

Thema: Permanenterregte Gleichstrommotoren

1 Geschichtliche Entwicklung

Als erster elektromechanischer Energiewandler wurde der *Gleichstrommotor* entwickelt. Die Energieversorgung erfolgte über die in den Anfängen der Elektrotechnik entwickelten galvanischen Elemente, die nur Gleichspannung lieferten. Die Entwicklung des Gleichstrommotors ist eng mit dem Namen A. Pacinotti verbunden, der im Jahre 1860 einen Motor mit Ringwicklung und vierteiligem *Stromwender* fertigte. Auf Pacinotti folgte Gramme, der den Ringanker erfand. Dieser Anker arbeitete allerdings mit erheblichen Leistungsverlusten, da die Spulenhälften innerhalb des Läufers nicht genutzt werden konnten. Eine entscheidende Verbesserung der Funktionsweise des Gleichstrommotors erreichte Friedrich von Hefner Alteneck. Der deutsche Konstrukteur umwickelte im Jahre 1872 einen zylinderförmigen Anker vollständig mit Draht und hatte somit den heute noch gebräuchlichen *Trommelanker* erfunden. Etwa um das Jahr 1890 verlor der Gleichstrommotor mit der Einführung des Drehstroms seine Vormachtstellung an die Induktionsmotoren.

2 Leistungs- und Anwendungsbereich

Der Gleichstrommotor ist eine elektrische Maschine, die sehr einfach in der Drehzahl und im Drehmoment verstellbar ist und deshalb in allen Größenordnungen gebaut wird. So gibt es Motoren mit unter einem Watt Leistung für die Feinwerktechnik oder Großmaschinen, die bei einer Spannung von 1500 V Leistungen von über 10.000 kW aufnehmen. Weit verbreitet sind dauermagneterregte (permanenterregte Motoren) Motoren bis zu ca. 100 W, die in großer Stückzahl für die Kfz-Elektrik gefertigt werden. Dort werden sie als Scheibenwischer-, Gebläse- und Stellmotoren eingesetzt. In der Industrie kommen Gleichstrommotoren vor allem in Werkzeugmaschinen, Förderanlagen und Walzstraßen vor. In Nahverkehrsbahnen werden sie als Fahrmotoren verwendet.

3 Aufbau eines Gleichstrommotors

Der Gleichstrommotor ist eine *Außenpolmaschine*, d.h. im Erregerfeld des Hauptpols ist eine sich drehende Leiterschleife gelagert. Vereinfacht man seinen Aufbau wie in Bild 1 (nächste Seite) wesentlich, so besteht der Gleichstrommotor aus *zwei* grundlegenden Bauteilen: erstens aus einem *Hauptmagneten*, der am Ständer (Stator) befestigt ist und an dem sich die Erregerwicklungen (Spulen) befinden; zweitens aus dem als Leiterschleife bereits erwähnten Anker (Rotor), an dessen geblecht ausgeführtem Ankern die *Ankerwicklungen* aufgebracht sind.

Bei den beiden erwähnten Teilen handelt es sich um *Magnete*, die miteinander in Wechselwirkung treten und so die Rotationsbewegung des Ankers verursachen. In Bild 1 können wir erkennen, dass es sich bei den Erregerwicklungen nicht immer um Spulen handeln muss. Auch dauermagneterregte Motoren sind möglich. Wir haben es hier mit einem zweipoligen Gleichstrommotor mit der Polpaarzahl $p = 1$ zu tun, weil Nord- und Südpol die Feldkomponenten *eines* Magneten sind. Der abgebildete Anker heißt *Doppel-T-Anker*. Er hat die einfachste Form, die für den

Anker einer Gleichstrommaschine möglich ist, erhalten, die an zwei zusammengesetzte "T's" erinnert.

