Bei der in Bild 4-2 dargestellten vereinfachten Maschine besitzt die magnetische Flussdichte B der Feldwicklung an der Ankeroberfläche den in Bild 4-3 dargestellten Verlauf in Abhängigkeit vom Umfangswinkel.

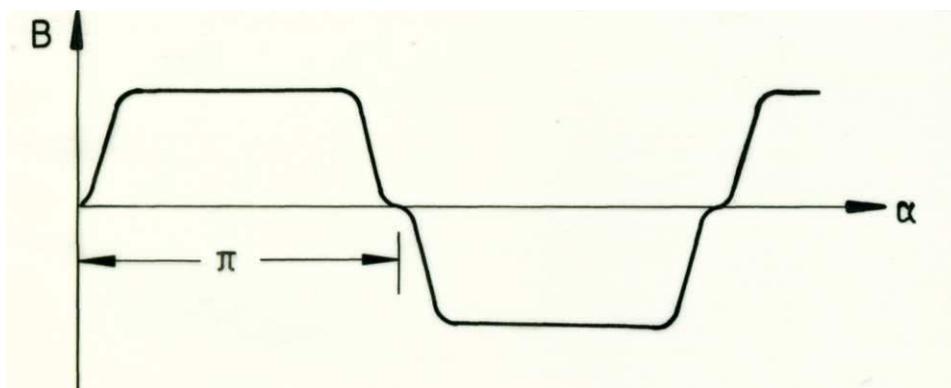


Bild 4-3: Verlauf der magnetische Flussdichte an der Ankeroberfläche

Um ein Drehmoment in nur einer Richtung zu erhalten, wie es für den Betrieb als Motor benötigt wird, und um die Maschine mit Gleichspannung betreiben zu können, müssen die Leiterschleifenanschlüsse umgepolt werden. Das geschieht, sobald die

Leiter der Spule in ein Gebiet kommen, in dem das Vorzeichen der magnetischen Flussdichte wechselt. Dazu dient der Stromwender oder Kommutator, dessen Wirkungsweise im folgenden erläutert wird.

Anstelle der einzelnen Leiterschleife verwendet man meistens Spulen, die aus der Reihenschaltung mehrerer Leiterschleifen bestehen. Die beiden Seiten einer solchen Ankerspule liegen in zwei Nuten, die um eine Polteilung gegeneinander versetzt sind. Da alle Leiterschleifen der Spule von demselben Strom durchflossen werden, ergibt sich das Gesamtdrehmoment, welches auf die Spule wirkt, aus der Summe der Drehmomente der einzelnen Leiterschleifen.

4.3 Induzierte Spannung in einer Leiterschleife

Der Anker drehe sich mit konstanter Drehzahl n ; dann bewegen sich die beiden Ankerleiter mit konstanter Geschwindigkeit $v = 2\pi rn$ in dem Magnetfeld $B(\alpha)$, das im Bild 4-3 dargestellt ist. In beiden Leitern werden dadurch Spannungen von der Größe $e = lvB(\alpha)$ induziert. Dabei ist l die Länge der Leiter innerhalb des Magnetfeldes. Da beide Leiter genau um eine Polteilung am Umfang versetzt sind, bewegen sie sich in Magnetfeldern unterschiedlicher Polarität. Die induzierten Spannungen sind daher entgegengesetzt gleich und addieren sich zur resultierenden Spannung

$$e = 2lvB(\alpha).$$

Der Verlauf der Spannung in der Leiterschleife in Abhängigkeit vom Umfangswinkel α ist im Bild 4-4 dargestellt.

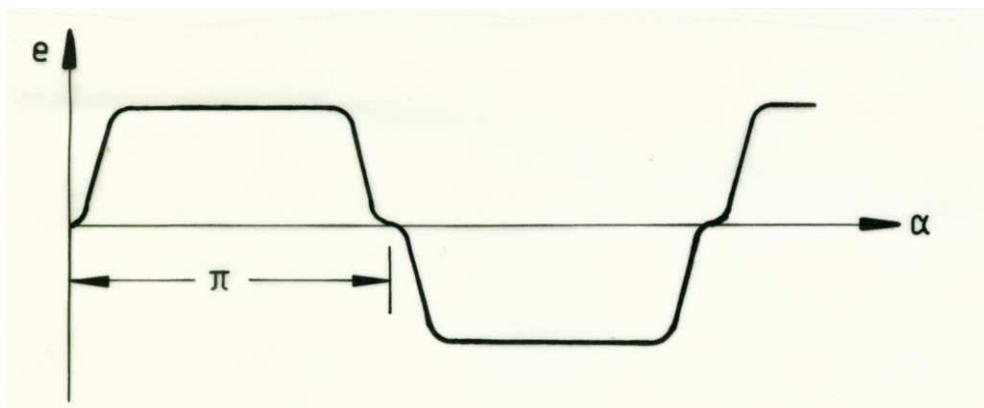


Bild 4-4: Induzierte Spannung in einer Leiterschleife

Für eine Spule, die aus der Reihenschaltung mehrerer Leiterschleifen besteht, ergibt sich die induzierte Spannung aus der Summe der in den einzelnen Leiterschleifen induzierten Spannungen. Der prinzipielle Verlauf der induzierten Spannung, wie er im Bild 4-4 dargestellt ist, ändert sich nicht.

4.4 Funktion des Stromwenders (Kommutator)

Wir betrachten zur Erläuterung der Funktion des Stromwenders wieder einen Anker, der nur eine Leiterschleife trägt. In diesem Fall besteht der Kommutator aus zwei Schleifringhälften, an die die Enden der Leiterschleife geführt sind (s. Bild 4-5).

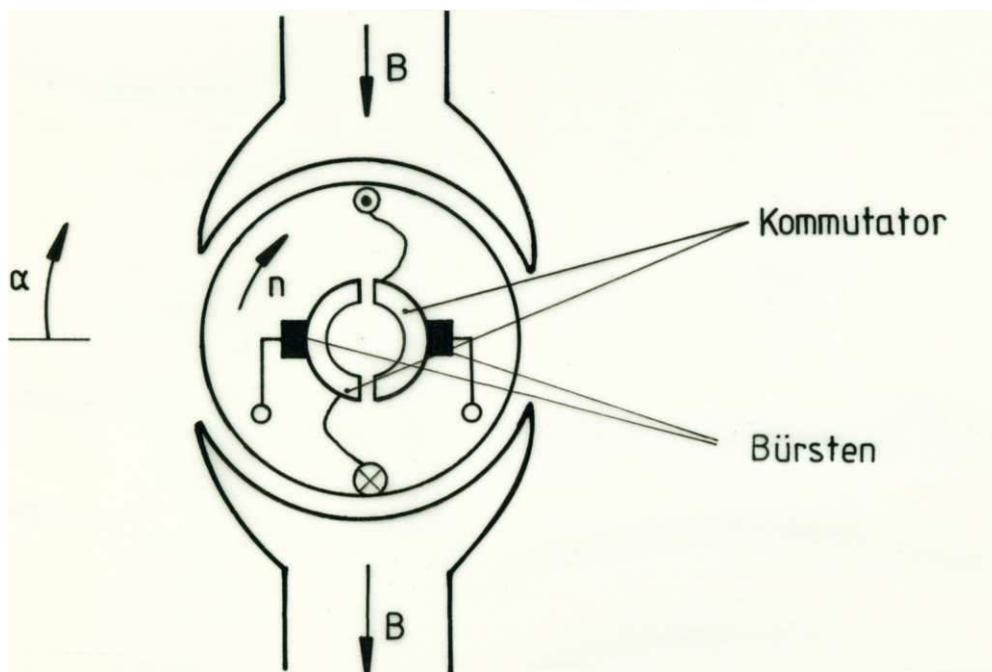


Bild 4-5: Funktion des Stromwenders

Treibt eine äußere Gleichspannungsquelle einen Strom über den Kommutator durch die Leiterschleife, so ändert dieser jeweils beim Umpolen der Klemmen in der Polfläche seine Richtung. Damit erreicht man, dass das Drehmoment seine Richtung beibehält (s. Bild 4-6).

