

Gleichstrommaschinen – Teil 2

Der zweite Teil über Gleichstrommaschinen zeigt verschiedene Ankerbauformen sowie Wicklungsausführungen, die im Laufe der historischen Entwicklung zum Einsatz kamen. Dabei werden die spezifischen Vor- und Nachteile genau erörtert. Es wird schrittweise der Weg zu modernen Bauformen aufgezeigt und erklärt, welche Abschnitte des magnetischen Kreises einen geblechten Aufbau erfordern.

In Teil 1 über Gleichstrommaschinen haben wir anhand eines sehr einfachen Modells das Grundprinzip der Gleichstrommaschine erklärt. **Bild 1** zeigt nochmals den Aufbau dieses Modells. Da eine einzelne Spule den Ankerumfang außerordentlich schlecht ausnutzt und darüber hinaus die magnetische Flussdichte durch den großen Luftspalt zwischen den Polen sehr gering ausfällt, muss man sich für eine technisch sinnvolle Lösung andere konstruktive Ausführungsformen einfallen lassen.

Zunächst macht es Sinn, die Leiterschleife in zwei Nuten eines Ankers aus ferromagnetischem Material zu legen (**Bild 2**). Hierdurch werden mehrere Vorteile gleichzeitig erzielt. Zum einen kann man den Luftspalt außerordentlich gering halten und dadurch mit minimaler Erregerdurchflutung ein entsprechend hohes Magnetfeld erzeugen. Mathematisch lässt sich ansetzen:

$$\oint \vec{H} d\vec{s} = \Theta_{ges}$$

Dies ist das Durchflutungsgesetz, das in seiner integralen Schreibweise einen allgemeinen

Prof. Dr.-Ing. H. Biechl
Werner-von-Siemens-Labor für
Elektrische Antriebe
und Mechatronik
Hochschule Kempten

Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke \vec{H} und Durchflutung Θ herstellt. Angewandt auf allgemeine Verhältnisse ergibt sich hieraus nachstehende Näherung:

$$\Theta_{ges} = 2 \cdot N \cdot I_E' = H_L \cdot \delta$$

Dabei ist N die Windungszahl eines Poles, I_E' der Erregerstrom durch eine Erregerwicklung (der von außen zufließende Erregerstrom wird mit I_E bezeichnet), H_L die Feldstärke im Luftspalt unterhalb des Polschuhs und δ die Luftspaltweite. Wenn man nun weiterhin die nachfolgende Beziehung berücksichtigt

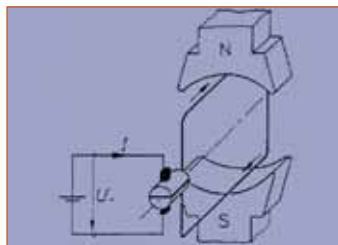


Bild 1: Prinzipieller Aufbau der Gleichstrommaschine

$$B_L = \mu_0 \cdot H_L$$

so erhalten wir schließlich:

$$B_L = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I_E'}{\delta}$$

B_L stellt hierbei die Luftspaltflussdichte im Bereich eines Poles in Tesla dar, die früher auch als Luftspaltinduktion bezeichnet wurde. Wie bereits erwähnt, handelt es sich hier um eine Näherung, da die magnetische Spannung im Eisen vernachlässigt wurde. Dennoch kann man diese Gleichung für eine erste Auslegung sehr gut verwenden. Betrachten wir ein Zahlenbeispiel:

Gegeben sei eine Gleichstrommaschine mit $I_E' = 1\text{A}$ und $\delta = 1\text{mm}$. Wir wollen nun im Polbereich eine Flussdichte von $B_L = 1\text{T}$ erzeugen und hierzu die erforderliche Windungszahl N eines Poles berechnen. Durch Umstellen obiger Gleichung finden wir:

$$\begin{aligned} N &= \frac{B_L \cdot \delta}{2 \cdot \mu_0 \cdot I_E'} \\ &= \frac{1\text{T} \cdot 0,001\text{m}}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}} \cdot 1\text{A}} \\ &= 398 \end{aligned}$$