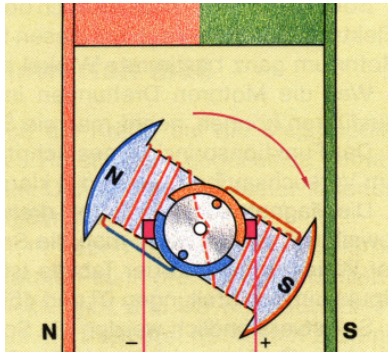


Bild 1

Die Anfänge und Enden der Ankerspulen sind an die *Lamellen des Kommutators* (auch *Stromwender* bzw. *Kollektor*) angeschlossen (in Abbildung 1 blau und orange dargestellt). Der Kommutator muss also pro Wicklung, die sich am Anker befindet, je zwei Lamellen (Kupfersegmente) aufweisen. Die Lamellen sind oft durch Mikanit-Zwischenlagen isoliert und bilden in ihrer Gesamtheit den zylinderförmigen Kommutatorbelag. Die Stromzufuhr in der Ankerwicklung erfolgt über *Kohlebürsten* (in Bild 1 durch kleine rote Rechtecke gekennzeichnet), die mit dem rotierenden Stromwender einen Gleitkontakt geben und so die Spulen mit Strom versorgen. Kohle verwendet man deshalb, da es sich hierbei um einen relativ guten Leiter

handelt, der zudem beim Gleitkontakt mit dem Stromwender die Funktion eines Schmiermittels erfüllt, indem kleine Kohlepartikel von der Kohlebürste abgeschliffen werden und sich auf seinen Namen hat er von seiner Form der Kollektoroberfläche als Gleitmittel ansammeln.

Kommutator und Bürsten kann man auch als einen mechanischen Schalter oder Wechselrichter verstehen, der beim Durchgang des Kollektors durch die neutrale Zone (Totpunkt, Nulldurchgang) die Stromrichtung umkehrt.

Der Ständer, der in Bild 1 ein Dauermagnet ist, stellt den gesamten äußeren Teil des Motors dar. An ihm sind neben den Erregerwicklungen die Polschuhe, Wendepole und Kompensationswicklungen angebracht, auf die später noch ausführlich eingegangen wird. Der Ständer ist gleichzeitig auch der Jochring, der den magnetischen Rückschluss der Hauptpole garantiert. Die Feldlinien, die in Bild 2 stets vom Nordpol zum Südpol zeigen, haben in Wirklichkeit keinen Anfang und kein Ende, man kann sich vielmehr vorstellen, dass sie nach Erreichen des Nordpols wieder zum Südpol zurückkehren; allerdings beschreiben sie dabei nicht denselben Weg. Den "Rückweg" nehmen sie nämlich über den Ständer des Motors, um zum "Ausgangspunkt" (= Nordpol) zu gelangen.

5 Funktionsweise eines Gleichstrommotors

Ein Gleichstrommotor setzt sich im Prinzip aus einem feststehenden *Stator*, an dem die *Feldmagneten* angebracht sind, und einem rotierenden *Anker*, zusammen. In Bild 2 sind die Pole des Feldmagneten durch N = Nordpol und S = Südpol gekennzeichnet. Der Anker, der sich im Luftspalt des Feldmagneten dreht, wird in der Abbildung mittels eines Balkens und zweier Kreise dargestellt, die in Bild 2 a) die beiden Spulenhälften der Ankerwicklung und in den Bildern 2 b), c) und d) die jeweilige Stromrichtung symbolisieren sollen.

Das elektrodynamische Gesetz besagt, dass auf eine stromdurchflossene Leiterschleife im Magnetfeld die Kraft $F = I \cdot l \cdot B$ wirkt und dass ein stromdurchflossener Leiter von einem kreisförmigen Magnetfeld umgeben ist. Kombinieren wir nun das Magnetfeld des Feldmagneten mit dem Magnetfeld der Leiterschleife, so können wir eine Überlagerung der beiden Felder sowie eine daraus resultierende Kraftwirkung feststellen.

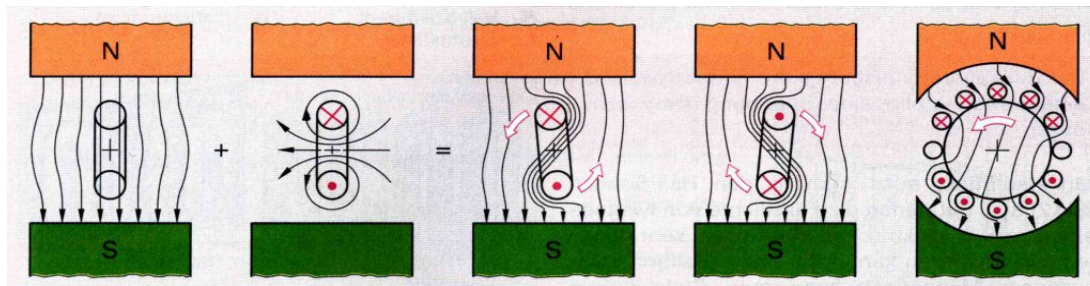


Bild 2 a) b) c) d) e)