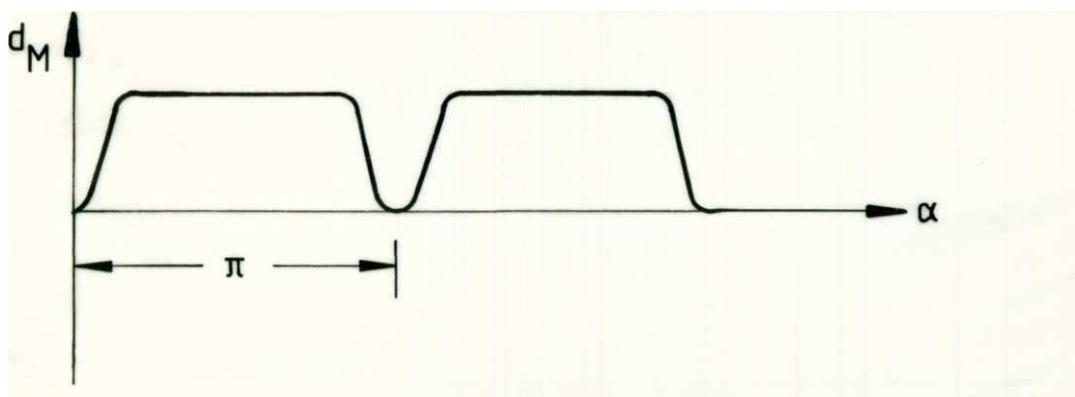


Bild 4-6: Drehmomentverlauf einer Leiterschleife

Wie aus Bild 4-5 zu entnehmen ist, wird die induzierte Spannung an den Anschlüssen der Leiterschleife ebenfalls umgepolt, wenn sich die Leiter in der feldfreien Zone (neutrale Zone) in der Pollücke befinden. Dadurch erscheint an den Bürsten eine gleichgerichtete Spannung.

4.5 Ausführung der Ankerwicklung

Das bisher betrachtete einfache Modell der Gleichstrommaschine hat noch erhebliche Nachteile. Das erzielbare Drehmoment wird relativ gering sein, da man den Ankerstrom aus thermischen Gründen nicht beliebig groß machen kann. Außerdem kann man den Leiterquerschnitt wegen des nur begrenzt zur Verfügung stehenden Platzes nicht beliebig vergrößern. Ein weiterer Nachteil des einfachen Maschinenmodells ist, dass das Drehmoment nicht konstant ist sondern vom Drehwinkel abhängt (siehe Bild 4-6). Man ist daher bestrebt, den Anker besser auszunutzen und außerdem die Gleichförmigkeit des Drehmomentes zu verbessern. Eine bessere Ausnutzung des Ankers erreicht man, indem man die Leiter über den Umfang des Ankers gleichmäßig verteilt. Die Überlagerung der Drehmomentanteile der einzelnen Leiter verbessert außerdem die Gleichförmigkeit des gesamten, auf den Anker wirkenden Drehmomentes. Zur Erzielung eines gleichgerichteten Drehmomentes, dessen Betrag möglichst groß sein soll, muss der Strom in den Leitern im Bereich eines Pols überall die gleiche Richtung haben. Man bezeichnet die hier beschriebene Wicklung, die den ganzen Anker umschließt, als Trommelwicklung (s. Bild 4-7).

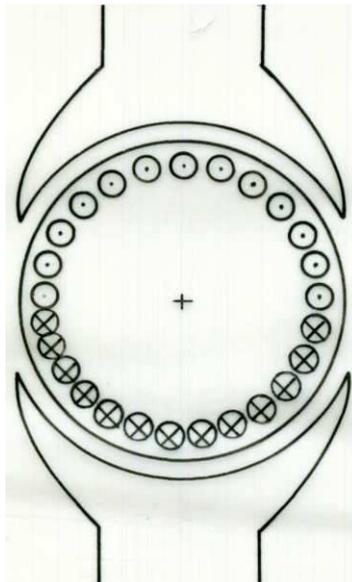


Bild 4-7: "Optimale" Ankerstromverteilung einer zwei-poligen Maschine (Trommelwicklung)

Wie schon im vorangegangenen Kapitel erwähnt wurde, werden die Ankerleiter über die Stirnverbindungen zu Spulen zusammengeschaltet, wobei die Weite einer Spule einer Polteilung entspricht. Bei einer zweipoligen Maschine wird der Ankerstrom über zwei Bürsten allen Leitern zugeführt. Deshalb muss ein Teil der Spulen in Reihe geschaltet werden, wie man dem vereinfachten Wickelschema im Bild 4-8 entnehmen kann. Außerdem ergeben sich für den gesamten Ankerstrom innerhalb der Maschine mehrere parallele Stromzweige (im vorliegenden Falle zwei).

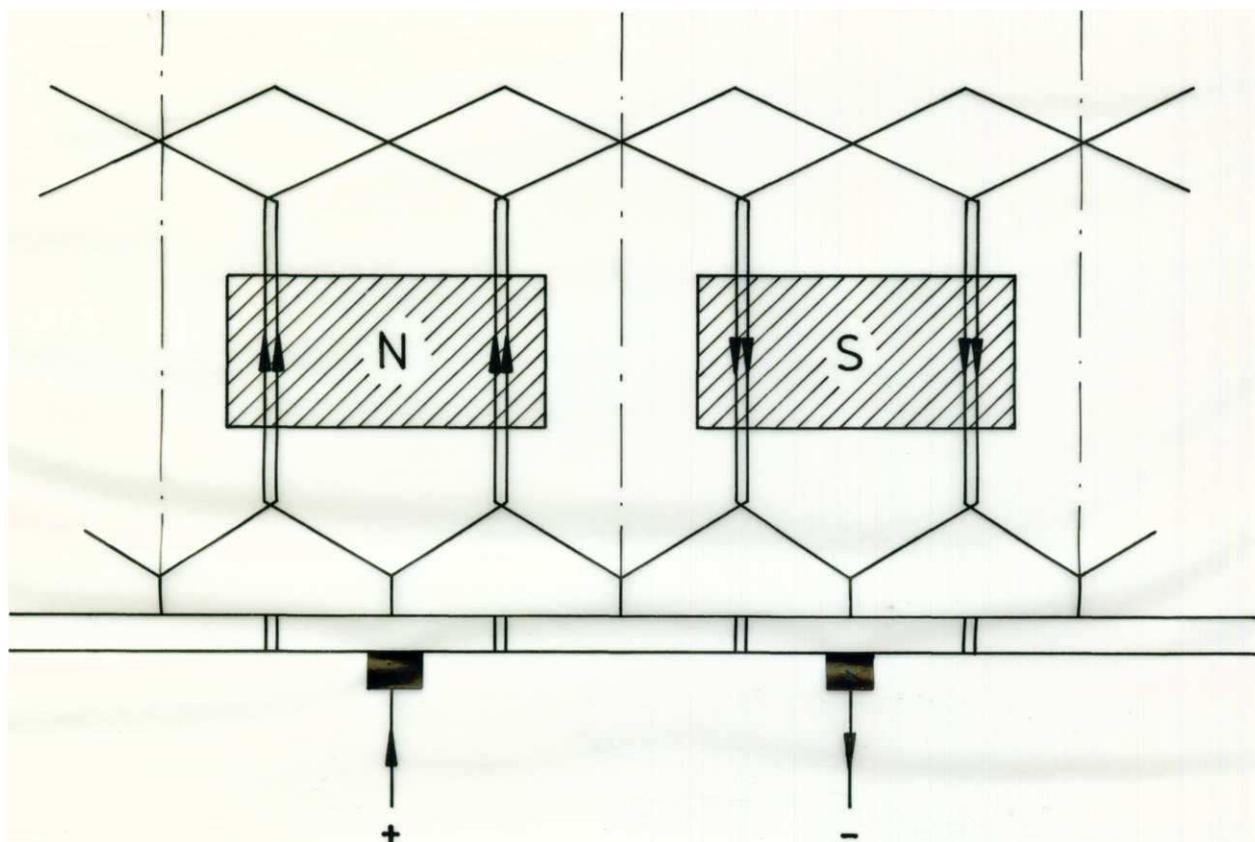


Bild 4-8: Schematische Darstellung der Wicklung einer zweipoligen Maschine (stark vereinfacht)

