

Gleichstromantriebe



Inhalt:

- **Der Gleichstrom**
- **Die magnetische Erregung**
- **Prinzip von Gleichstrommaschinen**
- **Aufbau vom Gleichstrommotor**

Gleichstrom

Ohmscher Widerstand

Wird am den Enden eines Leiters eine Spannung angelegt, fliesst ein Strom.
Ist bei einem Leiter die Stromstärke proportional zur angelegten Spannung, nennt man den Leiter einen Ohmschen Widerstand.

Das Gesetz von Ohm:

$$U = R \cdot I$$

Der spezifischer Widerstand eines Leiters ist umso grösser, je grösser seine Länge und je kleiner seine Querschnittfläche ist. Ausserdem spielt das Leitermaterial eine entscheidende Rolle:

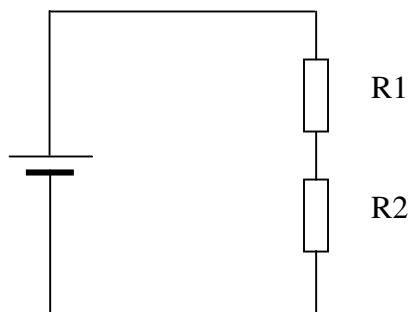
$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

wobei:

- R: Wirkwiderstand (Ohm)
- l: Leiterlänge
- A: Querschnittfläche

Schaltungen mit Widerständen

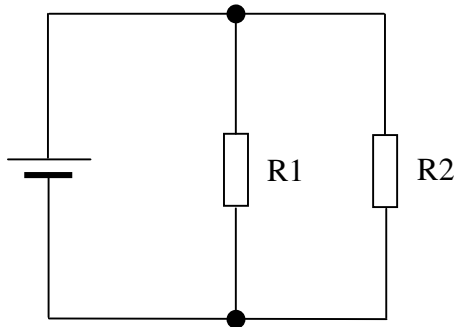
Sind mehrere Widerstände in Serie geschaltet, so werden die Widerstände mit demselben Strom (I) durchgeflossen.
Die Summe der an den Einzelwiderständen abfallenden Teilspannungen ist dabei gleich der Spannung an den Klemmen der Spannungsquelle.



$$R_T = R_1 + R_2$$

$$I = \frac{U}{R_T}$$

Verzweigt sich ein Stromkreis in mehrere parallel geschaltete Leiter, so ist die Summe der Stromstärken nach der Verzweigung gleich der Stromstärke vor der Verzweigung.



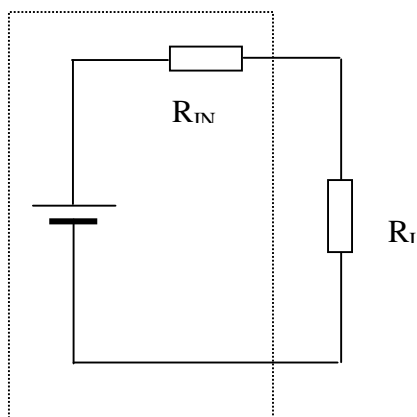
$$I = I_1 + I_2$$

$$I = \frac{U}{R_T}$$

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Innerer Wirkwiderstand einer Gleichspannungsquelle

Bei den realen Spannungsquellen ist die Klemmenspannung von der Stromstärke abhängig. Mit zunehmender Stromstärke kann man ein zunehmendes Absinken der Klemmenspannung beobachten.



Bei der unbelasteten Batterie fließt kein Strom, und die Klemmenspannung entspricht der Spannungsquelle.

Wird aber die Batterie mit dem Widerstand belastet, so fließt ein Strom I . Die Klemmenspannung sinkt.

Der grösstmögliche Strom fließt dann, wenn die Klemmen der Batterie kurzgeschlossen werden. Der Strom hängt nur von dem inneren Wirkwiderstand.

Wärmeleistung

In der Praxis ist es oft von Bedeutung, die in einzelnen Widerständen oder die in der gesamten Schaltung freigesetzte Wärmeleistung zu berechnen.

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R$$

U: Spannung

I: Stromstärke

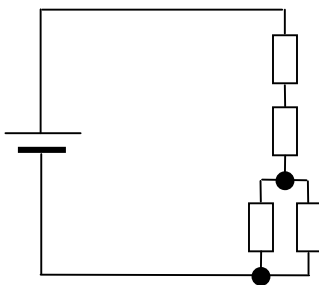
R: Wirkwiderstand

Aufgaben:

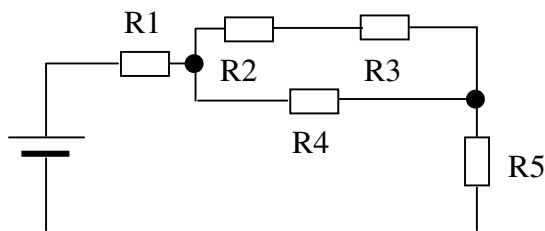
Ein ohmscher Widerstand bezieht von einer Spannungsquelle ($U=12\text{V}$) eine elektrische Leistung von 50W . Welchen Widerstand besitzt er? Welche Stromstärke herrscht im Stromkreis?

Eine Glühlampe hat einen Wolframdraht mit einem spezifischen Widerstand von $7,5 \cdot 10^8 \Omega \cdot \text{m}$, mit einem Durchmesser von $0,1 \text{ mm}$ und eine Länge von 2 cm . Die Glühlampe wird an eine 12V Batterie angeschlossen. Welche elektrische Leistung besitzt die Lampe?