In Bild 2 a) erkennen wir, dass der Anker parallel zu den Feldlinien ausgerichtet ist. Die Ankerwicklung setzt sich aus zwei Spulenhälften zusammen, die als Kreise am jeweiligen oberen und unteren Ende des Ankers dargestellt sind (siehe Bild 2 a). Legen wir nun eine Gleichspannung an die beiden Enden der Ankerwicklung (Bild 2b), können wir uns vorstellen, dass die bewegten Ladungsträger in die untere Spulenhälfte hineinfließen (Kreis mit Punkt) und aus der oberen Spulenhälfte wieder herausfließen (Kreis mit Kreuz). Eine jede stromdurchflossene Spule entwickelt ein eigenes Magnetfeld, so dass es nun zu einer Überlagerung des Erregerfeldes mit dem Feld der unteren Spulenhälfte und dem Feld der oberen Spulenhälfte kommt. Die Feldlinien des Erregerfeldes sind immer gleich gerichtet, sie zeigen stets vom Nordpol zum Südpol. Die Felder der beiden Spulenhälften hingegen, in Bild 2 b) durch Kreise mit je einem Pfeil dargestellt, haben entgegengesetzte Richtung. Betrachten wir in Bild 2 c) die untere Spulenhälfte, so erkennen wir, dass auf der linken Seite des Feldes der Spulenhälfte die Feldlinien von Erregerfeld und Spulenfeld die gleiche Richtung aufweisen. Man sieht deutlich, wie es auf dieser Seite zu einer Verdichtung der Feldlinien kommt. Die zusammengedrängten Feldlinien haben die Eigenschaft, sich voneinander abzustößen, so dass es zu einer Kraftwirkung in Richtung des verminderten Feldbereichs (in Bild 2 c), d), e) durch einen weißen Pfeil dargestellt) kommt.

Betrachten wir nun in Bild 2 c) die obere Spulenhälfte: Die Feldlinien dieser Spulenhälfte zeigen auf ihrer rechten Seite in die gleiche Richtung wie die Feldlinien des Erregerfeldes. Es kommt hier wiederum zu einer Verdichtung der Feldlinien und zu einer Ablenkung des Ankers in Richtung des geschwächten Feldbereichs (ebenso durch weiße Pfeile dargestellt).

Aufgrund dieser Kraftwirkung in die jeweils entgegengesetzte Richtung am unteren und am oberen Ende des Ankers entsteht ein Drehmoment. Dieses Drehmoment wiederum verursacht die Rotationsbewegung des Ankers.

Bild 2 e) stellt die Kraftwirkung auf einen Trommelanker dar, der bei zahlreichen handelsüblichen Gleichstrommotoren eingesetzt wird. Wir erkennen unschwer, dass dieser Anker nicht nur eine Leiterschleife bzw. Ankerwicklung aufweist, sondern gleich mehrere. Demzufolge muss sich auch die Kraftwirkung auf den Anker sowie das von ihm abgegebene Drehmoment vergrößern.

Bei Elektromotoren wird das Drehmoment durch das Zusammenwirken von *Ständermagnetfeld* und *Ankermagnetfeld* gebildet. Der durch die Ankerwicklungen fließende Strom erzeugt nämlich um jede einzelne Windung der Ankerspule ein durch konzentrische Kreise darstellbares Magnetfeld. Die Gesamtheit dieser Magnetfelder erzeugt das Ankerfeld. Dieses bewirkt im Ständermagnetfeld eine Kraft F , so dass sich ein Drehmoment bildet.

Durch Messung der Kraft F am Umfang der Antriebsscheibe des Motors kann das abgegebene Drehmoment bestimmt werden.