Der Luftspalt δ der Gleichstrommaschine wird so gering wie technisch möglich gewählt, um eine niedrige Durchflutung Θ und damit geringe Verluste, also einen hohen Wirkungsgrad η , zu erhalten. Allerdings gibt es eine untere Grenze für die Luftspaltweite δ , die von mehreren Faktoren wie zum Beispiel dem radialen Lagerspiel, der thermischen Ausdehnung von Läufer und Stator, der Drehzahl und dem Läuferdurchmesser abhängen. In der Praxis verwendet man Näherungsgleichungen sowie Diagramme, die auf einer empirischen Grundlage entstanden sind und eine Bestimmung des minimalen Luftspaltes gestatten. Ein weiterer Vorteil einer Anordnung nach **Bild 2** liegt darin, dass die Ankerleiter in Nuten liegen, die ihrerseits entweder über einen nichtmetallischen Nutverschlusskeil verfügen (in der Regel bei größeren Maschinen) oder eine sehr schmale Nutöffnung (Nutschlitz) aufweisen, durch die die Wicklung sozusagen Draht für Draht eingebracht wird. Man spricht hierbei von so genannten Träufelwicklungen im Gegensatz zur Wicklung aus Formspulen (**Bild 3**). Unter Formspulen versteht man vollständig vorgefertigte und umbandelte Spulen, die komplett, d.h. so wie sie sind, in die Nuten eingelegt werden. In diesem Fall sind dann die erwähnten Nutverschlusskeile (**Bild 4**) zu verwenden. In der Praxis werden die Nuten innen noch mit einer Isolation versehen, der so genannten Nutauskleidung.

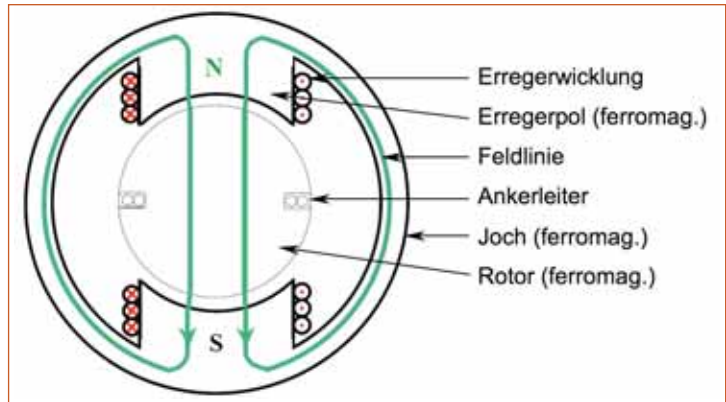


Bild 2: Gleichstrommaschine mit ferromagnetischem Anker und einer Spule

Die Bandage und Imprägnierung verleihen dem Läufer zusätzlich mechanische Stabilität und verhindert kleinste Bewegungen zwischen den Ankerleitern, die über kurz oder lang zu Ausfällen aufgrund einer Beschädigung der Drahtisolation führen könnten. Weiterhin gewährleistet das Tränken einen guten Wärmeübergang vom Leiter zum Läuferisen.

Bei beiden Nutausführungsformen werden die Leiter in der Nut gehalten und wandern nicht

infolge der hohen Fliehkraftbeanspruchung nach außen.

Diese Fliehkraft, die auch als Zentrifugalkraft bezeichnet wird, sollte nicht unterschätzt werden, was den Betrag anbelangt. Es gilt:

$$\begin{aligned}
 F_z &= m \cdot \omega^2 \cdot R \\
 &= 4\pi^2 \cdot m \cdot n^2 \cdot R_R \\
 &= 2\pi^2 \cdot D_R \cdot m \cdot n^2
 \end{aligned}$$