Welche Leistung liefert die Batterie (12V), wenn die Widerstände einen Wert von 10Ω besitzen?



Welche Wärme wird von R_1 freigesetzt?



$R_1=2 \Omega$
 $R_2=5 \Omega$
 $R_3=10 \Omega$
 $R_4=30 \Omega$
 $R_5=10 \Omega$
 $U_{\text{BATT}}=12 \text{ V}$

Von einem Generator (10 kV) soll einem Verbraucher eine Leistung von 100kW zufließen. Die Leitung besteht aus Kupferdraht mit einem spezifischen Widerstand von $1,77 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, Querschnittsfläche 2cm^2 . Die Distanz zwischen dem Generator und dem Verbraucher ist 1 km . Welche Verlustleistung geht dem Verbraucher durch die Leitung verloren?

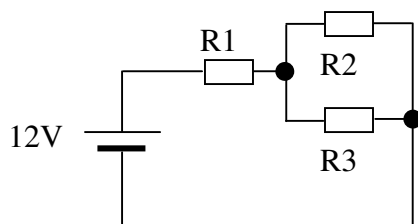
Testfragen

Ein Verbraucher bezieht einen Strom von 2A. Zwischen den Klemmen wird eine Spannung von 9V gemessen. Welchen Widerstand besitzt der Verbraucher? Welche elektrische Leistung nimmt er auf?

Wieviele Lampen von 5W dürfen bei einer Spannung von 24 V parallel beschaltet werden, wenn die Leitung mit 1 A abgesichert ist?

Eine Spannungsquelle beliefert einen ohmscher Verbraucher mit elektrischer Leistung. Nun sinkt die Klemmenspannung um 10%. Um wie viel % sinkt dabei die an den Verbraucher übertragene elektrische Leistung?

In nebenstehenden Schema betragen $R_1=8\ \Omega$ und $R_2=16\ \Omega$, $R_3=4\ \Omega$. Welche elektrische Leistung nimmt der Widerstand R_1 auf?



Magnetische Erregung

Die magnetische Feldstärke (auch magnetische Erregung genannt) kennzeichnet die Stärke eines Magnetfeldes. Sie ist die Ursache für den magnetischen Fluss.

Die Größe der magnetischen Feldstärke im Inneren einer stromdurchflossenen Spule ist abhängig von Stromstärke, Spulenlänge und Windungszahl. Wenn

- H magnetische Feldstärke innerhalb einer Spule,
- I Stärke des die Spule durchfließenden Stroms,
- N Windungszahl der Spule,
- l Länge der eisenlosen Spule, bzw. der Feldlinien im homogenen Feld,

dann gilt:

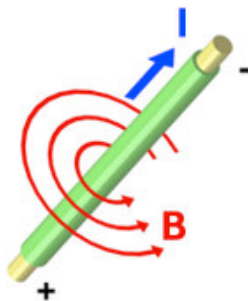
$$H = \frac{I \cdot N}{l}$$

Das Produkt $I \cdot N$ wird auch Ampèrewindungszahl genannt.

Bei einem geraden Leiter ist die Feldstärke entlang einer kreisförmigen Feldlinie konstant.

Wenn H magnetische Feldstärke außerhalb eines stromdurchflossenen geraden Leiters im Abstand r , I Stromstärke im Leiter, r Radius der kreisförmigen Feldlinie, dann gilt, weil $N = 1$ und $l = 2 \pi \cdot r$ ist:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$



Will man das Magnetfeld im Material oder seine kraftmässige Wirkung (Lorentz Kraft – Beispiel: Motoren) beschreiben, benötigt man die magnetische Feldstärke.

In einem Material oder in einem Körper kann die magnetische Feldstärke mit der magnetischen Feldkonstanten und mit der Permeabilität berechnet werden:

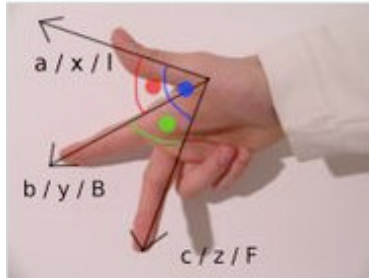
$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$$

mit $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} T \cdot m \cdot A^{-1}$.

Die Lorentzkraft

Die Lorentzkraft ist nach Hendrik Antoon Lorentz die Kraft, die auf elektrische Ladungen in elektromagnetischen Feldern wirkt.

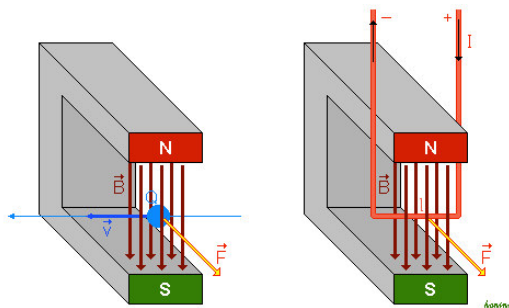
$$\vec{F}_L = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$



Wenn man die Länge von bei gleicher Stromstärke I verdoppelt, so sind auch doppelt so viele Ladungsträger dem Magnetfeld ausgesetzt, und somit ist die Lorentzkraft doppelt so groß.