6 Permanenterregte Gleichstrommotoren

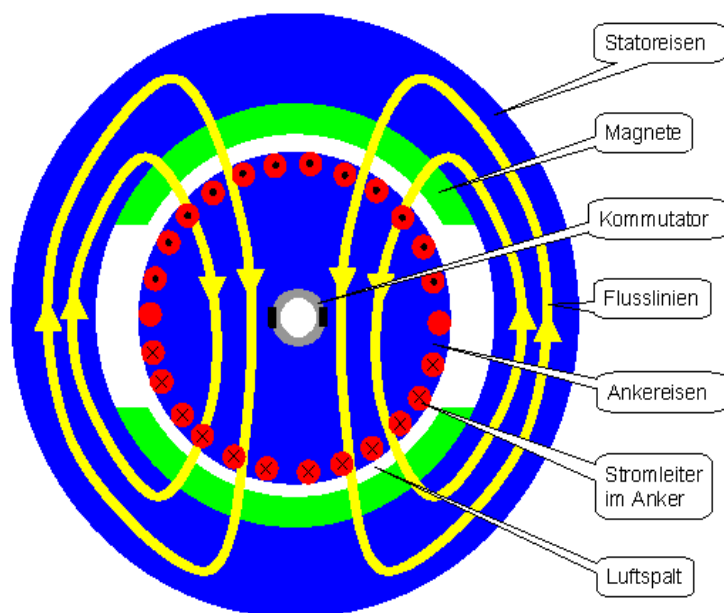


Bild 3:

Bei Gleichstrommaschinen wird das Erregerfeld im Stator durch den Einsatz von Dauermagneten aufgebaut (siehe Bild 3: Schnitt durch einen 2-poligen permanenterregten Gleichstrommotor). Die Kommutierung erfolgt mechanisch durch ein System aus Bürsten

und einem auf der Rotorwelle rotierenden Kollektor. Man spricht auch von permanenterregte Kollektormotoren. Die Wirkungsweise von permanenterregten Gleichstrommaschinen ist die gleiche wie unter dem Punkt 5 bereits beschreiben.

Das charakteristische Verhalten eines permanenterregten Gleichstrommotors wird durch das skizzierte Kennlinienfeld beschrieben. Strom und Drehzahl sind linear Abhängig vom Drehmoment. Durch die Ankerwicklung sind die jeweiligen Steigungen der Geraden festgelegt und können nicht unabhängig voneinander beeinflusst werden. Die Leerlaufdrehzahl verhält sich proportional zur Versorgungsspannung. Dadurch ergibt sich durch eine Änderung der am Motor anliegenden Spannung eine Parallelverschiebung der Drehzahlkennlinie. Die Kennlinie des Stroms bleibt davon unberührt.

Durch Bildung des Quotienten aus der an der Motorwelle mechanisch angegebenen Leistung und der vom Motor aufgenommenen elektrischen Leistung berechnet sich der Wirkungsgrad des Motors. Betrag und Lage des Maximums der Wirkungsgradkurve werden im Wesentlichen von der Baugröße des Motors, der Betriebsspannung und den Ankerwiderstand beeinflusst. Die Standardmotoren arbeiten im Bemessungspunkt mit maximalem Wirkungsgrad.

Der permanenterregte Gleichstrommotor ist aufgrund seines linearen Kennlinienfeldes ein anpassungsfähiger und gut regelbarer Antrieb. Bei einem beliebigen Drehmoment kann der Motor mit unterschiedlichen Spannungen betrieben werden.

7 Schaltsymbole für Fremd- und Eigenerregte Gleichstrommaschine

Ein Elektromotor, der seine Felder aus einer Energiequelle speist, die unabhängig vom Ankerstromkreis ist, nennt man ihrer Erregungsart nach *Fremderregung*. Diese Erregung kann mittels eines Dauermagneten (siehe Bild 4 a) oder eines Elektromagneten erfolgen. Falls die elektrische Energie, die für die Erregung des Hauptfeldes notwendig ist aus dem Läuferkreis in die Wicklungen des Hauptpols geleitet wird, spricht man von einer *Selbsterregung* eines Gleichstrommotors (siehe Bild 4 b). Hier unterscheiden wir zwei verschiedenen Typen:

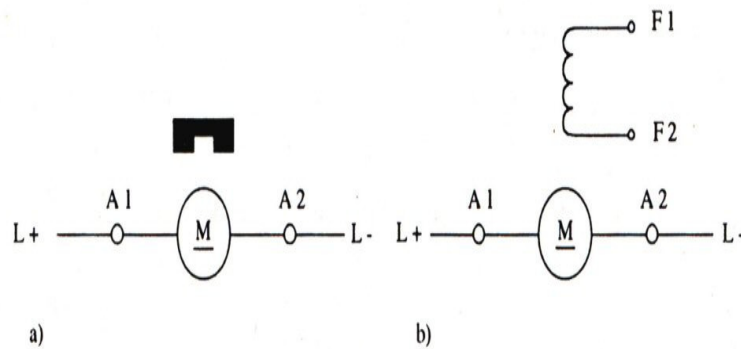


Bild 8.9 Fremderregung

- a) Dauermagnet
- b) Elektromagnet

Bild 4 a) fremderregter Motor b) selbsterregter Motor

In Bild 4 sehen wir eine schematische Vereinfachung eines Motors mit Fremderregung und eines Motors mit Selbsterregung.