Wie in der stark vereinfachten Darstellung einer Wicklung im Bild 4-8 zu sehen ist, ist es üblich, den Ankerumfang zweifach mit Spulen zu belegen, so dass in jeder Nut zwei Spulenseiten von verschiedenen Ankerspulen liegen. Eine praktisch ausgeführte Wicklung enthält gegenüber der im Bild 4-8 dargestellten Wicklung wesentlich mehr Nuten pro Polteilung. Bei der sich daraus ergebenden größeren Anzahl von Spulen und der geometrischen Anordnung muss viel häufiger ein Umschaltvorgang erfolgen. Der Kollektor wird daher feiner unterteilt und enthält eine größere Anzahl von Lamellen. Für die Schaltung der Spulen zu einer geschlossenen Wicklung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Welche Art der Wicklung verwendet

wird, hängt unter anderem von der Größe und dem Verwendungszweck der Maschine ab. Bild 4-9 zeigt exemplarisch ein vollständiges Wickelschema einer vierpoligen Maschine.

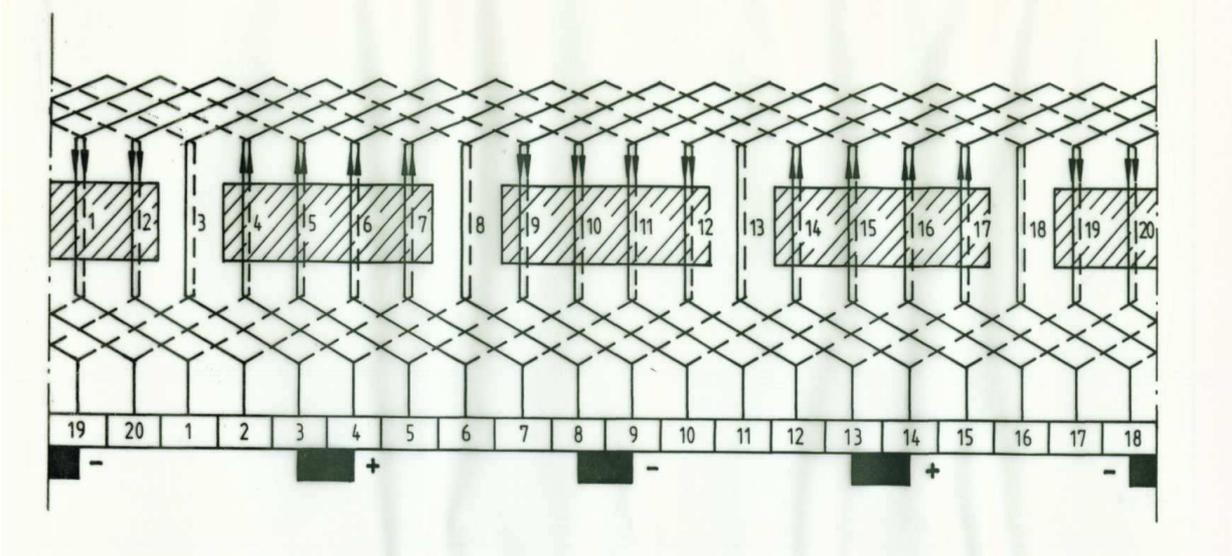


Bild 4-9: Wicklung einer 4-poligen Maschine mit 20 Nuten und 20 Spulen

4.6 Probleme beim Stromwenden

Die Stromwendung in der Polücke bedeutet eine Umkehrung der Stromrichtung innerhalb einer Ankerspule. Die Zeit für den Stromrichtungswechsel hängt von der Drehzahl ab und wird mit steigender Drehzahl kürzer. Da die kommutierende Ankerspule eine Selbstinduktivität besitzt, entsteht eine Stromwendespannung, die der Stromänderung entgegenwirkt. Diese Stromwendespannung wird mit steigender Drehzahl immer größer. Mit steigendem Ankerstrom und steigender Drehzahl wächst die Gefahr einer Funkenbildung am Kollektor (Bürstenfeuer), wodurch die Bürsten stark abgenutzt werden und bei stärkerer Ausbildung auch die Oberfläche des Kollektors angegriffen werden kann.

4.7 Ankerrückwirkung

Außer dem Erregerfeld tritt in der Maschine noch ein zweites magnetisches Feld auf, das durch die stromdurchflossene Ankerwicklung bedingt ist. Dieses Feld nennt man Ankerquerfeld, da die Durchflutungsachse des ankerseitig aufgebauten Feldes senkrecht auf der Achse des Erregerfeldes steht. Der Verlauf des Ankerfeldes ist im Bild 4-10 dargestellt. Im Bereich der Pollücke ergibt sich wegen des in diesem Bereich großen Luftspaltes eine geringe Flussdichte des Ankerfeldes. Das Ankerfeld und das Erregerfeld überlagern sich zu einem resultierenden Feld, dem Luftspaltfeld. Den Einfluss des Ankerstroms auf das Luftspaltfeld bezeichnet man als Ankerrückwirkung. Bild 4-10 zeigt die Entstehung des Luftspaltfeldes.