Dabei ist D_R der Rotordurchmesser und m die Masse der Ankerleiter. Nehmen wir an, es sei $D_R = 600 \text{ mm}$, $n = 3000 \text{ min}^{-1}$. Es

ergibt sich dann als bezogener Wert:

$$\begin{aligned} \frac{F_Z}{m} &= 2\pi^2 \cdot D_R \cdot n^2 \\ &= 2\pi^2 \cdot 0,6\text{m} \cdot (50\text{s}^{-1})^2 \\ &= 29,61 \frac{\text{kN}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Dieses Ergebnis bedeutet, dass pro kg Ankerleiter eine Fliehkraft von $F_Z = 29,61 \text{ kN}$ auftritt. Zur Veranschaulichung: Eine Masse von 3 t (= 3000 kg) weist eine Gewichtskraft von 29,43 kN auf. Anders ausgedrückt heißt das, dass pro Gramm Ankerleiter eine Zentrifugalkraft entsteht, die in etwa der Gewichtskraft einer Masse mit $m = 3 \text{ kg}$ entspricht. Dies ist ein außerordentlich hoher Wert. Dieses Zahlenbeispiel veranschaulicht somit sehr eindrucksvoll, weshalb Ankerleiter in Nuten untergebracht werden müssen – vor allem bei höheren Drehzahlen. Aber es gibt auch noch einen thermischen Gesichtspunkt. Sie wissen aus einem zurückliegenden Beitrag, dass elektrische Maschinen über eine gewisse Zeit hinweg mechanisch überlastet werden können. Lediglich die durch die Wärme-klasse vorgegebene Grenztemperatur darf nicht überschritten werden. Diese Überlastbarkeit resultiert letztlich aus der Wärmekapazität des Läufers. Der Stator spielt zwar ebenfalls eine Rolle, soll aber in einem ersten Ansatz unberücksichtigt bleiben. Wir können ansetzen:

$$Q = c_{\vartheta} \cdot m \cdot \Delta\vartheta$$

Dabei ist c_{ϑ} die spezifische Wärmekapazität und Q die aufgenommene bzw. abgegebene



Bild 3: Formspule



Bild 4: Nut mit Nutverschlusskeil

Wärmemenge. Für Eisen findet man in einschlägigen Tabellenbüchern

$$c_{\vartheta} = 0,456 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Nehmen wir wieder an, der Rotor habe einen Durchmesser von $D_R = 600 \text{ mm}$ und eine Länge von 1000 mm. Bei einer Temperaturerhöhung von $\Delta\vartheta = 20 \text{ K}$ er-

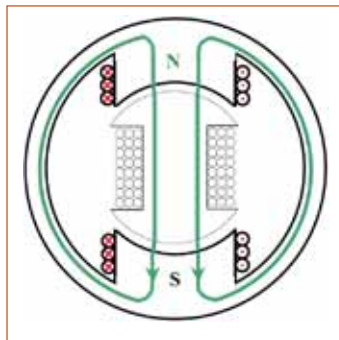


Bild 5: Gleichstrommaschine mit Doppel-T-Anker nach Werner von Siemens (1816 – 1892)

gibt sich für die aufgenommene Wärmemenge Q :

$$\begin{aligned} Q &= 0,456 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot \left(\frac{0,6\text{m}}{2} \right)^2 \\ &\cdot \pi \cdot 1,0\text{m} \cdot 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 20\text{K} \\ &= 20,1\text{kJ} \end{aligned}$$

Das ist die Wärmemenge Q , die bei einer Temperaturerhöhung von $\Delta\vartheta = 20 \text{ K}$ vom Rotor aufgenommen wird. Umgerechnet auf eine elektrische Verlustleistung sind dies immerhin 20 100 kW während einer Sekunde oder ca. 11 kW über eine Zeitspanne von 30 min. Wir wollen nun wieder zum konstruktiven Aufbau der Gleichstrommaschine zurückkehren. Wir haben bislang ausführlich gezeigt, weshalb ein Rotor aus Eisen von Nöten ist und weshalb die Ankerleiter möglichst in Nuten liegen müssen. Als nächstes wollen wir verschiedene Ankerbauformen und -wicklungen betrachten.

Eine Leiterschleife wie in Bild 1 ist sicherlich eine ungünstige Ausnutzung des Läufers, selbst wenn sie mehrere Windungen aufweisen würde. Die induzierte Spannung beim Generator oder das Drehmoment beim Motor wäre in diesem Fall sehr niedrig. **Bild 5** zeigt den so genannten Doppel-T-Anker. Er wurde erstmals im Jahre 1856 von Werner von Siemens (1816 – 1892) vorgestellt.