7 Ermittlung von Kenngrößen

Für den Antrieb unseres Projekts SoSe 2004 werden 2 permanenterregte Gleichstrommotoren verwendet, bei denen elektrische und mechanische Kenngrößen mehr oder weniger unbekannt sind.

Während Angaben zur maximalen Leistung und Stromaufnahme vorliegt, findet man entsprechende Werte bei Belastung nicht mehr. Brauchbare Angaben über Drehzahl, Drehmoment und Wirkungsgrad sind ebenfalls nicht vorhanden.

Aber gerade die Kenntnis des Drehmoments bei unterschiedlichen Lastbedingungen kann sinnvoll sein, um die Eignung eines Motors als Antrieb für ein bestimmtes Modell beurteilen zu können.

Zur Charakterisierung eines Motors werden nur wenige Daten benötigt, aus denen sich praktisch alle anderen Kenngrößen errechnen lassen. Grundlage dafür ist die Leistungsbilanz eines Motors:

$$U \cdot I = I^2 \cdot R + c \cdot I \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

und daraus folgend

$$U = I \cdot R + c \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

U = Versorgungsspannung in V (Volt)

I = Stromaufnahme in A (Ampere)

R = ohmscher Widerstand der Ankerwicklung in Ohm

c = Maschinenkonstante in Vs

n = Drehzahl pro Sekunde in 1/s

Das Produkt $U \cdot I$ ist die aufgenommene Leistung, welche mit einem einfachen Multimeter gemessen werden kann.

$I^2 \cdot R$ beschreibt die elektrische Verlustleistung der Ankerwicklung; außer zum Heizen kann sie nicht weiter genutzt werden.

$c \cdot I \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$ ist die mechanische Leistung, die aus mechanischer Verlustleistung (Reibung, Luftwiderstand usw.) und der (entnehmbaren) mechanischen Nutzleistung besteht.

Die Maschinenkonstante c wird auch in einschlägigen Fachbüchern mit k_M für Drehmomentkonstante aufgeführt, sie beschreibt den Kehrwert der Maschinenkonstante c . Zu beachten sei, dass bei der Verwendung vom Drehmoment k_M eine Berechnung der Drehzahl n pro Minuten erfolgt. Ebenfalls kann man mit der Drehzahlkonstant k_n diese Beispiel durchführen, weil $k_n = 1 / (c \cdot 2\pi)$. Um das Beispiel einfach zu halten wird mit der Maschinenkonstante c gearbeitet.

Die Drehzahl n muss für die weiteren Berechnungen bekannt sein und erforderlichenfalls gemessen werden. Hierzu gibt es mehrere Möglichkeiten, die an dieser Stelle aber nicht weiter beschrieben werden sollen. Erwähnt seien handelsübliche Drehzahl-Messgeräte und einfache magnetische bzw. optische Verfahren unter Verwendung eines Oszilloskops; auch durch Auswertung des Tonfrequenzspektrums eines Motors mit einem PC und einem Fourieranalyse-Programm kann die Drehzahl ermittelt werden.

Zur Ermittlung der noch unbekannten Größen R und c müssen die Stromaufnahme I und die dazugehörige Drehzahl n bei **zwei unterschiedlichen Lastzuständen** vorliegen bzw. gemessen werden, z. B. bei Leerlauf und bei Nennlast. Das Einsetzen dieser 2 Wertepaare in die Leistungsbilanz führt auf 2 Gleichungen mit 2 Unbekannten, die nach den bekannten mathematischen Regeln nach R und c aufzulösen sind.

