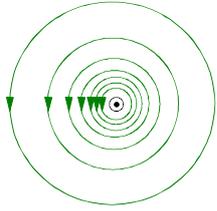


## 1. Elektromagnetismus

Um einen stromdurchflossenen Leiter bildet sich ein Magnetfeld aus. Die magnetischen Feldlinien verlaufen kreisförmig um den Leiter:



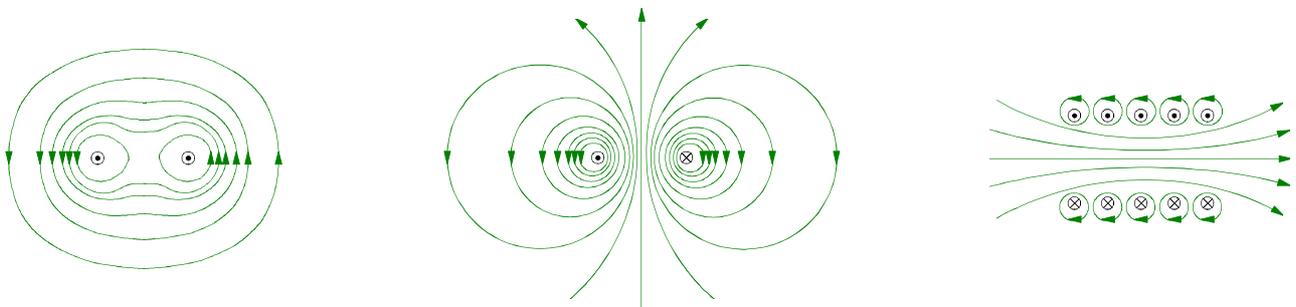
Im Schnittbild wird die Richtung des Stroms durch einen Punkt oder ein Kreuz gekennzeichnet:

- ⊗ : Strom fließt in die Ebene hinein.
- ⊙ : Strom fließt aus der Ebene heraus.

### Rechte Hand-Regel:

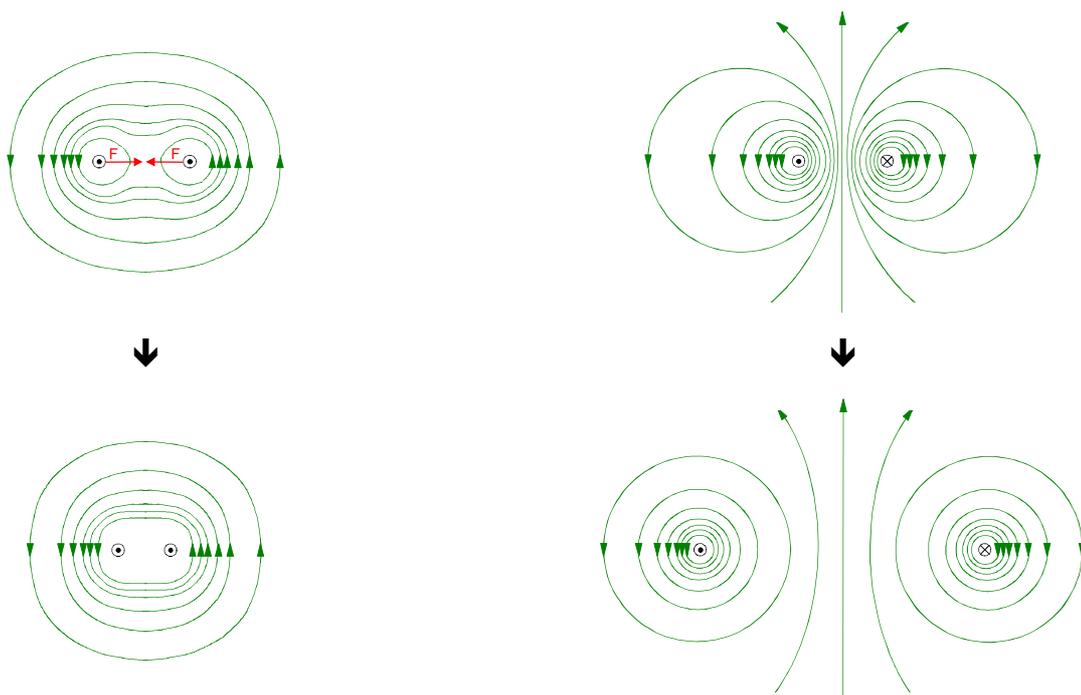
Zeigt der Daumen der rechten Hand in die technische Stromrichtung, geben die angewinkelten Finger die Richtung der magnetischen Feldlinien an.