Im speziellen Fall eines Leiters, der senkrecht zum Magnetfeld verläuft, ist $\sin\alpha = 1$. Damit lässt sich der Betrag der Lorentzkraft besonders einfach berechnen:

$$F = I \cdot l \cdot B$$



Induktionsspannung durch Änderung des magnetischen Flusses

Induktionen treten nicht nur auf, wenn sich elektrische Leiter in einem Magnetfeld bewegen, sondern auch, wenn sich das magnetische Feld verändert. Um dies zu verstehen muss man eine Modellgröße einführen: den magnetischen Fluss. Dieser ist für ein homogenes Feld definiert als:

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

Darin:

A = Fläche der Stromschleife, deren Raumorientierung durch ihren Normalenvektor angegeben ist

Für die induzierte Spannung gilt:

$$U_{ind} = -N \frac{d}{dt} \phi$$

Dabei ist n die Anzahl der Windungen der Spule. Wenn sich nun entweder das Magnetfeld ändert (schwächer o. stärker) oder die Fläche kleiner oder größer wird, ändert sich auch der magnetische Fluss. Diese Änderung abgeleitet nach der Zeit ergibt die induzierte Spannung. Der Faktor -n gibt zum einen die Vergrößerung der Spannung an, je mehr Windungen eine Spule im Feld hat, und zum anderen die Lenzsche Regel, die besagt, dass eine Induktion immer ihrer Ursache entgegen wirkt.

Selbstinduktion

Elektrische Leiter oder Spulen, die durch den Stromfluss ein Magnetfeld erzeugen (Elektromagnetismus), können durch diesen Vorgang auch in sich selbst wieder eine Spannung induzieren. Dieser Vorgang wird Selbstinduktion genannt. Die Polarität der selbst-induzierten Spannung ist dabei der Erregerspannung entgegengerichtet. Technisch wird die Selbstinduktion in vielfacher Weise benutzt.

Störende oder gefährliche Spannungsveränderungen in der Leitung, zum Beispiel durch Ab- oder Zuschalten großer Verbraucher oder durch Blitzeinschlag, können durch Einbau einer Drossel gedämpft werden. Bei Wechselstrom wachsen die Selbstinduktion und die bremsende Gegenspannung mit der Frequenz, da mit deren Zunehmen auch eine Zunahme der Magnetfeldänderung einhergeht. Die Selbstinduktion wird auch genutzt, um mit einer Zündspule den Zündfunken bei Ottomotoren oder die erforderliche hohe Zündspannung bei Leuchtstofflampen zu erzeugen. Die Wirkung entsteht, wenn der Stromfluss durch die Zündspule übergangslos unterbrochen wird. Das dann abrupt zusammenbrechende Magnetfeld erzeugt eine hohe Gegenspannung.

$$U_{ind} = -L \frac{d}{dt} I$$

wobei:

$$L = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot A \cdot \frac{N^2}{l}$$

Induktive Bauelemente wie Spulen speichern Energie in Form ihres Magnetfeldes. Das Magnetfeld einer Spule der Induktivität L, die vom Momentanwert des Stromes i durchflossen wird, enthält die Energie W:

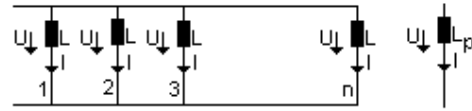
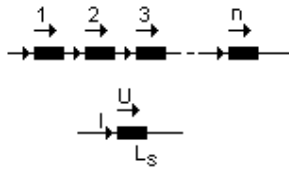
$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

Magnetische Feldstärke im Luftspalt

Wird der Eisenkern einer langen dünnen Spule durch einen nicht allzu breiten Luftspalt (Breite des Luftspalts = l_{Luft}) unterbrochen, so herrscht im Luftspalt dieselbe magnetische Feldstärke wie im Eisenkern. Sowohl im Eisen als auch im Luftspalt ist die Richtung des Vektors der magnetischen Feldstärke senk-recht zu den Grenzflächen zwischen Luftspalt und Eisen. Daraus ergibt sich, dass die magnetische Erregung im Luftspalt (H_{Luft}) um den Faktor der magnetischen Permeabilität (μ_r) grösser ist als die magnetische Erregung im Eisen (H_{Fe})

Die Induktivität

Die Masseneinheit für die Induktivität ist die Einheit H (Henry in Vs/A). Eine Spule hat eine Induktivität von 1 Henry, wenn bei gleichförmiger Stromsänderung von 1 Ampere in 1 Sekunde eine Selbstinduktionsspannung von 1 Volt entsteht.



In Serie:

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$

In Parallel:

$$L_T = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots}$$

Der RL Kreis

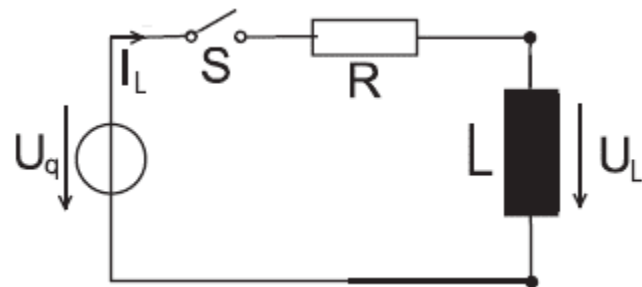
Der RL Kreis besteht aus einem Wirkwiderstand und einer Induktivität L, die in Serie geschaltet sind. Zum Zeitpunkt $t=0$ wird eine Gleichspannung an den RL-Kreis geschaltet.

Mit:

$$U_R(t) = R \cdot I(t)$$

$$U_L(t) = -L \frac{d}{dt} I(t)$$

$$I(t) = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L} \cdot t})$$



ist die Lösung der Differentialgleichung.