Beispiel: Ein Motor habe folgende bekannte Daten

Leerlauf: Nennspannung $U = 6 \text{ V}$, Leerlaufdrehzahl $n = 93 \text{ 1/s}$ (5600 1/min),
Stromaufnahme $I = 0,5 \text{ A}$

Nennlast: Nennspannung $U = 6 \text{ V}$, Nennlastdrehzahl $n = 75 \text{ 1/s}$ (4500 1/min),
Stromaufnahme $I = 1,7 \text{ A}$

Das dazugehörige Gleichungssystem lautet:

$$\begin{aligned} 6\text{V} \cdot 0,5\text{A} &= (0,5\text{A})^2 \cdot R + c \cdot 0,5\text{A} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 93 \text{ 1/s} \\ 6\text{V} \cdot 1,7\text{A} &= (1,7\text{A})^2 \cdot R + c \cdot 1,7\text{A} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 75 \text{ 1/s} \end{aligned}$$

bzw. nach Dividieren durch den Strom

$$\begin{aligned} 6\text{V} &= 0,5\text{A} \cdot R + c \cdot 2 \cdot \pi \cdot 93 \text{ 1/s} \\ 6\text{V} &= 1,7\text{A} \cdot R + c \cdot 2 \cdot \pi \cdot 75 \text{ 1/s} \end{aligned}$$

Die daraus errechneten Werte für R und c

$$R = 0,9078 \text{ Ohm} \qquad c = 9,457 \cdot 10^{-3} \text{ Vs}$$

komplettieren schließlich die Leistungsbilanz:

$$U \cdot I = I^2 \cdot 0,9078 \text{ Ohm} + 9,457 \cdot 10^{-3} \text{ Vs} \cdot I \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

Der nächste Schritt ist die Berechnung der mechanischen Nutzleistung.

Man erhält sie, indem von der gesamten mechanischen Leistung die mechanische Verlustleistung subtrahiert wird:

$$P_{\text{mech Nutz}} = P_{\text{mech Gesamt}} - P_{\text{mech Verlust}}$$

$$P_{\text{mech Nutz}} = (c \cdot I \cdot 2 \cdot \pi \cdot n) - (c \cdot I_{\text{Leerlauf}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n) = c \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot (I - I_{\text{Leerlauf}})$$

Diese Gleichung berücksichtigt die Drehzahlabhängigkeit der mechanischen Verlustleistung:

Im Leerlauf ist sie am höchsten, und bei blockierter Motorwelle wird sie zu Null, da sich der Anker nicht mehr bewegt; angenommen wird hier ein linearer Abfall zwischen Leerlauf und blockierter Motorwelle.

Für die hier angenommene Nennlast errechnet sich die nutzbare mechanische Leistung zu:

$$P_{\text{mech Nutz}} = 9,457 \cdot 10^{-3} \text{ Vs} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 75 \text{ 1/s} \cdot (1,7 \text{ A} - 0,5 \text{ A})$$

$$\mathbf{P_{\text{mech Nutz}} = 5,348 \text{ W}}$$

Das Drehmoment ergibt sich aus dem Zusammenhang:

$$M = P / \omega = P / 2 \cdot \pi \cdot n = c \cdot I$$

M = Drehmoment in Nm bzw. Vs
 P = Leistung in W
 n = Drehzahl pro Sekunde in 1/s
 ω = Kreisfrequenz $2 \cdot \pi \cdot n$ in 1/s

Auch hier muss das Verlustmoment vom Gesamt-Drehmoment subtrahiert werden, um das nutzbare Drehmoment zu erhalten:

$$M_{\text{Nutz}} = M_{\text{Gesamt}} - M_{\text{Verlust}}$$

$$M_{\text{Nutz}} = 9,458 \cdot 10^{-3} \text{ Vs} \cdot (1,7 \text{ A} - 0,5 \text{ A})$$

$$\mathbf{M_{\text{Nutz}} = 1,135 \text{ Ncm}}$$

Von praktischer Bedeutung ist noch das max. Drehmoment bei blockierter Motorwelle.

Es ergibt sich ebenfalls aus $M = c \cdot (I_{\text{max}} - I_{\text{Leerlauf}})$, wobei als Strom der max. Wert $I = U / R = 6 \text{ V} / 0,9078 \text{ Ohm} = 6,609 \text{ A}$ eingesetzt wird:

$$\mathbf{M_{\text{max}} = 5,78 \text{ Ncm}}$$

Des Weiteren kann aus den vorliegenden Daten noch der Wirkungsgrad bestimmt werden.