Bei parallelen Leitern überlagern sich die Magnetfelder. Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule ähnelt dem eines Stabmagneten. Es lässt sich aber mit Hilfe des Stromes beliebig an- und abschalten → **Elektromagnet**

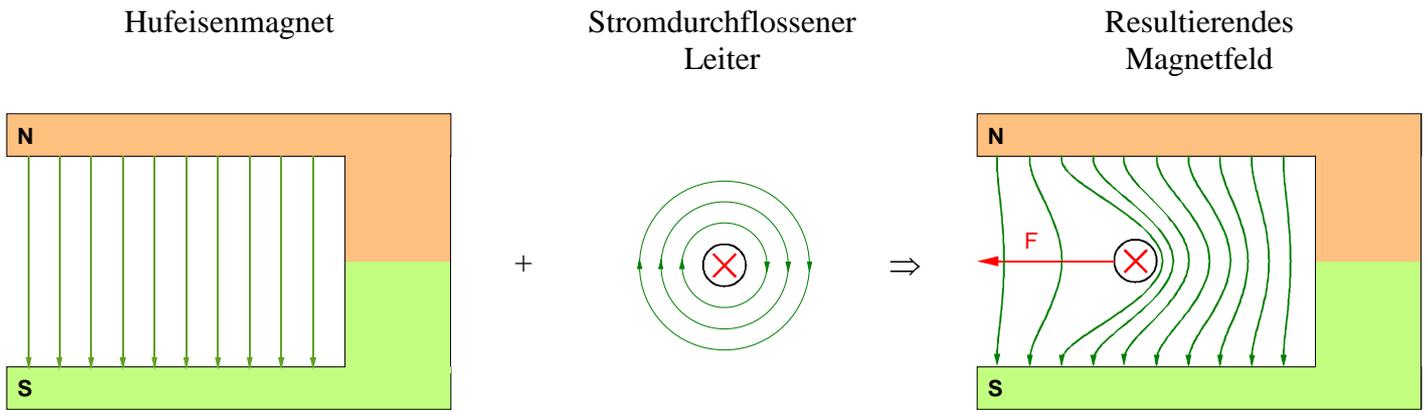


## 2. Kraftwirkungen im Magnetfeld

Magnetfelder streben nach einer homogenen Verteilung des magnetischen Flusses (→ homogenes Magnetfeld). Eine inhomogene Verteilung der Feldlinien bewirkt daher eine Leiterbewegung, die der Inhomogenität entgegenwirkt. Man kann sich die Feldlinien als gespannte Gummiringe vorstellen, die nach Entspannung streben:

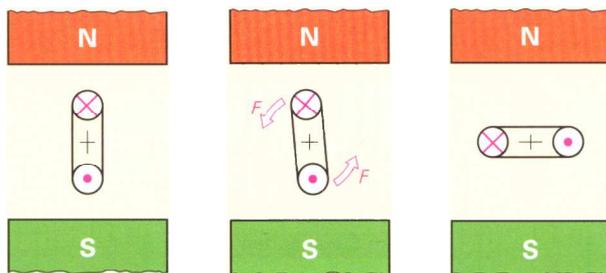


Die Überlagerung des **äußeren Magnetfeldes** eines Hufeisenmagneten und des **inneren Magnetfeldes** eines stromdurchflossenen Leiters führt zu einer Feldstärkung zwischen dem Leiter und dem Steg des Magneten und zu einer Feldschwächung zwischen dem Leiter und der offenen Seite des Magneten. Dadurch entsteht eine Kraftwirkung, die den Leiter aus dem Hufeisenmagneten herausdrückt.

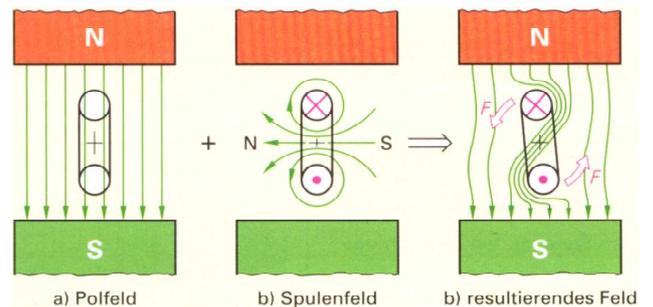


Eine in Richtung des Magnetfeldes ausgerichtete stromdurchflossene Spule dreht sich im Magnetfeld leicht über  $90^\circ$  hinaus und dann zurück auf  $90^\circ$ . Auch hier lässt sich die Kraftwirkung mit Hilfe des resultierenden Feldlinienbildes erklären:

Beobachtung:



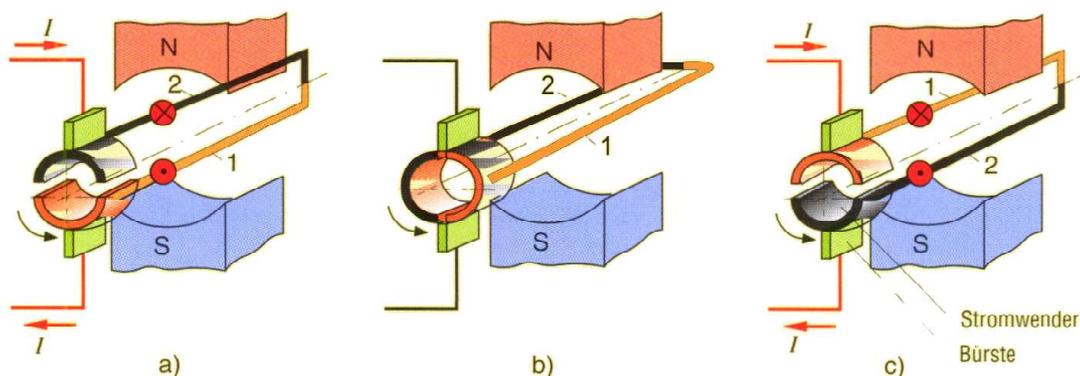
Erklärung:



Anwendung:

Der **Gleichstrommotor** besteht aus einem unbeweglichen äußeren Teil, dem **Stator** (= **Ständer**) und einem drehbar gelagerten inneren Teil, dem **Rotor** (= **Läufer** bzw. **Anker**). Der Stator besteht aus einem Elektromagneten oder bei kleineren Motoren einem Permanentmagneten. Der Rotor ist ein Elektromagnet.

Damit der Rotor nicht bei  $90^\circ$  stehen bleibt, wird ein sogenannter **Stromwender** (= **Kommutator** bzw. **Kollektor**) eingesetzt. Dieser sorgt dafür, dass sich die Stromrichtung im Rotor bei Überschreiten der  $90^\circ$  umkehrt.



### 3. Gleichstrommotoren

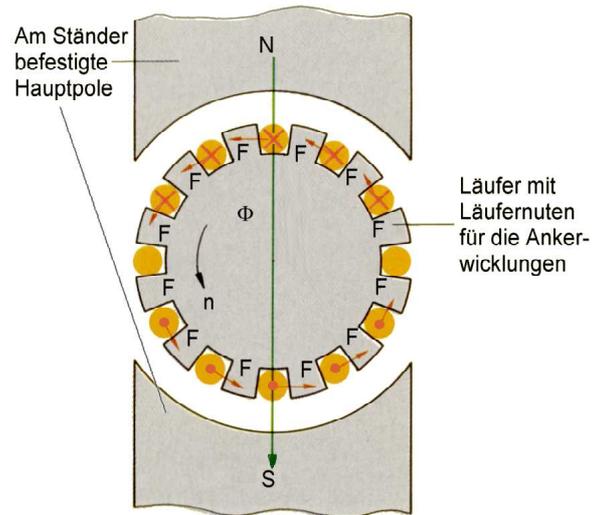
#### 3.1 Motoraufbau

Die in einer Leiterschleife entstehende Kraftwirkung ist sehr gering und abhängig von der aktuellen Lage der Leiterschleife:

- auf der Achse der **Hauptpole** (= Pole des am Stator befindlichen Magneten) → Kraftwirkung maximal
- in der **neutralen Zone** (= senkrecht zur Achse der Hauptpole) → keine Kraftwirkung

Um ein gleichmäßiges und hohes Drehmoment zu erhalten werden mehrere Leiterschleifen als drehbare Spule angeordnet.

Stromdurchflossene Leiter umgeben sich mit einem Magnetfeld. Bei Änderung der Stromstärke im Anker (Drehzahlregelung) oder Umpolung (Drehrichtungsumkehr) ändert sich entsprechend dieses Magnetfeld.