Aufgaben:

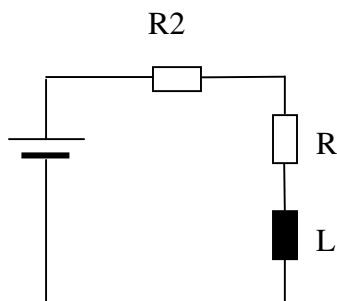
Welche Stromstärke muss ein Strom haben, der durch einen langen, geraden und dünnen Leiter fließt, damit in 20 cm Abstand eine magnetische Feldstärke von 1 herrscht?

Eine Ringspule mit Eisenkern und Windungszahl 100 wird von einem Strom von 2 A durchgeflossen. Welche magnetische Feldstärke herrscht im Innern der Spule, wenn die relative magnetische Permeabilität des Eisens 236 beträgt? Welcher magnetische Fluss herrscht in der Spule?

In der Spule mit 1200 Windungen wird innerhalb von 0,2 Sekunden die magnetische Feldstärke gleichmässig von 1.2T auf 0.1T gesenkt. Der Spulendurchmesser beträgt 1,2 cm. Welche induzierte Spannung tritt dabei auf, und in welcher Richtung fließt der Strom, wenn an den Spulenklemmen ein Widerstand angehängt ist?

Der Eisenkern einer langen, dünnen Spule (Länge = 10m, Durchmesser = 20cm) besitzt einen Luftspalt mit der Spaltbreite von 2cm. Im Luftspalt soll eine magnetische Feldstärke von 1,2T erzeugt werden. Welche Windungszahl muss die Spule haben, wenn eine Stromstärke von 10A (Gleichstrom) zur Verfügung steht. Die relative magnetische Permeabilität des Eisens wird zu 1000 angenommen.

An nebenstehenden RL-Kreis wird eine Gleichspannung von 12 V gehalten. Welche Zeitkonstante besitzt der RL-Kreis und welche Spannung wird beim R2 im stationären Zustand gemessen?



Testfragen

Die magnetische Erregung eines langen dünnen Leiters

Ist proportional zu der im Leiter fliessenden Stromstärke

Ist proportional zu r^{-2} (r =Abstand vom Leiter)

Ist proportional zu r^{-1} (r =Abstand vom Leiter)

Eine Spule mit 2000 Windungen hat einen Querschnittsfläche von 2 cm^2 . Im Innern dieser Spule erhöht sich die magnetische Feldstärke innerhalb von 2s gleichmässig von 0,2T auf 1T. Welche Spannung wird induziert?

An einen RL-Kreis wird eine Gleichspannung geschaltet. Die Zeitkonstante, mit der die Stromstärke ihren stationären Wert erreicht, ist umso länger, je

höher die Gleichspannung ist

niedriger die Gleichspannung ist

grösser der ohmsche Widerstand des RL-Kreises ist

kleiner der ohmsche Widerstand des RL-Kreises ist

grösser die Induktivität des RL-Kreises ist

kleiner die Induktivität des RL-Kreises ist

Die magnetische Feldstärke beträgt 0,1 T. Ein Leiter mit einem Strom von 10 A, der senkrecht zum Magnetfeld steht, besitzt eine Länge von 0,2m. In welche Richtung wirkt die Kraft und welchen Betrag besitzt sie?

Prinzip von Gleichstrommaschinen

Kleine Maschinen bis etwa 100 Watt mit Permanentmagnet können auch mit einem hohlen Rotor gebaut werden. Der Rotor ist eisenlos selbsttragend gewickelt. So wird das Trägheitsmoment des Rotors verringert und der Motor kann schneller beschleunigen.

Der Stator enthält auch ein Permanentmagnet. Das außenliegende Motorgehäuse aus Eisen bildet den notwendigen Rückschluss für den magnetischen Fluss des Stators.



Gleichstromgeneratoren

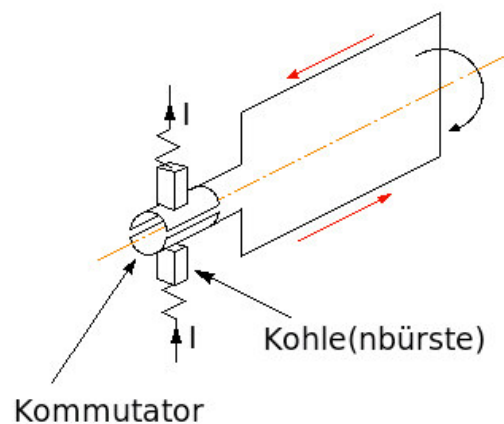
Im Anker des Gleichstromgenerators wird eine Wechselspannung induziert. Bei Anschluss der Leiterschleife an Schleifenringen auf der Läuferwelle kann die induzierte Spannung über Bürsten abgegriffen werden.

An den Bürsten kann eine stark pulsierende Gleichspannung abgenommen werden.

Bei neuzeitlichen Elektromotoren werden elektronische Ventile verwendet (Transistoren, Thyristoren, Triacs), die von einer elektronischen Rotorlageerkennung angesteuert werden (elektronische Kommutierung).

Übermäßige Funkenbildung am Kommutator muss vermieden werden, da die dabei entstehende Hitze zu einem sehr schnellen Verschleiß führen würde. Da man Anfang des 20. Jahrhunderts noch keine so guten Isolierwerkstoffe hatte wie heute, war man wegen der Funkenbildung an den Kommutatoren großer Elektromotoren gezwungen, die Frequenz des Bahnstroms auf $16 \frac{2}{3}$ Hz zu senken; so große Motoren mit 50 Hz (wie aus dem öffentlichen Netz) und Hochspannung zu betreiben, war damals nicht möglich.