Diese konstruktive Lösung stellt allerdings bei genauer Betrachtung immer noch keine befriedigende Lösung dar, da sie als Generator einen pulsierenden

Strom und als Motor ein pulsierendes Drehmoment liefert. Weiterhin ist die maximal zulässige Drehzahl wegen der Fliehkraftbeanspruchung der Ankerleiter gering. Der Doppel-T-Anker wird deshalb heute bei industriellen Motoren nicht mehr verwendet. Gelegentlich finden sich noch Abwandlungen dieser Ankerbauform bei Spielzeugmotoren. Der so genannte Ringanker (Ausgabe 7 / Bild 1) vermeidet einige dieser Nachteile. Die um einen eisernen Ring gewickelten Spulen bilden eine in sich geschlossene Wicklung. Die Anzahl der Stromwenderlamellen ist mit der Anzahl der Spulen identisch. Jede Lamelle ist mit dem Ende einer und dem Anfang der nächsten Spule verbunden. Die beiden Bürsten teilen die Wicklung in zwei parallele Zweige auf. Bei Drehung des Ankers wird in jeder Windung eine Spannung induziert. Dabei nehmen allerdings nur die äußeren Leiter an der Spannungsbildung teil, nicht jedoch die inneren, die im feldfreien Raum liegen.

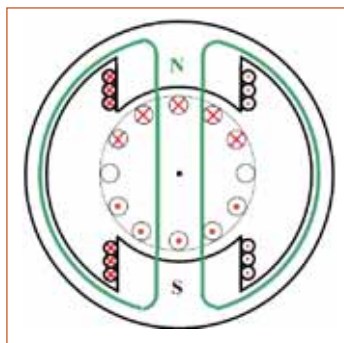


Bild 6: Gleichstrommaschine mit Trommelanker nach Hefner-Alteneck

Die induzierte Spannung U_i errechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned} U_i &= \frac{1}{2} N \cdot B_L \cdot v \cdot l \\ &= \frac{1}{2} N \cdot B_L \cdot 2\pi \cdot R_R \cdot I \cdot n \\ &= \frac{1}{2} N \cdot B_L \cdot \pi \cdot D_R \cdot I \cdot n \end{aligned}$$

Betrachten wir wiederum ein Zahlenbeispiel. Es soll gelten: $N = 500$; $B_L = 0,8\text{T}$; $D_R = 200\text{mm}$; $l = 60\text{mm}$; $n = 600\text{min}^{-1}$. Daraus ergibt sich nun:

$$\begin{aligned} U_i &= \frac{1}{2} \cdot 500 \cdot 0,8\text{T} \cdot \pi \cdot \\ &0,2\text{m} \cdot 0,06\text{m} \cdot 10\text{s}^{-1} = 75,4\text{V} \end{aligned}$$

Der Ringanker ist eine Erfindung des italienischen Physikprofessors Antonio Pacinotti (1841 – 1912), der 1860 die ersten Versuche mit einer derartigen Gleichstrommaschine durchführte. Nachteilig beim Ringanker ist, dass die auf der Innenseite des Ringes befindlichen Windungsteile unwirksam sind, d. h. weder zur Spannungsinduktion noch zur Drehmomentbildung beitragen. Da sie aber dennoch einen elektrischen Widerstand aufweisen und von einem Strom durchflossen werden, entstehen dort Verluste, was wiederum den Wirkungsgrad verschlechtert. Weiterhin besteht auch bei dieser Ankerbauform das Problem der Fliehkraftbeanspruchung der Ankerleiter, was durch Bandagieren mit glasfaserverstärkten Kunststoffbändern (RESI-Band) zumindest heute teilweise gelöst werden könnte. Allerdings ergäbe sich in diesem Fall dann wiederum ein deutlich größerer magnetisch wirksamer