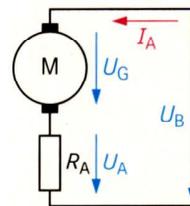


Änderungen des magnetischen Flusses haben wiederum Induktionsspannungen zur Folge (Induktionsgesetz), die ihrer Ursache entgegenwirken (Lenzsche Regel). Diese machen sich als **Gegenspannung**  $U_G$  in den Ankerwicklungen und in Form von **Wirbelströmen** im umgebenden Eisen des Läufers bemerkbar.

#### Gegenspannung:

- der Betriebsspannung entgegengerichtet
- im ersten Moment des Anlaufs gleich Null (Ankerleiter noch im Stillstand)
- steigt mit größer werdender Drehzahl ( $U_G \sim n$ )
- sinkt mit steigender Motorbelastung (da hierdurch die Drehzahl sinkt)
- stets kleiner als die Betriebsspannung  $U_B$  ( $U_G = U_B \Rightarrow I_A = 0 \Rightarrow$  kein Ankerfeld)

Ersatzschaltbild:

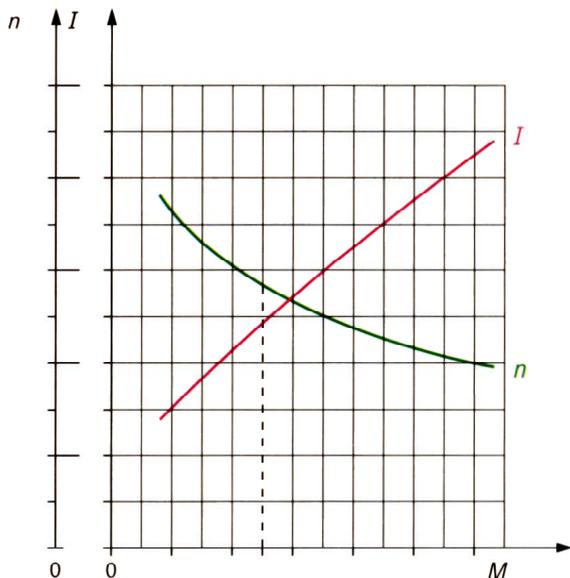


$$\Rightarrow U_G = U_B - U_A$$

$$\Leftrightarrow U_G = U_B - R_A \cdot I_A$$

Verhalten bei steigender Motorbelastung:  $M_{\text{Welle}} \uparrow \Rightarrow n \downarrow \Rightarrow U_G \downarrow \Rightarrow I_A \uparrow \Rightarrow \Phi_A \uparrow \Rightarrow M_{\text{Motor}} \uparrow$

Bei Belastung wird der Motor aus der Leerlaufdrehzahl abgebremst. Durch die fallende Drehzahl steigt aber nun die vom Motor entwickelte Kraft. Daher stellt sich abhängig von der Belastung eine stabile geringere Belastungsdrehzahl ein:



### Gegenspannung und Ankerstrom

Ein Gleichstrommotor für 220 V hat einen Ankerwiderstand von  $0,5 \Omega$ .

- a) Welche Gegenspannung entwickelt der Motor, wenn die Ankerstromstärke im Leerlauf 2 A und unter Bemessungsbelastung 30 A beträgt?  
 b) Wie groß ist die Stromstärke in der Ankerwicklung im Moment des Anlaufes?

Geg.:  $U_B = 220 \text{ V}$ ;  $R_A = 0,5 \Omega$ ;  $I_{A\text{Leer}} = 2 \text{ A}$ ;  
 $I_{A\text{Bel}} = 30 \text{ A}$

Ges.:  $U_{G\text{Leer}}$ ;  $U_{G\text{Bel}}$  und  $I_{A\text{Anlauf}}$

a)  $U_{G\text{Leer}} = U_B - R_A \cdot I_A$ ;  $U_{G\text{Leer}} = 220 \text{ V} - 0,5 \Omega \cdot 2 \text{ A}$   
 $U_{G\text{Leer}} = 219 \text{ V}$

$U_{G\text{Bel}} = U_B - R_A \cdot I_A$ ;  $U_{G\text{Bel}} = 220 \text{ V} - 0,5 \Omega \cdot 30 \text{ A}$   
 $U_{G\text{Bel}} = 205 \text{ V}$

b)  $U_{G\text{Anlauf}} = U_B - R_A \cdot I_A$ ;  $I_A = \frac{U_B - U_G}{R_A}$

Da im Anlauf keine Gegenspannung herrscht ( $U_G = 0$ ), gilt  $I_A = \frac{220 \text{ V} - 0 \text{ V}}{0,5 \Omega}$ ;  $I_A = 440 \text{ A}$

Um sehr hohe Anlaufströme zu vermeiden, werden mehrstufige Anlasswiderstände verwendet, die in Reihe zur Ankerwicklung geschaltet werden. Nach dem Anlaufen werden diese nacheinander wieder aus dem Stromkreis entfernt.