Die Kohlebürste ist ein Gleitkontakt in Motoren und Generatoren. Sie besteht meistens aus Graphit und stellt über Schleifringe oder Kollektoren den elektrischen Kontakt zum rotierendem Teil der Maschine (Rotor) her. Früher verwendete man statt Graphit Pinselbürsten als Gleitkontakt, daher die Bezeichnung Bürste. Kohlebürsten werden von weltweit wenigen darauf spezialisierten Unternehmen entwickelt. Der Entwicklungsaufwand ist relativ hoch da die Zusammensetzung praktisch auf jeden Elektromotor hin abgestimmt werden muss.



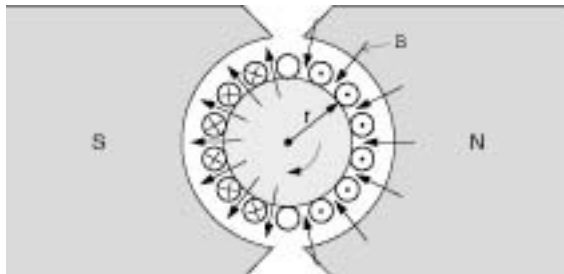
Aufgaben

Aufgabe 1

Zwei 10m lange und gerade Drähte laufen parallel zueinander in einem Abstand von 12 cm. In jedem Draht fließt ein Strom von 2A. Welche Kraft übt der Draht 1 auf den Draht 2 aus, falls die Ströme in die gleiche Richtung fließen? Welche Kraft übt der Draht 1 auf den Draht 2 aus, falls die Ströme in die entgegengesetzte Richtung fließen?

Aufgabe 2

Auf der Oberfläche eines zylinderförmigen Rotors eines Gleichstrommotors werden 200 Schleifen von einer Stromstärke von je 5A durchflossen. Diese Schleifen erfahren im Luftspaltfeld eine magnetische Feldstärke von 0,7T. Welches elektrische Antriebsdrehmoment wirkt auf den Rotorzylinder, wenn dessen Höhe 40cm und dessen Radius 10cm beträgt? (Die magnetische Feldstärke verläuft überall senkrecht zur Rotoroberfläche!)



$$DM = 2 \cdot F_L \cdot r$$

$$F_L = I \cdot l \cdot B = 5A \cdot 0,4m \cdot 0,7T = 1,40N$$

$$DM = 2 \cdot 1,40N \cdot 0,1m = 0,280J$$

Drehmoment, hervorgerufen durch alle 200 Schleifen

$$DM_{\text{tot}} = 200 \cdot DM = 200 \cdot 0,280J = 56J$$

Auf den Rotor wirkt ein elektrisches Antriebsdrehmoment von 56J.

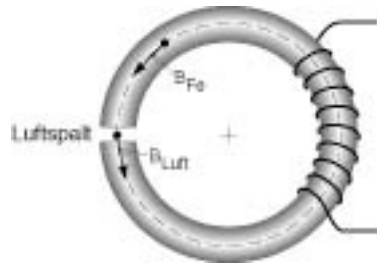
Testfragen

Bei der nebenstehenden torusförmigen Spule mit Luftspalt beträgt die magnetische Feldstärke im Eisen 1T. Welche der folgenden Aussagen ist oder sind richtig?

$$B_{\text{Luft}} \gg 1\text{T}$$

$$B_{\text{Luft}} = 1\text{T}$$

$$B_{\text{Luft}} \ll 1\text{T}$$



Die magnetische Feldstärke beträgt 0,05T. Ein Leiter (Stromstärke im Leiter = 20A), der senkrecht zum Magnetfeld steht, besitzt eine Länge von 0,1m. In welche Richtung (einzeichnen!) wirkt die Kraft und welchen Betrag besitzt sie?

Aufbau vom Gleichstrommotor

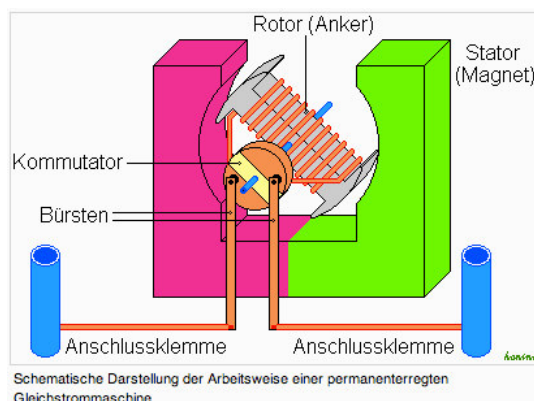
Eine oder mehrere Spulen auf dem Rotor werden in einem magnetischen Statorfeld so platziert, dass ein Drehimpuls ausgelöst wird. Die Wicklung des Rotor wird über den Kommutator angeschlossen. Die Kontakte (Bürsten) des Kommutators sind so aufgebaut, dass sie während der Drehung ständig die Polung der Ankerwicklung wechseln. Sie sind aus einem Material gefertigt, welches gut elektrisch leitet, sich im Betrieb leicht abreibt und sich somit selber "schmiert" (meistens enthalten sie Graphit u. Kupferstaub). Durch Umkehrung (Rotor wird bewegt) erhält man einen Generator. Beim Generator werden nur permanent und fremderregte Bauweisen benutzt.

Das allgemeine Motorverhalten wird durch die Erzeugung und Feldstärke des Statorfeldes und die Eigenschaften der Rotorwicklung bestimmt.