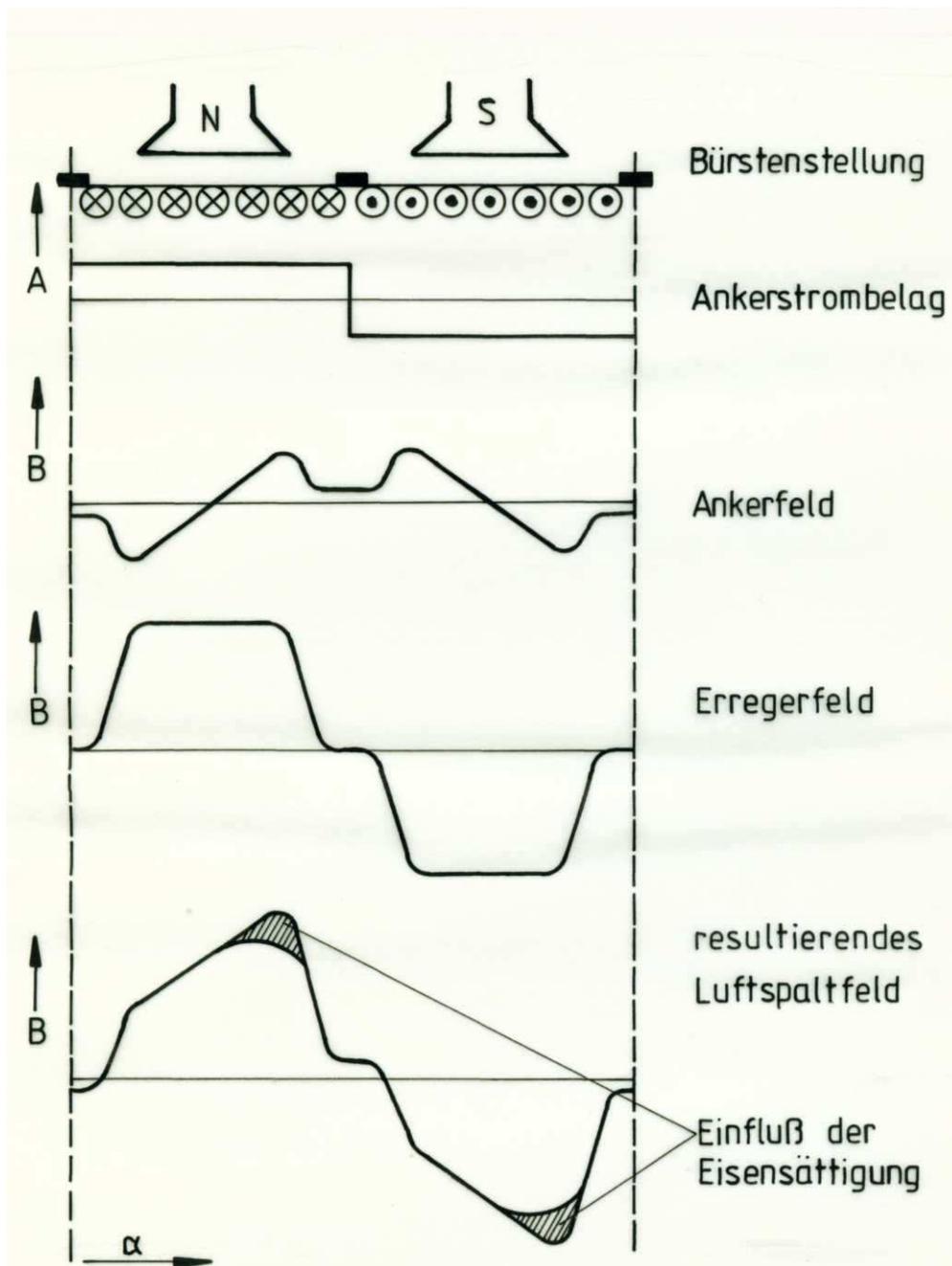


Bild 4-10: Einfluss der Ankerrückwirkung

Man erkennt, dass die neutrale Zone der Maschine bei Belastung nicht mehr feldfrei ist. In den Leitern, die sich in der neutralen Zone befinden, wird daher bei Belastung eine Spannung induziert, welche die Kommutierung des Stroms behindert. Um eine gute Kommutierung zu erreichen, ist es jedoch günstig, wenn die Leiter sich in einem Feld befinden, das dem Ankerfeld entgegen gerichtet ist. Um das zu erreichen, könnte man beispielsweise die Bürsten soweit verschieben, bis die kommutierende Spule sich in diesem Feld befindet. Die Stellung der Bürsten hängt dann von der Belastung der Maschine ab. Sie muss bei Änderung der Belastung korrigiert werden.

Diesen Nachteil vermeidet man, wenn man die Maschine mit zusätzlichen Hilfspolen in der neutralen Zone ausrüstet. Diese sogenannten "Wendepole" tragen eine Wicklung, die vom Ankerstrom durchflossen ist und so ausgelegt wird, dass sie das Ankerfeld aufhebt und darüber hinaus ein die Kommutierung unterstützendes Feld erzeugt.

Eine weitere unerwünschte Folge der Ankerrückwirkung besteht darin, dass die maximale Spannung zwischen zwei Lamellen des Kommutators bei Belastung ansteigt. Dies hat seine Ursache in der Verzerrung des Feldes unter den Polschuhen. Dadurch steigt der Maximalwert der magnetischen Flussdichte an, wie man im Bild 4-10 erkennen kann. Aus früheren Überlegungen wissen wir, dass die in einer Leiterschleife induzierte Spannung proportional zur Flussdichte ist. Bei zu großer Lamellenspannung tritt ein Überschlag zwischen den Lamellen auf, der sich über alle Lamellen ausbreiten kann.

Die Verzerrung des Feldes unter dem Polschuh hat weiterhin eine Schwächung des Polflusses zur Folge, da die Sättigung des magnetischen Kreises verhindert, dass die magnetische Flussdichte den Maximalwert erreicht, der sich durch Überlagerung der beiden Felder ergibt (s. Bild 4-10). Eine Verringerung des Polflusses hat eine Einbuße an Drehmoment zur Folge, da das von der Maschine entwickelte Drehmoment proportional zum Polfluss ist, wie im folgenden gezeigt wird. Den Einfluss der Ankerrückwirkung im Bereich der Polschuhe kann man durch Anbringen einer Kompensationswicklung am Polschuh der Gleichstrommaschine aufheben. Die Leiter der Kompensationswicklung werden ebenfalls vom Ankerstrom durchflossen. Für Maschinen, die mit Wendepolen und Kompensationswicklungen ausgerüstet sind (s. Bild 4-11), ergibt sich dann ein Luftspaltfeld, das auch bei Belastung des Motors gleich dem Erregerfeld ist.

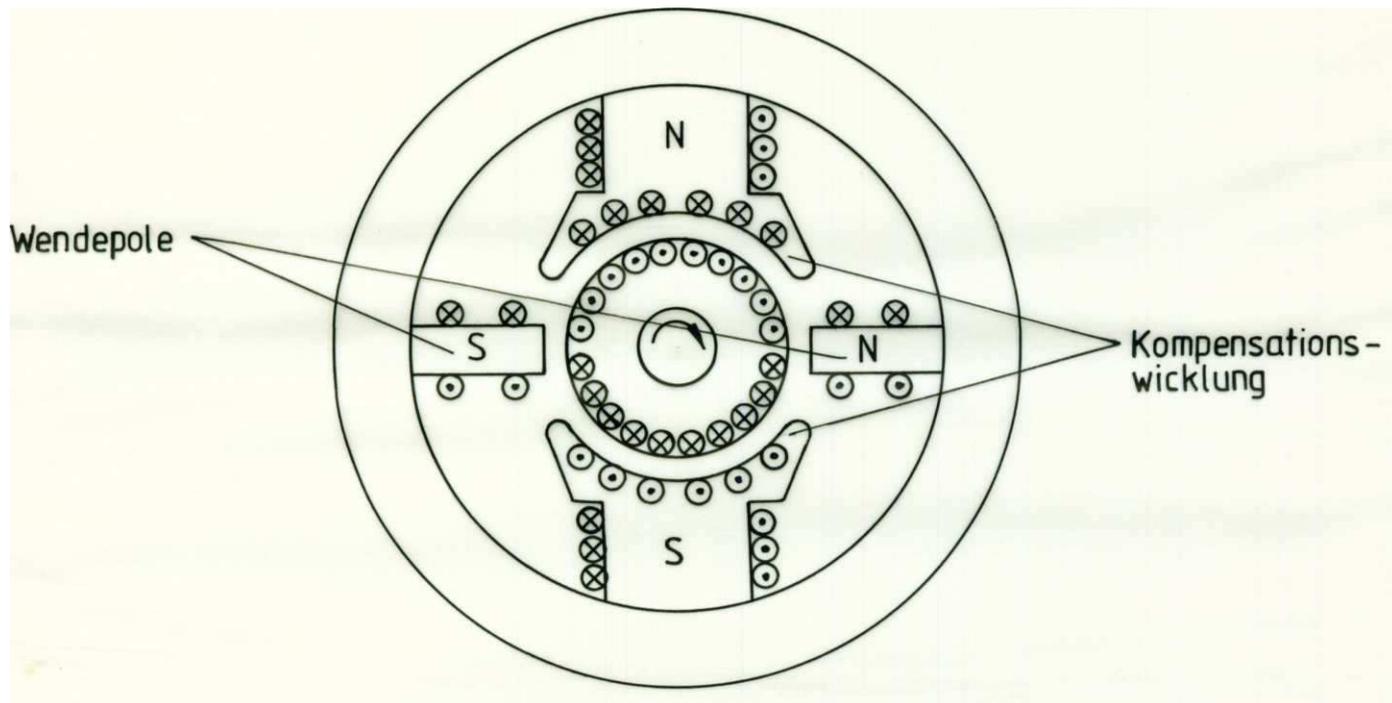


Bild 4-11: Gleichstrommaschine mit Wendepolen und Kompensationswicklung

4.8 Induzierte Ankerspannung

Wir betrachten im folgenden eine zweipolige Maschine. Am Umfang des Ankers seien z Leiterstäbe gleichmäßig verteilt. Bei einer zweipoligen Maschine sind zwei einander parallele Stromzweige zwischen den beiden Bürsten vorhanden, die jeweils aus der Reihenschaltung einer Hälfte der Ankerleiter bestehen. Für Maschinen mit mehr als zwei Polen ändert sich der prinzipielle Weg der Herleitung nicht. In einem Winkelelement $d\alpha$ liegen

$$\frac{z d\alpha}{2\pi} \quad (4.3)$$

Leiter am Ankerumfang. Wir ermitteln zunächst die im Bereich einer Polteilung induzierte Summenspannung, die sich als Summe aller Leiterspannungen ergibt. Bei sehr vielen am Umfang verteilten Leitern erhalten wir:

$$e_{\Sigma} = \frac{z}{2\pi} v l \int_0^{\pi} B(\alpha) d\alpha \quad (4.5)$$

Ersetzt man die Umfangsgeschwindigkeit v durch

$$v = \pi D n, \quad (4.6)$$

mit D = Durchmesser und n = Drehzahl des Ankers, so ergibt sich:

$$e_{\Sigma} = \frac{z}{2} l D n \int_0^{\pi} B(\alpha) d\alpha \quad (4.7)$$

Durch eine einfache Umformung erhalten wir:

$$e_{\Sigma} = z n \int_0^{\pi} B(\alpha) l \frac{D}{2} d\alpha \quad (4.8)$$

Das obige Integral der magnetischen Flussdichte über die Ankeroberfläche im Bereich eines Pols der Maschine stellt den magnetischen Fluss pro Pol dar und soll mit Φ bezeichnet werden. Bei der Bildung der gesamten Ankerspannung e_A muss durch die Zahl der parallelen Zweige dividiert und mit der Anzahl der Pole multipliziert

werden. Damit ergibt sich für die hier betrachtete zweipolige Maschine mit zwei parallelen Ankerzweigen:

$$e_A = zn\Phi \quad (4.9)$$

Bei Maschinen mit mehr Polen und anderer Wicklungsform bleibt der multiplikative Zusammenhang zwischen der Drehzahl und dem Fluss für die induzierte Ankerspannung ebenfalls gültig. Allgemein gilt daher für die induzierte Ankerspannung die Gleichung:

$$e_A = K_1 n\Phi \quad (4.10)$$

In der Konstanten sind dabei die maschinenspezifischen Parameter wie z.B. die Anzahl der Pole, zusammengefasst.

4.9 Berechnung des Drehmomentes

Zur Berechnung des Drehmomentes gehen wir nicht von den Strömen in den einzelnen Leiterstäben aus, sondern wir verwenden den Strombelag des Ankers. Unter dem Strombelag versteht man die Summe der Ströme in den einzelnen Leitern je Längeneinheit des Ankerumfangs.

Gehen wir wie im vorangegangenen Kapitel von zwei parallelen Zweigen der Ankerwicklung aus, so fließt durch jeden Wicklungszweig der halbe Ankerstrom i_A . Da die Leiterstäbe eines Zweiges in Reihe geschaltet sind, fließt auch durch jeden Leiterstab der Strom $i_A/2$. Damit ergibt sich für den Ankerstrombelag:

$$A = \frac{z i_A}{2\pi D} \quad (4.11)$$

Der in einem Bogenelement $\frac{D}{2}d\alpha$ fließende Strom di errechnet sich aus dem Strombelag A folgendermaßen:

$$di = A \frac{D}{2} d\alpha \quad (4.12)$$

Für die Kraft, die auf einen vom Strom $i_A/2$ durchflossenen Leiter in einem Magnetfeld mit der Induktion $B(\alpha)$ ausgeübt wird, hatten wir die folgende Gleichung hergeleitet:

$$F = B(\alpha) l \frac{i_A}{2} \quad (4.13)$$

Damit ergibt sich die Kraft, die auf ein Bogenelement ausgeübt wird, zu:

$$dF = B(\alpha) l A \frac{D}{2} d\alpha \quad (4.14)$$

Das Gesamtdrehmoment des Motors erhält man durch Integration von dF über eine Polteilung und Multiplikation mit dem Hebelarm $D/2$ und der Anzahl der Pole. Wir gehen davon aus, dass der Strombelag innerhalb einer Polteilung konstant ist. Damit erhält man für das Drehmoment die folgende Beziehung:

$$d_M = 2\left(\frac{D}{2}\right)^2 l A \int_0^\pi B(\alpha) d\alpha \quad (4.15)$$

Wir formen die Gleichung (4.15) so um, dass wir wieder das Flächenintegral über die magnetische Induktion innerhalb einer Polteilung erhalten (s. auch Gleichung (4.8)):

$$d_M = DA \int_0^\pi B(\alpha) l \frac{D}{2} d\alpha \quad (4.16)$$

Das Flächenintegral über die magnetische Flussdichte ersetzen wir durch den Fluss Φ . Damit folgt:

$$d_M = AD\Phi \quad (4.17)$$

Ersetzt man den Strombelag A durch den Ankerstrom i_A , so ergibt sich die folgende Gleichung für das Drehmoment:

$$d_M = \frac{z}{2\pi} i_A \Phi$$

Für das Drehmoment der Gleichstrommaschine bleibt der multiplikative Zusammenhang zwischen dem Ankerstrom und dem Fluss auch für Maschinen mit mehr Polen und anderer Wicklungsform erhalten. Allgemein gilt daher:

$$d_M = K_2 i_A \Phi \quad (4.18)$$

Die Konstante beinhaltet dabei die unterschiedlichen Maschinenparameter.

4.10 Stationäres Betriebsverhalten des Gleichstrommotors

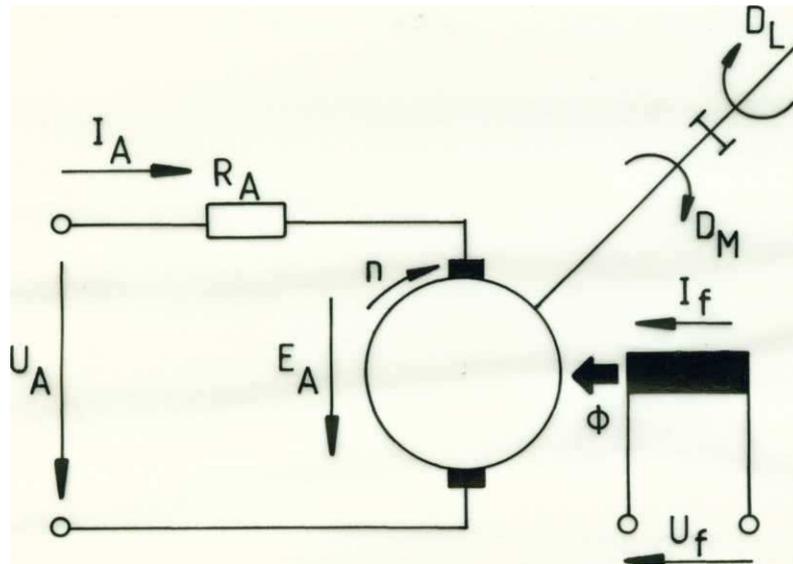


Bild 4-12: Prinzipschaltbild des Gleichstrommotors

Im stationären Betriebsfall ist die Drehzahl des Motors konstant. Das an der Welle angreifende Lastdrehmoment ist in diesem Fall gleich dem Drehmoment des Gleichstrommotors. Bild 4-12 zeigt den Prinzipschaltplan der Gleichstrommaschine für den stationären Betrieb. Im Ankerwiderstand R_A sind sämtliche ohmschen Widerstände des Ankerkreises zusammengefasst. R_A enthält zum Beispiel den ohmschen Widerstand der Ankerwicklung und die Übergangswiderstände der Bürsten. Ist die Maschine mit Wendepolen und Kompensationswicklung ausgerüstet, so müssen die ohmschen Widerstände dieser Wicklungen ebenfalls im Ankerwiderstand berücksichtigt werden.