Es ist der Quotient aus nutzbarer mechanischer Leistung und zugeführter elektrischer Leistung:

$$\eta = P_{\text{mech Nutz}} / P_{\text{elektr zu}} = 5,348 \text{ W} / 10,2 \text{ W}$$

$$\mathbf{\eta = 52,4\%}$$

Die bisher ermittelten Kenngrößen beschreiben das Verhalten des Motors in **einem**

Arbeitspunkt, und zwar bei der hier angenommenen Nennlast. Manchmal ist aber auch das Verhalten über den gesamten Arbeitsbereich von Interesse und soll abschließend untersucht werden. Vor allem soll aber geklärt werden, ob die in diesem Beispiel angenommene Nennlast auch tatsächlich dem Betrieb bei höchstem Wirkungsgrad entspricht.

Zusammenhang zwischen Drehzahl und Stromaufnahme

Diese Funktion ergibt sich durch Auflösen der Leistungsbilanz nach der Drehzahl n :

$$n = (U - I \cdot R) / (c \cdot 2 \cdot \pi)$$

$$n = f(I)$$

Zusammenhang zwischen Leistung, Drehmoment und Stromaufnahme

Der Leistungsverlauf ergibt sich durch Einsetzen obiger Gleichung für die Drehzahl in die Gleichung für die mechanische Nutzleistung

$$P_{\text{mech Nutz}} = (U - R \cdot I) \cdot (I - I_{\text{Leerlauf}})$$

Der Drehmoment-Verlauf ergibt sich aus

$$M_{\text{Nutz}} = c \cdot (I - I_{\text{Leerlauf}})$$

$$P_{\text{mech Nutz}} = f(I), M_{\text{Nutz}} = f(I)$$

Demnach liefert der Motor seine max. mechanische Leistung nicht bei angenommener Nennlast $I = 1,7 \text{ A}$, sondern etwa bei $I = 3,55 \text{ A}$; die mechanische Leistung erreicht bei diesem Strom einen Wert von ca. $8,5 \text{ W}$.

Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad und Stromaufnahme

Der Verlauf des Wirkungsgrades ergibt sich aus dem Quotienten der mechanischen Nutzleistung zur elektrischen Leistungsaufnahme:

$$\eta = (U - R \cdot I) \cdot (I - I_{\text{Leerlauf}}) / (U \cdot I)$$

$$\eta = f(I)$$

Wie die Funktion der Leistung, so hat auch der Verlauf des Wirkungsgrades bei einem bestimmten Strom ein Maximum; diese beiden Ströme sind aber nicht identisch.

Um das Maximum einer Kurve zu ermitteln, werden üblicherweise die Methoden der Differentialrechnung angewendet. Differenzieren der Kurve (Bildung der ersten Ableitung) führt zunächst auf den Verlauf der Steigung dieser Kurve in Form einer neuen Funktion. Da die Steigung in einem Maximum Null ist, wird diese Funktion ebenfalls mit Null gleichgesetzt, und man erhält dadurch den zum Maximum gehörenden Wert auf der x-Achse (in diesem Fall den Strom I).
Bezüglich des genauen Rechenwegs sei an dieser Stelle auf die Fachliteratur hingewiesen.

Nach Durchführung o. g. Berechnung folgt als Strom bei max. Wirkungsgrad:

$$I_{\eta_{\max}} = \sqrt{(U \cdot I_{\text{Leerlauf}} / R)}$$

$$I_{\eta_{\max}} = 1,818 \text{ A}$$

Die angenommene Nennlast $I = 1,7 \text{ A}$ entspricht also nicht exakt dem Betrieb bei max. Wirkungsgrad.

Die anderen zum max. Wirkungsgrad gehörenden Kenngrößen errechnen sich zu

$$n_{\eta_{\max}} = 73,2 \text{ 1/s} = 4392 \text{ 1/min}$$

$$P_{\text{mech Nutz } \eta_{\max}} = 5,733 \text{ W}$$

$$M_{\text{Nutz } \eta_{\max}} = 1,247 \text{ Ncm}$$

$$\eta_{\max} = 52,56\%$$

8 Literaturverzeichnis

AUTORENGRUPPE: Fachkunde Elektrokunde, Wuppertal 1986
 AUTORENGRUPPE: Tabellenbuch Elektrokunde, Wuppertal 1988
 VOGEL, J.: Elektrische Antriebstechnik, Heidelberg 1991
 HILLE, W./ SCHNEIDER. O.: Fachkunde für Elektroberufe, Stuttgart 1987
 AUTORENGRUPPE: Elektrische Klein- und Kleinstmotoren, Berlin 1975