Permanenterregte Gleichstrommaschine

Schematische Darstellung der Arbeitsweise einer permanenterregten Gleichstrommaschine.

Das magnetische Statorfeld wird im einfachsten Fall durch einen Permanentmagnet erzeugt.



Elektrisch erregte Gleichstrommaschine

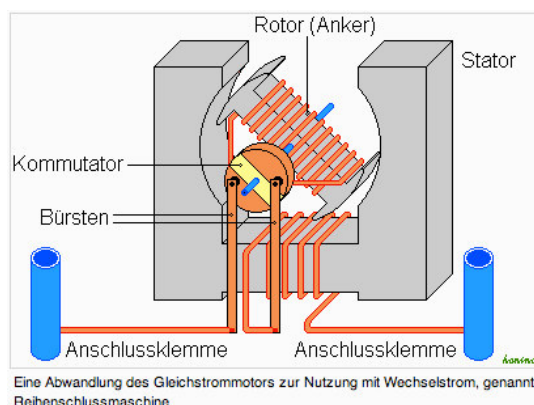
Wird das Statorfeld durch einen Elektromagnet erzeugt spricht man **von elektrisch erregter Bauweise**.

Nach der Art der Schaltung von Rotor und Statorwicklung unterscheidet man:

Reihenschlussmaschine

Eine Abwandlung des Gleichstrommotors zur Nutzung mit Wechselstrom, genannt Reihenschlussmaschine

Auch Hauptschlussmaschine genannt. Hier sind Erregerwicklung und Ankerwicklung in Reihe geschaltet. Dadurch wechseln Erregerfeld und Ankerstrom ihre Richtung synchron, so dass eine Speisung mit Wechselstrom möglich wird. Solche Maschinen wurden als Bahnantriebe (siehe Einphasenreihenschlussmotor) in Wechselstromnetzen eingesetzt. Unter dem

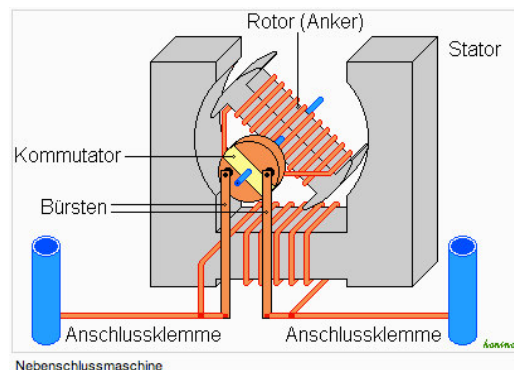


Begriff Universalmotor oder Allstrommotor werden die Antriebe von Haushaltsmaschinen, Bohrmaschinen etc. zusammengefasst.

Die Drehzahl von Reihenschlussmotoren ist stark lastabhängig. Sinkt das abgegebene Drehmoment, so steigt wegen des geringeren Stroms und der damit einhergehenden Feldschwächung die Drehzahl des Ankers. Das kann so weit führen, dass der Motor "durchgeht", was bedeutet, dass sich der Motor wegen der auftretenden Fliehkräfte selbst zerstört. Deshalb sollten Reihenschlussmotoren mit einer Grundlast (Motorlüfter, Getriebe etc.) betrieben werden.

Nebenschlussmaschine

Bei der Nebenschlussmaschine sind Erreger- und Ankerwicklung parallel geschaltet. Ein Wechselspannungsbetrieb ist nicht üblich, da hierfür Erreger- und Ankerstrom in Phase sein müssten, d.h. Anker- und Erregerwicklung gleiche Induktivität (und Widerstand) haben müssen. Oft wird nicht zwischen Nebenschluss- und fremderregter Maschine unterschieden und dabei übersehen, dass eine Verringerung der Ankerspannung zu einer Feldschwächung führt. **Die Drehzahl eines Motors mit Nebenschlussverhalten ist nahezu lastunabhängig.** Nebenschlussmotoren können bei Unterbrechung des Erregerkreises durchgehen, da beim Zusammenbrechen des Erregerfeldes die Drehzahl und Stromaufnahme bei gleicher Versorgungsspannung drastisch ansteigt.



Spezielle Effekte

Ankerrückwirkung

Da der Anker stromdurchflossen ist, bildet sich auch um diesen ein magnetisches Feld. Dieses verstärkt das Hauptfeld auf der einen Seite des Leiters und schwächt es auf der anderen. Insgesamt führt dies dazu, dass sich der neutrale Bereich, in dem die Polung des Stromes umgeschaltet werden muss, etwas verspätet, d.h. in Drehrichtung verschiebt.

Eine Induktionsspannung liegt zu dem Zeitpunkt des Umschaltens an den Kohlebürsten an und es kommt zur Funkenbildung (Bürstenfeuer). In Anlagen, die ein gleichmäßiges Drehmoment verlangen und nur in einer Laufrichtung betrieben werden (z.B. starke Lüfter) kann das Bürstenfeuer verringert werden, indem der Bürstenträger leicht verdreht montiert wird, und dann im Betriebszustand doch senkrecht zu den effektiven Feldlinien umschaltet. Stattdessen werden in großen Maschinen Wendepolwicklungen und Kompensationswicklungen eingesetzt, die die Feldlinien gleichsam in die ideale Lage "zurückbiegen".

Gegenspannung

Der Rotor dreht sich im Motor innerhalb des Statorfeldes. Nach dem Generatorprinzip wird so in der Spule eine Spannung induziert. Diese induzierte Spannung wirkt der angelegten Netzbetriebsspannung und somit auch dem Rotorstrom entgegen, daher der Name Gegenspannung.