### Anlasswiderstand

Für den Motor aus dem Beispiel in der linken Spalte soll der Anlasswiderstand so berechnet werden, dass die 1,5fache Bemessungsstromstärke ( $I_{\text{max}} = 1,5 \cdot I_A$ ) im Einschaltmoment nicht überschritten wird.

Geg.:  $U_B = 220 \text{ V}$ ;  $R_A = 0,5 \Omega$ ;  $I_A = 30 \text{ A}$

Ges.:  $R_{\text{Anl}}$

$I_{\text{max}} = 1,5 \cdot I_A$ ;  $I_{\text{max}} = 1,5 \cdot 30 \text{ A}$ ;  $I_{\text{max}} = 45 \text{ A}$

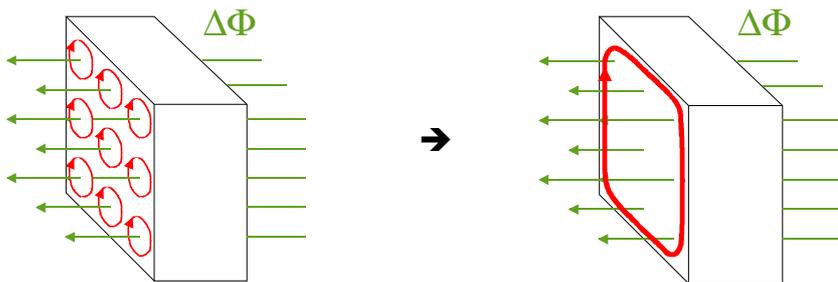
$R_{\text{ges}} = R_{\text{Anl}} + R_A$ ;  $R_{\text{Anl}} = R_{\text{ges}} - R_A$

$R_{\text{ges}} = \frac{U_B}{I_{\text{max}}}$ ;  $R_{\text{ges}} = \frac{220 \text{ V}}{45 \text{ A}}$ ;  $R_{\text{ges}} = 4,89 \Omega$

$R_{\text{Anl}} = R_{\text{ges}} - R_A$ ;  $R_{\text{Anl}} = 4,89 \Omega - 0,5 \Omega$ ;  $R_{\text{Anl}} = 4,39 \Omega$

### Wirbelströme:

Bei Änderung des magnetischen Flusses entstehen um die magnetischen Feldlinien einzelne Ströme.

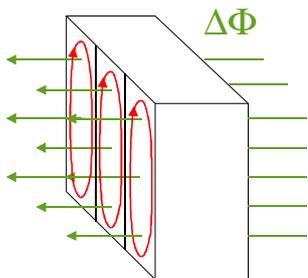


Die Abbildung zeigt, dass sich die einzelnen Wirbelströme im Innern größtenteils gegenseitig aufheben. An den Randzonen bilden sich aber große Stromwirbel aus.

Kleiner Widerstand → Großer Strom

Großer Strom → Starke Verlustwärme, starke Schwächung des Ankerquerfeldes

Das die Ankerwicklungen tragende Paket ist daher aus gegeneinander isolierten Elektrolechen (ca. 0,5 mm) aufgebaut (**Lamellierung**), um die entstehenden Wirbelströme gering zu halten. Der induzierten Spannung wird aufgrund des viel geringeren Leiterquerschnitts ein höherer Widerstand entgegengesetzt.



Größerer Widerstand → Kleinerer Strom

Kleinerer Strom → Geringere Verlustwärme, geringere Schwächung des Ankerquerfeldes