Wir können das stationäre Betriebsverhalten durch die im folgenden hergeleiteten Gleichungen beschreiben. Aus dem Prinzipschaltbild entnehmen wir den Zusammenhang zwischen der Ankerspannung U_A , der induzierten Ankerspannung und dem Spannungsabfall am Ankerwiderstand:

$$U_A = R_A I_A + E_A \quad (4.19)$$

Für die induzierte Ankerspannung hatten wir die folgende Beziehung gefunden (s. Gleichung 4.10):

$$E_A = K_1 \Phi n \quad (4.20)$$

Eine Leistungsbilanz liefert die folgende Beziehung:

$$U_A I_A = R_A I_A^2 + E_A I_A \quad (4.21)$$

Dabei ist der Ausdruck $U_A I_A$ die aus dem Netz aufgenommene Leistung der Gleichstrommaschine. Diese Leistung teilt sich in die ohmschen Verluste in den vom Ankerstrom durchflossenen Wicklungen $R_A I_A^2$ und die innere Leistung $E_A I_A$ auf. Nimmt man an, dass sonst keine Verluste in der Maschine auftreten, so ist die innere Leistung gleich der an der Welle abgegebenen mechanischen Leistung. Mit dieser Annahme ergibt sich die folgende Beziehung für die mechanische Leistung des Motors:

$$D_M 2\pi n = E_A I_A \quad (4.22)$$

Wir ersetzen in dieser Gleichung die induzierte Ankerspannung E_A durch die Gleichung (4.20) und lösen nach dem Drehmoment auf:

$$D_M = \frac{K_1 \Phi n I_A}{2\pi n}$$

Nach einer einfachen Umstellung erhält man die folgende Beziehung für das Drehmoment:

$$D_M = K_2 I_A \Phi \quad (4.23)$$

mit:

$$K_2 = \frac{K_1}{2\pi} \quad (4.24)$$

Die Herleitung des Drehmomentes mit Hilfe der Leistungsbilanz liefert prinzipiell das gleiche Ergebnis wie die Berechnung aus den elektrodynamischen Kräften, wie der Vergleich der Gleichungen 4.23 und 4.18 zeigt.

Vernachlässigt man in erster Näherung die Sättigung des magnetischen Kreises, so gilt der folgende Zusammenhang zwischen dem Fluss in der Gleichstrommaschine und dem Erregerstrom:

$$\Phi = K_3 I_F \quad (4.25)$$

Wie schon erläutert wurde, stellt sich ein stationärer Betrieb ein, wenn das Lastdrehmoment gleich dem von der Maschine entwickelten Drehmoment ist. Im Leerlauf sind das Last- und das Motordrehmoment gleich Null. Da das Drehmoment proportional zum Ankerstrom I_A ist, muss im Fall des leerlaufenden Motors der Ankerstrom ebenfalls Null sein. Außerdem ist im Leerlauf die Ankerspannung U_A , gleich der induzierten Ankerspannung E_A , da der Spannungsabfall am Ankerwiderstand Null wird. Für den Leerlauf gelten also die folgenden Gleichungen:

$$D_M = D_L = 0$$

$$I_A = 0$$

$$E_A = U_A$$

Da der Fall der völlig entlasteten Maschine in der Praxis nicht auftritt, bezeichnet man diesen Betriebsfall als idealen Leerlauf. Die für den stationären Betrieb der Gleichstrommaschine geltenden Beziehungen lauten daher:

$$D_M = D_L \quad (4.26)$$

$$n = \text{konst.}$$

$$U_A = R_A I_A + E_A \quad (4.27)$$

$$E_A = K_1 n \Phi \quad (4.28)$$

$$D_M = K_2 I_A \Phi \quad (4.29)$$

$$\Phi = f(I_F) \quad (4.30)$$

Bei vernachlässigter Sättigung gilt:

$$\Phi = K_3 I_F \quad (4.31)$$

Aus den obigen Gleichungen entnehmen wir, dass eine Umkehrung der Drehmomentenrichtung durch Umkehrung der Richtung des Ankerstroms I_A oder durch Umkehrung des magnetischen Flusses Φ möglich ist. Wird die Richtung des magnetischen Feldes umgekehrt, so muss sich die Drehrichtung ebenfalls ändern damit die Gleichgewichtsbedingung zwischen der Ankerspannung U_A und der induzierten Ankerspannung E_A erhalten bleibt.

Für die Beurteilung des Betriebsverhaltens der Gleichstrommaschine ist der Zusammenhang zwischen der Drehzahl und dem Drehmoment von Bedeutung. Wir erhalten eine Gleichung, die diesen Zusammenhang beschreibt, wenn wir in der Gleichung (4.27) die induzierte Ankerspannung durch die Drehzahl und den Ankerstrom durch das Drehmoment ersetzen:

$$U_A = \frac{R_A D_M}{K_2 \Phi} + K_1 n \Phi \quad (4.32)$$

Wir lösen diese Beziehung nach der Drehzahl n auf und erhalten die Gleichung der Drehzahl-Drehmomentkennlinie:

$$n = \frac{U_A}{K_1 \Phi} - \frac{R_A}{K_1 K_2 \Phi^2} D_M \quad (4.33)$$

Wir vernachlässigen die Sättigung und ersetzen den Fluss Φ durch den Erregerstrom I_F . Außerdem fassen wir die Konstanten zusammen und erhalten:

$$n = \frac{U_A}{K_4 I_F} - \frac{R_A}{K_5 I_F^2} D_M \quad (4.34)$$

Die Leerlaufdrehzahl ergibt sich aus dieser Gleichung, indem man das Drehmoment Null setzt:

$$n_0 = \frac{U_A}{K_4 I_F} \quad (4.35)$$

Sie ist also proportional zur Ankerspannung U_A und umgekehrt proportional zum Erregerstrom I_F .

4.11 Betrieb mit konstantem Feld

In den meisten Einsatzfällen wird die Gleichstrommaschine mit konstantem Erregerfeld betrieben. Für diesen Fall vereinfacht sich die Gleichung der Drehzahl-Drehmomentkennlinie. Wir fassen die Konstante K_4 und den Erregerstrom zu einer neuen Konstante zusammen. Damit ergibt sich die folgende Gleichung der Kennlinie bei konstantem Feld:

$$n = c_1 U_A - c_2 D_M \quad (4.36)$$

Es handelt sich hierbei um eine Geradengleichung. Im Bild 4-13 sind verschiedene Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien dargestellt. Parameter ist die Ankerspannung. Wie man sieht, ist der Einfluss des Drehmomentes auf die Kennlinie relativ gering. Eine Veränderung der Ankerspannung beeinflusst die Leerlaufdrehzahl der Gleichstrommaschine (s. Gleichung 4.35), wodurch sich eine Parallelverschiebung der Kennlinien ergibt.