Rotorstrom = (Betriebsspannung - Gegenspannung) / Rotorwiderstand

Die Gegenspannung ist abhängig von der Drehzahl des Rotors. Bei Motorstillstand gibt es also keine Gegenspannung. Deshalb liegt an der Rotorspule die volle Betriebsspannung. Der Widerstand der Rotorspulen ist sehr klein und somit der Strom im Moment des Einschaltens sehr groß, ohne Begrenzung des Anlaufstromes würde also die Rotorspule zerstört oder das Netz überlastet werden:

Der Anlaufwiderstand wird in Reihe zur Rotorspule geschaltet. Nach dem Hochlaufen wird dann der Anlaufwiderstand bis auf Null reduziert.

Mathematische Grundlagen

Die Gleichungen des magnetischen Systems:

$$L_A \frac{di_A}{dt} = -R_A i_A - u_{ind} + u_A \quad (1)$$

$$L_E \frac{di_E}{dt} = -R_E i_E + u_E \quad (2)$$

$$u_{ind} = c_A \cdot \psi_E \cdot \omega$$

$$\psi_E = \frac{1}{N_E} L_E i_E$$

Darin ist

i_A der Ankerstrom, u_A die Ankerspannung, R_A der Wicklungswiderstand, L_A die Induktivität der Ankerwicklung, u_E die Erregerspannung, i_E der Erregerstrom, der Wicklungswiderstand R_E und die Induktivität L_E der Erregerwicklung, ω die Winkelgeschwindigkeit des Rotors, u_{ind} die im Anker induzierte Spannung, ψ_E der Erregerfluss.

Die Gleichungen des mechanischen Systems mit der Annahme, dass der Erregerkreis nicht gesättigt ist:

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega \quad (3)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = c_A \psi_E i_A - \tau_L \quad (4)$$

Darin ist

J das Massenträgheitsmoment des Ankers und aller damit starr verbundenen Massen, ϕ der Drehwinkel des Ankers, ω die Winkelgeschwindigkeit des Ankers, τ_L die Summe aller Lastmomente am Anker.

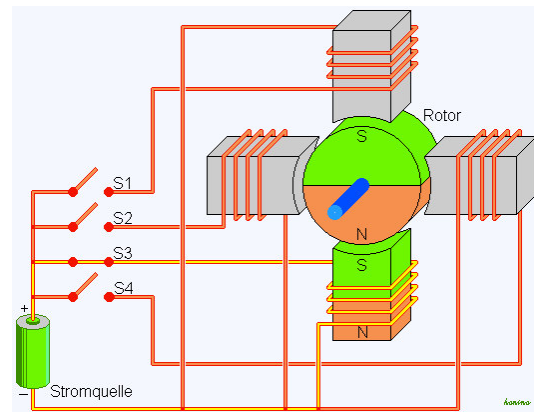
Aufgaben

Ein Gleichstrommotor hat einen Ankerwiderstand von 1 Ohm. Bei $U_A=230$ V Ankerspannung fließt der Ankerstrom $I=2$ A. Ermitteln Sie die wirksame Gegenspannung U .

Der Schrittmotor

Ein Schrittmotor (engl. stepper motor) ist ein motor, bei dem der Rotor durch ein gesteuertes schrittweise rotierendes elektromagnetisches Feld der Statorspulen (nichtdrehbarer Motorteil) um einen minimalen Winkel (Schritt) oder sein Vielfaches gedreht werden kann. Schrittmotoren existieren auch in Form von Linearmotoren.

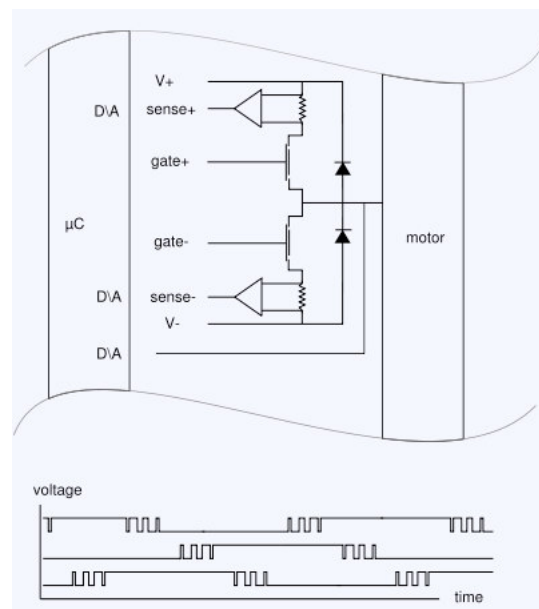
Man unterscheidet den Schrittmotor nach seiner Bauform in Reluktanz- und Permanentmagnet-Schrittmotor, wobei man beide Formen auch zu einem Hybridschrittmotor kombinieren kann.



Bei eingeschaltetem Strom fließt der magnetische Fluss durch den Weicheisenkern des Rotors. Die Drehbewegung des Rotors kommt zustande, weil vom gezahnten Stator der nächstliegende Zahn des Rotors angezogen wird, da sich so der magnetische Widerstand verringert.

Beim Permanentmagnetschrittmotor besteht der Stator aus Weicheisen und der Rotor aus Dauermagneten, die abwechselnd einen Nord- und einen Südpol aufweisen. Mit dem Stator-Magnetfeld richtet man den dauermagnetischen Rotor so aus, dass eine Drehbewegung entsteht.