Luftspalt, was die bereits erörterten Konsequenzen hinsichtlich Erregerdurchflutung nach sich zieht. Der Ringanker konnte sich deshalb letztendlich genauso wenig durchsetzen wie der Doppel-T-Anker und man landete schließlich beim Eisenvollzylinder, dem so genannten Trommelanker. Damit bekam die Gleichstrommaschine eine Gestalt, die den heutigen Ausführungsformen schon recht nahe kommt. Dieser bedeutende Entwicklungsschritt bei der Formgebung des Ankers wurde 1872 von Friedrich von Hefner-Alteneck (1845 – 1904), der bei Siemens die Position eines Chefingenieurs innehatte, vollzogen. **Bild 6** zeigt den Aufbau. Die Manteloberfläche des Zylinders ist gleichmäßig mit axial verlaufenden Kupferleitern, die in Nuten liegen, belegt und gegen das Eisen hin isoliert. Die Leiter werden in geeigneter Weise elektrisch miteinander verbunden.

Die Art und Weise, wie diese Verbindungen vorgenommen werden, kennzeichnet spezielle Ankerwicklungen wie die so genannte Wellenwicklung und die Schleifenwicklung. Wir werden später noch genauer hierauf eingehen. Zunächst ist es für das grundlegende Verständnis des Aufbaus und der Wirkungsweise der Gleichstrommaschine von sekundärer Bedeutung. Durch den Kommutator sowie den Aufbau und die Zusammenschaltung der Ankerwicklung ist stets gewährleistet, dass alle Leiter unter einem Pol die gleiche

Stromrichtung aufweisen und die umgekehrte Stromrichtung unter dem nächsten Pol. Hierdurch entsteht beim Motor eine kontinuierliche Drehbewegung des Läufers. Jeder einzelne Pol ist aus Polschenkel (=Polkern) und Polschuh aufgebaut. Um den Polschenkel liegt die Erregerwicklung. Der magnetische Rückschluss erfolgt über das so genannte Joch. Alternativ lassen sich die einzelnen Erregerwicklungen sowohl in „reihe“ als auch „parallel“ zusammenschalten. Dies hängt davon ab, ob die Gleichstrommaschine bei einer kleinen Erregerspannung und gleichzeitig hohem Erregerstrom betrieben werden soll oder umgekehrt. **Bild 7** zeigt verschiedene Verschaltungsarten aus denen die Beziehungen zwischen Klemmenspannung und Klemmenstrom hervorgehen.

Als nächstes wollen wir noch klären, welche Bereiche des Eisenkreises aus Massiveisen gestaltet werden können und welche aus gegeneinander isolierten Elektroblechen (=Blech-

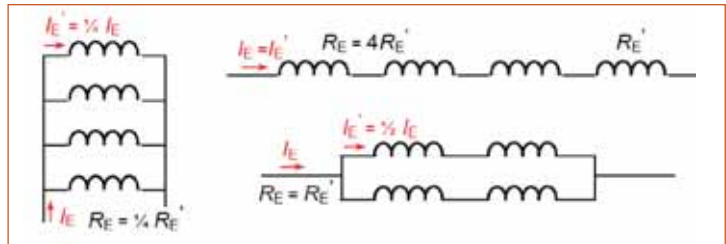


Bild 7: Verschiedene Verschaltungsarten der Erregerwicklungen einer 4-poligen Gleichstrommaschine

paket) aufzubauen sind. Wenn man das Luftspaltfeld genauer betrachtet, so ist es über dem Umfangswinkel nicht konstant, sondern weist durch die Ankernten hervorgerufene Einbuchtungen auf. Schließlich wählt das magnetische Feld immer den Weg des geringsten magnetischen Widerstandes R_m und dieser verläuft über die Zähne des Ankers und nicht über die Nuten, da sich Kupferleiter magnetisch ähnlich wie Luft verhalten. Die magnetischen Feldlinien verlaufen vom Erregerpol über den Luftspalt und die Zähne – nicht über die Nuten! Somit entsteht für einen bestimmten Zeitpunkt ein Verlauf der Flussdichte $B(\vartheta)$ gemäß **Bild 8**.