$$n_0 = c_1 U_A \quad (4.37)$$

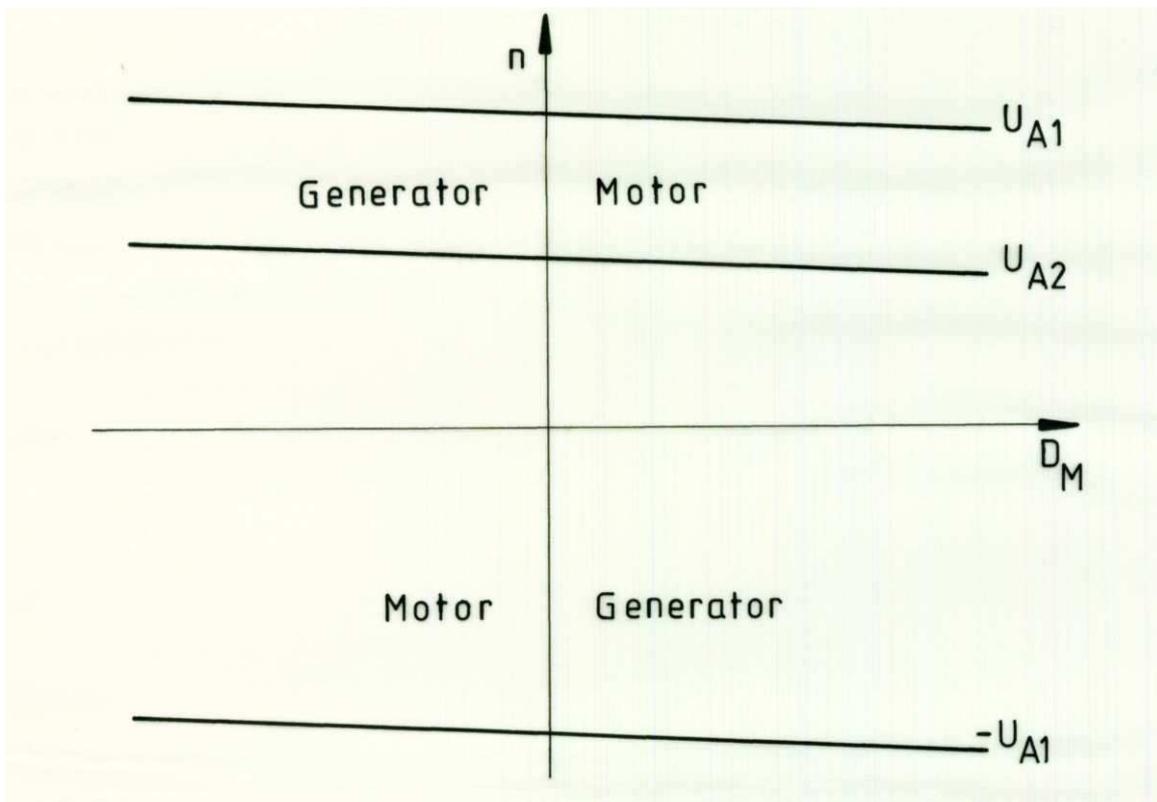


Bild 4-13: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie

Die Steigung der Geraden, d.h. der Drehzahlabfall mit steigendem Lastdrehmoment, wird durch die Größe des Ankerwiderstandes R_A bestimmt.

$$c_2 = \frac{R_A}{K_5 I_F^2} \quad (4.38)$$

Durch Zuschalten von Zusatzwiderständen in den Ankerkreis hat man also die Möglichkeit, den Drehzahlabfall in Abhängigkeit vom Lastdrehmoment zu erhöhen und damit die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie "weicher" zu machen. Wird durch ein antreibendes äußeres Drehmoment die Drehzahl über die Leerlaufdrehzahl erhöht, so kehrt der Ankerstrom seine Richtung um, da jetzt die induzierte Ankerspannung E_A größer als die von außen angelegte Spannung U_A ist. Das Drehmoment der Maschine ist proportional zum Ankerstrom I_A und kehrt daher ebenfalls seine Richtung um. Bei gleicher Drehrichtung wird in diesem Fall Energie in das Netz zurückgespeist. Die Gleichstrommaschine arbeitet als Generator. Wird die Ankerspannung U_A negativ, so kehrt die Drehrichtung das Vorzeichen um. Bei positivem Drehmoment befindet sich die Maschine jetzt im generatorischen Betrieb. Im Bild 4-13 sind die hier beschriebenen Betriebsfälle der Gleichstrommaschine dargestellt. Steht eine Ankerspannungsquelle zur Verfügung, die beide Spannungspolaritäten und beide Stromrichtungen ermöglicht, so kann die Gleichstrommaschine in allen vier Quadranten des Drehzahl-Drehmomentdiagramms betrieben werden.

4.12 Betrieb mit veränderlichem Feld

Für die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie hatten wir die folgende Beziehung gefunden (s. Gleichung 4.34):

$$n = \frac{U_A}{K_4 I_F} - \frac{R_A}{K_5 I_F^2} D_M$$

Verändert man das Feld der Maschine durch Verstellen des Erregerstroms I_F , so ändert sich der prinzipielle Verlauf der Kennlinie nicht. Ein Verstellen des Erregerstroms hat zwei Auswirkungen auf die Kennlinien. Eine Verringerung hat eine Erhöhung der Leerlaufdrehzahl zur Folge, wie man an Gleichung (4.35) erkennen kann. Die physikalische Ursache liegt darin, dass die induzierte Ankerspannung E_A proportional zum Produkt aus Erregerfluss und Drehzahl ist. Im Leerlauf müssen die Ankerspannung U_A und die induzierte Spannung E_A gleich sein. Wird nun die Erregung verringert, so muss die Drehzahl ansteigen, damit das Produkt aus beiden Größen konstant bleibt. Weiterhin beeinflusst der Erregerstrom I_F die Steigung der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien. Wie man der Gleichung (4.34) für die Kennlinien entnehmen kann, ist die Steigung umgekehrt proportional zum Quadrat des Erregerstroms. Eine Schwächung des Erregerfeldes hat also einen höheren Drehzahlabfall bei gleicher Belastung zur Folge. Die quadratische Abhängigkeit des Drehzahlabfalls vom Erregerstrom I_F ist physikalisch damit zu erklären, dass bei gleichem Belastungsdrehmoment wegen des geschwächten Erregerfeldes ein höherer Ankerstrom I_A benötigt wird. Dieser höhere Ankerstrom hat außerdem einen höheren Spannungsabfall am Ankerwiderstand zur Folge.

Mit dem Erregerfeld kann man die Drehzahl nur in einem begrenzten Bereich beeinflussen. Der magnetische Kreis des Erregerfeldes ist für eine bestimmte Nennerregung nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten ausgelegt. Eine nennenswerte Erhöhung darüber hinaus kommt nicht in Betracht, weil der Feldkreis dann in die Sättigung geht. Die Feldschwächung findet in den Fällen Anwendung, in denen man Drehzahlen oberhalb der Nenndrehzahl erreichen will. Dabei muss man jedoch einen Rückgang des verfügbaren Drehmomentes in Kauf nehmen, damit die Verlustleistung im Ankerkreis nicht zu groß und die Maschine überlastet wird. Die maximal erreichbare Drehzahl wird vor allem durch Probleme beim Kommutieren des Ankerstroms und durch die hohen Fliehkraftbeanspruchungen begrenzt.

4.13 Reihenschlussmotor

Bild 4-14 zeigt das Prinzipschaltbild des Reihenschlussmotors.

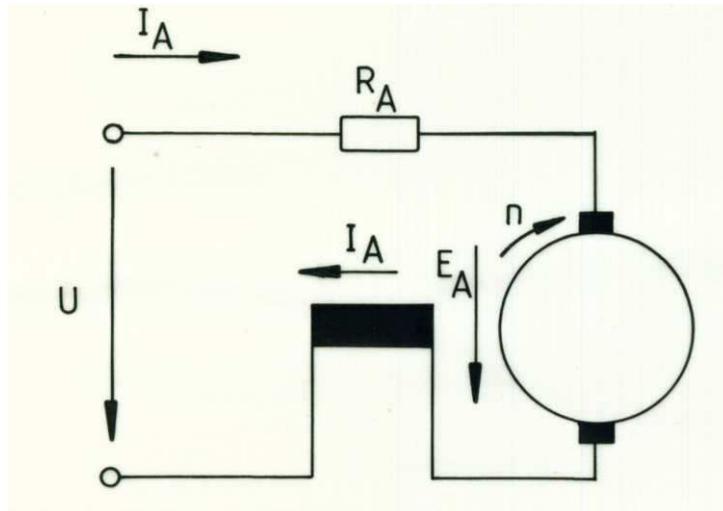


Bild 4-14: Reihenschlussmotor

Wie man dem Bild 4-14 entnehmen kann, wird die Erregerwicklung beim Reihenschlussmotor vom Ankerstrom durchflossen. Um die grundsätzlichen Eigenschaften herleiten zu können, wird der Einfluss der Eisensättigung auf den Fluss zunächst vernachlässigt. Wir erhalten dann eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Fluss und dem Ankerstrom:

$$\Phi = K_3 I_A \quad (4.39)$$

Für die Herleitung des Drehmomentes der Reihenschlussmaschine verwenden wir die in Gleichung (4.23) gefundene Beziehung. Wir ersetzen den Fluss durch die Gleichung (4.39) und erhalten:

$$D_M = K_2 K_3 I_A^2 \quad (4.40)$$

Es ergibt sich eine quadratische Abhängigkeit des Drehmomentes vom Ankerstrom I_A . Das Drehmoment ist also unabhängig von der Richtung des Ankerstroms. Mit steigendem I_A wird die Sättigung des magnetischen Kreises wirksam, so dass der Fluss nahezu konstant bleibt. Das Drehmoment wächst infolgedessen bei größeren Ankerströmen nicht mehr quadratisch mit dem Strom I_A sondern nur noch linear. In Bild 4-15 ist die Drehmoment-Ankerstrom-Kennlinie dargestellt.