Typische Anwendungsgebiete sind Drucker, vor allem Matrixdrucker, oder der Antrieb des Schreib-/Lesekopfes in einem Diskettenlaufwerk. Schrittmotoren folgen exakt dem außen angelegten Feld und können so ohne Sensoren zur Positionsrückmeldung (Encoder, Drehgeber oder ähnliches) betrieben werden (Synchronmotorverhalten). Daher können sie im Gegensatz zu Servomotoren gesteuert betrieben werden. Servos müssen auf Position geregelt werden. Wird ein Schrittmotor jedoch stark belastet oder zu stark beschleunigt bzw. verzögert, kann es vorkommen, dass der Rotor nicht mehr exakt dem Feld folgt und Schritte übersprungen werden. Bei längerem Betrieb können sich diese Positionierungsfehler dann aufsummieren und eine ungenaue Positionierung bewirken. Dies kann bei zyklischen Bewegungen oder Rotationsbewegungen dadurch behoben werden, dass die Position des Motors bei jeder Umdrehung oder Zyklus mit einem externen Positionsimpuls eines Sensors in der Grundstellung abgeglichen wird.



Schrittmotoren können bis ca. 1 kW wirtschaftlich eingesetzt werden.

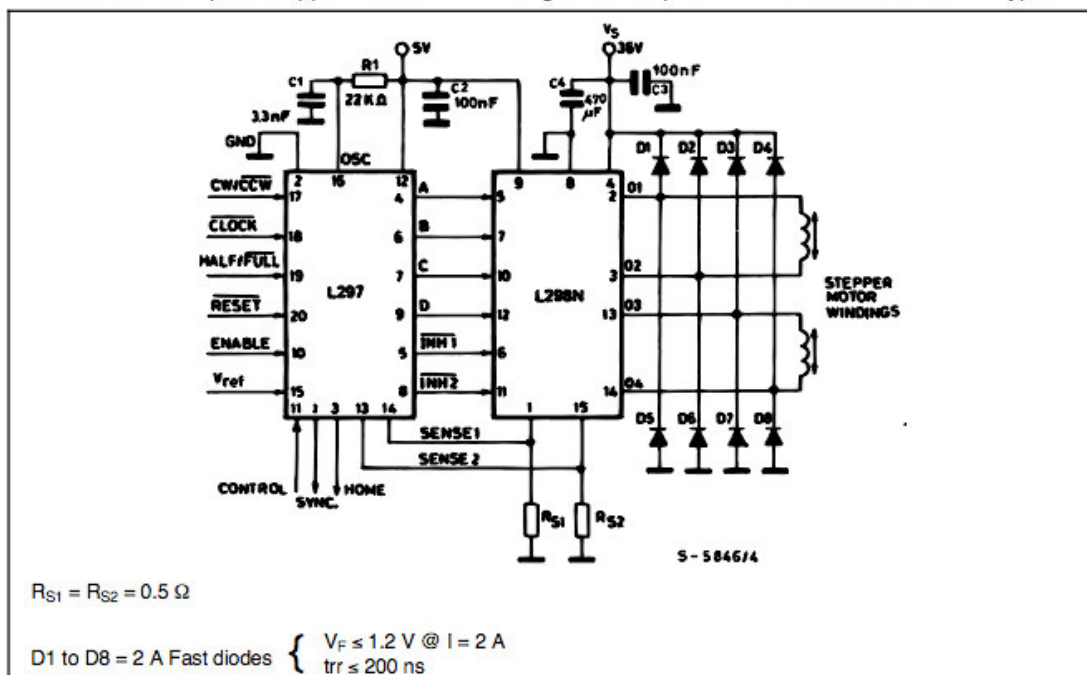
Ein Motor, bei dem beispielsweise 12 V und 0,5 A angegeben sind, wird in der Praxis nur bei wirklich sehr niedrigen Drehzahlen seine Kraft, also sein Drehmoment, erreichen. Je höher die Drehzahl, desto schwächer wird der Motor. Das kann soweit gehen, dass schon das geringste Hindernis den Motor Schritte verlieren lässt oder dass der Motor bei höheren Drehzahlen gar nicht mehr anläuft.

Da der Motor ständig umgepolt wird, wird durch diese Induktivität eine Art Gegenstrom erzeugt. Dies hat zur Folge, dass der eigentliche Strom bei höheren Drehzahlen nicht mehr erreicht wird. Je schneller sich der Motor dreht, desto weniger Strom fließt. Verständlich, dass dadurch die Leistung reduziert wird. Das Problem wird gelöst, indem eine geregelte und höhere Spannung angewendet wird.

Die Regelung wird mit einer hohen Spannung (oft bis zu 30 oder 40 Volt) versorgt. Aber die Regelung sorgt dafür, dass immer nur der eingestellte Nennstrom, in unserem Beispiel 0,5 A, zum Motor gelangt. Auf diese Art und Weise wird der Motor, ohne Schaden zu nehmen, immer mit der optimalen Spannung versorgt. In der Tat werden heute alle Schrittmotoren, die etwas Leistung bringen müssen, z.B. bei Drehmaschinen, auf diese Art angesteuert.

Die hier abgebildete Schaltung ist quasi der Standard für Schrittmotoren (Datenblättern von L298):

This circuit drives bipolar stepper motors with winding currents up to 2 A. The diodes are fast 2 A types.



Literatur

Hans Otto Seinsch: Grundlagen elektrische Maschinen und Antriebe, B. G. Teubner Stuttgart 1999, ISBN 3-519-06164-3

Albach, Manfred: „Grundstudium der Elektrotechnik“, Bände 1–2, Pearson Studium 2005