Betrachten wir nun einen festen Punkt an der Oberfläche eines Polschuhs. Befindet sich auf der gegenüberliegenden Seite ein Rotorzahn, dann herrscht in diesem Punkt eine relativ hohe Flussdichte. Aufgrund der Drehung des Läufers wird allerdings diesem Punkt nach einer gewissen Zeit eine Nut gegenüberliegen und somit eine geringere Flussdichte auftreten. Man erkennt also, dass jeder Punkt des Polschuhs, der sich in der Nähe des Luftspaltes befindet, einem magnetischen Gleichfeld ausgesetzt ist, dem noch ein zeitliches Wechselfeld überlagert ist. Die Frequenz des Wechselfeldes f_B hängt von der Ankernutzahl z_N und der Rotordrehzahl n ab. Es gilt:

$$f_B = n \cdot z_N$$

Betrachten wir hierzu ein Beispiel: Wir nehmen an, es sei $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ und $z_N = 96$. Wir erhalten dann:

$$f_B = 50 \frac{1}{s} \cdot 96 = 4800 \text{ Hz}$$

Es entsteht also eine verhältnismäßig hohe Frequenz der überlagerten Wechselmagnetisierung. Diese Wechselmagnetisierung würde nun erhebliche Wirbelstromverluste in massiv-eisernen Polschuhen hervorrufen und den Wirkungsgrad spürbar verschlechtern, ganz abgesehen von der zusätzlichen Erwärmung der Polschuhe und den damit einhergehenden Temperaturproblemen. Die Konsequenz aus diesem Sachverhalt ist nun, dass die Polschuhe geblecht, d. h. in Form von Blechpaketen, aufgebaut sein müssen. In aller Regel werden hierfür 0,5 mm starke Elektrobleche verwendet, die gegeneinander isoliert sind. Die Isolations-schicht wird bereits während des Fertigungsprozesses auf die Bleche aufgebracht. Pressbolzen

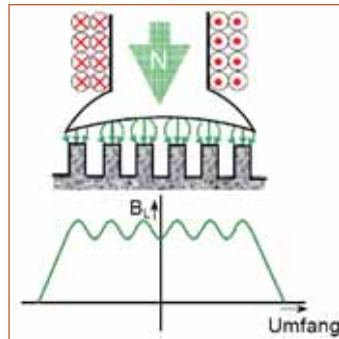


Bild 8: Verlauf der Luftspaltflussdichte im Bereich eines Poles

und -platten halten die zu Paketen gestapelten (=geschichteten) Bleche zusammen. Im Polkern (=Polschaft) hingegen ergibt sich durch Vergleichmäßigung ein verhältnismäßig homogenes, d. h. konstantes magnetisches Feld mit vernachlässigbaren Schwankungen der Flussdichte. Somit ließe sich dieser Abschnitt eigentlich „ungeblecht“ ausführen. Da allerdings der gesamte Pol sowohl aus fertigungstechnischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen aus einem Teil besteht, also nicht zusammengesetzt wird, besteht er vollständig aus Blechen, d. h. er

ist komplett durch ein Blechpaket aufgebaut. Die Pole sind häufig am Joch festgeschraubt. In vielen Fällen erkennt man eine Gleichstrommaschine von außen an den radial nach innen führenden Schrauben, die die Pole fixieren. Der Anker der Gleichstrommaschine muss ebenfalls vollständig geblecht sein, da in jedem Punkt des Rotors abwechselnd die eine und dann wieder die umgekehrte Feldrichtung auftritt, je nachdem welche Position (Läuferstellung) der Rotor gerade einnimmt. Zuletzt ist noch die Frage zu klären, wie es sich diesbezüglich beim Joch verhält. Grundsätzlich kann das Joch aus Massiveisen gefertigt sein. Für geregelte Antriebe, bei denen wegen der Feldschwächung auch der Erregerfluss verändert wird, ist es allerdings sinnvoll, auch diesen Abschnitt des magnetischen Kreises zu blechen. Dies hat auch fertigungstechnische Vorteile, da sich nun das Joch einschließlich der Pole durch ein einziges Blechpaket herstellen lässt.