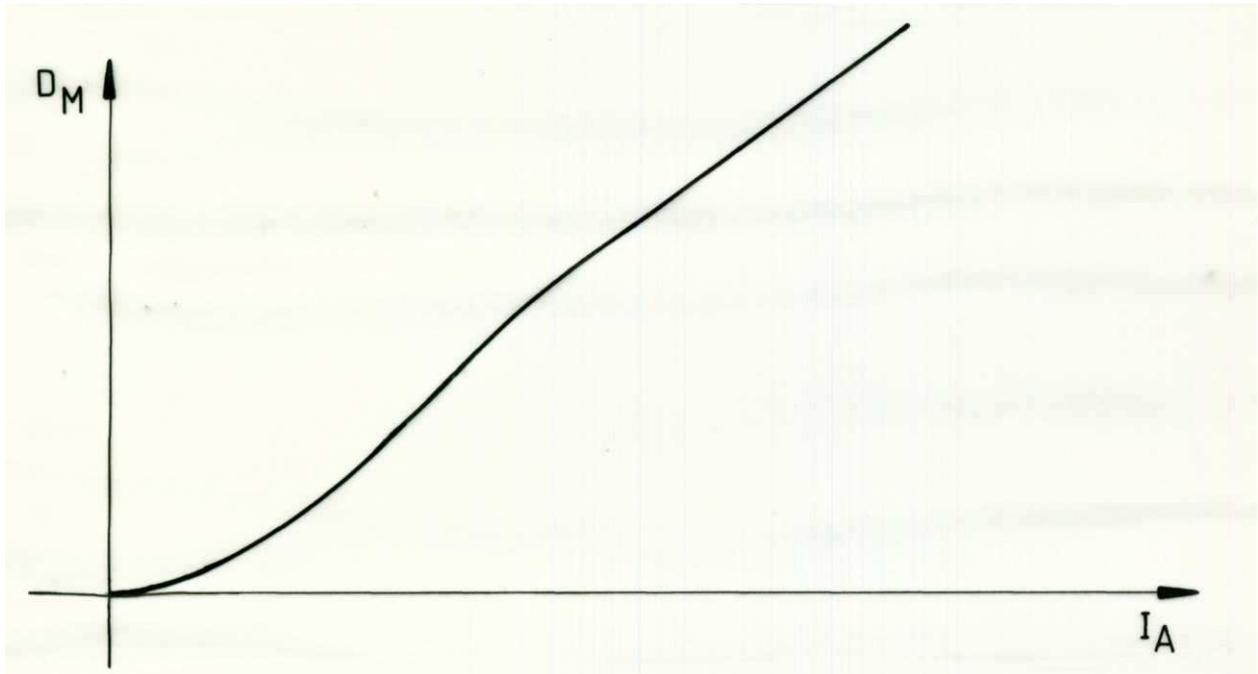


Bild 4-15: Drehmoment-Ankerstrom-Kennlinie des Reihenschlussmotors

Zur Berechnung der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie des Reihenschlussmotors gehen wir von der Gleichung (4.32) aus. Wir ersetzen den Fluss durch die Beziehung (4.39) und den Ankerstrom mit Hilfe der Gleichung (4.40) durch das Drehmoment. Damit erhalten wir:

$$n = \frac{K_8 U_A}{\sqrt{D_M}} - \frac{R_A}{K_4} \quad (4.41)$$

Die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie ist in Bild 4-16 dargestellt. Im Gegensatz zur fremderregten Gleichstrommaschine ist das Drehmoment der Reihenschlussmaschine stark von der Drehzahl abhängig. Bei kleinen Drehmomenten ist die Drehzahl der Reihenschlussmaschine sehr groß, da der Fluss mit dem Ankerstrom ebenfalls abnimmt. Die Leerlaufdrehzahl ist theoretisch unendlich groß. Sie wird in der Praxis jedoch durch die Reibung begrenzt. Die Drehzahl der unbelasteten Reihenschlussmaschine ist im allgemeinen unzulässig groß, so dass die Maschine nie völlig entlastet betrieben werden darf.

Reihenschlussmaschinen wurden in den Fällen eingesetzt, in denen bei kleinen Drehzahlen ein sehr großes Drehmoment benötigt wurde, zum Beispiel bei elektrischen Bahnen. Inzwischen hat sich hier aber die umrichter gespeiste

Asynchronmaschine durchgesetzt. Da das Drehmoment bei gleicher Drehrichtung seine Richtung nicht wechseln kann, ist generatorischer Betrieb bei der Reihenschlussmaschine zunächst nicht möglich. Allerdings ist es möglich, den Ankerstromkreis durch Schütze umzupolen, ohne dabei die Stromrichtung in der Erregerwicklung zu ändern.

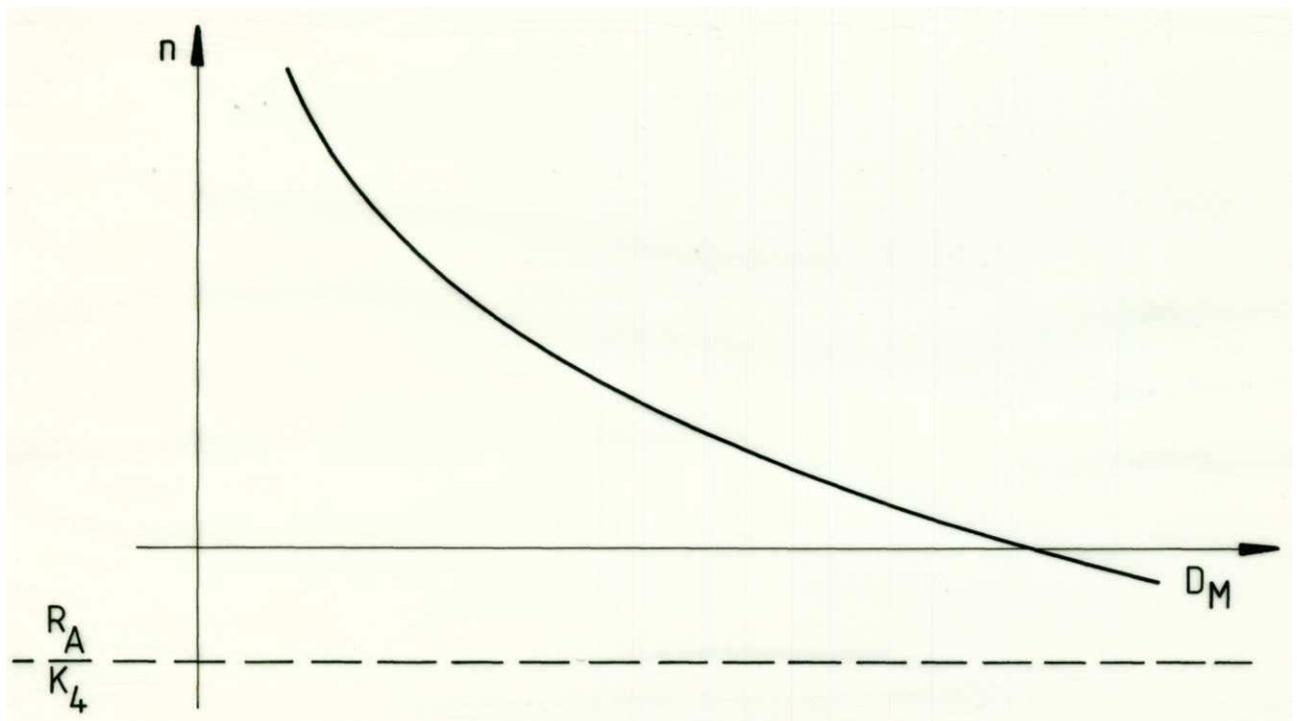


Bild 4-16 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie des Reihenschlussmotors

Wegen der quadratischen Abhängigkeit des Drehmoments vom Strom können Reihenschlussmotoren auch mit Wechselstrom gespeist werden. Als Universalmotoren haben sie eine große Bedeutung, z.B. für Haushaltsgeräte und Elektrowerkzeuge.