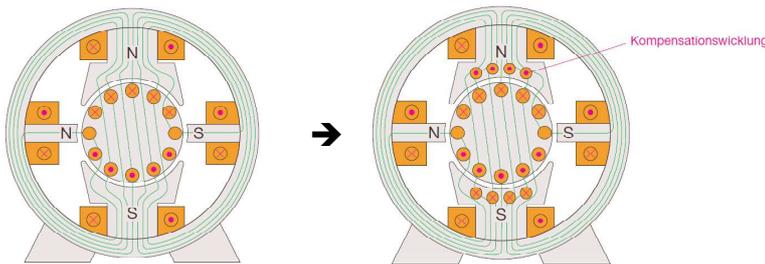
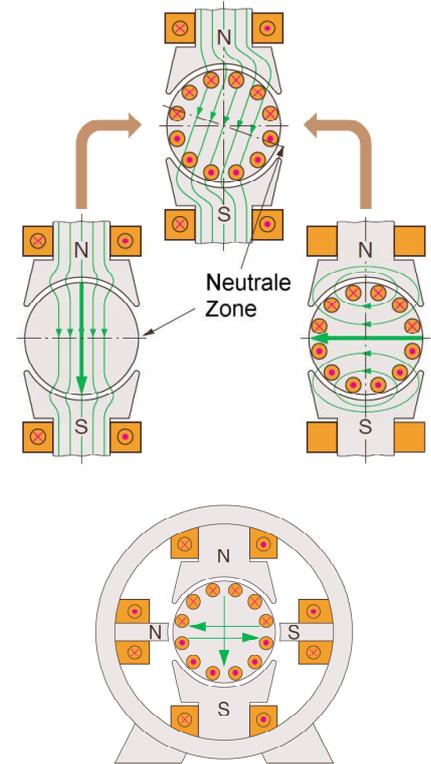
## Ankerrückwirkung:

In der technischen Umsetzung des Stromwenderkonzeptes sind die Bürsten in der neutralen Zone angebracht.

Beim Lauf des Motors verschiebt sich durch die Überlagerung von Erregerfeld und Ankerquerfeld diese aber. Diese Verschiebung ist vom Ankerstrom abhängig, da dieser den magnetischen Fluss im Ankerquerfeld bestimmt.

Da sich die Bürsten nun außerhalb der neutralen Zone befinden, schließen sie jeweils kurzzeitig zwei Stromwenderlamellen, zwischen denen induktionsbedingt eine Spannungsdifferenz besteht, kurz. Hierdurch entsteht das sogenannte **Bürstenfeuer**, das zu einer starken Erwärmung und damit zu hohem Verschleiß von Bürsten und Stromwender wie auch zu Funkstörungen führt.

Zur Vermeidung des Bürstenfeuers werden **Wendepolwicklungen** angebracht. Ihr Feld steht senkrecht zum Erregerfeld. Die Wendepolwicklungen werden vom Ankerstrom durchflossen. Ihr Feld ist damit genauso groß wie das Ankerfeld. Durch ihre Lage wirken sie dem Ankerfeld entgegen. Sie heben damit seine Wirkung für das Gesamtfeld auf.

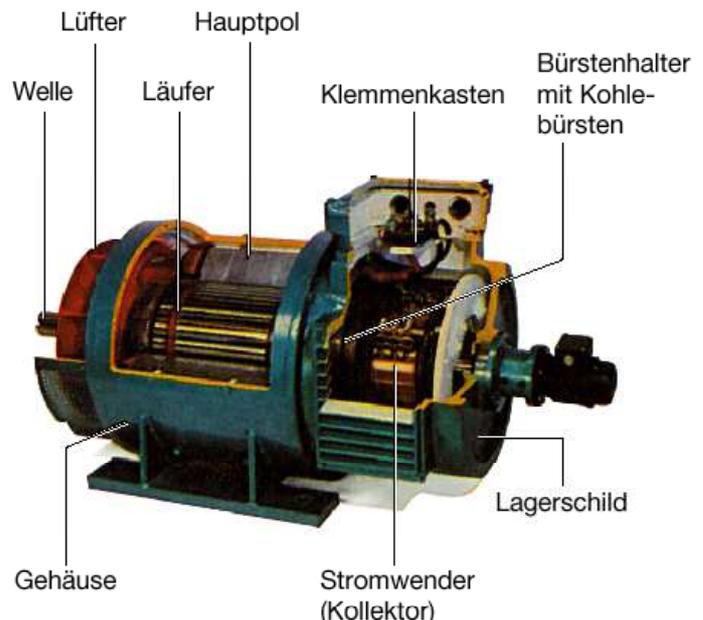


Der sich ergebende verzerrte Verlauf des Magnetfeldes im Bereich der Hauptpole ist Ursache für verschiedene Spannungen in den Leitern der Ankerspule. Das führt zu Lichtbögen zwischen den Stegen. Das Feld der **Kompensationswicklungen** hebt die Wirkung des Ankerfeldes direkt unter den Hauptpolen auf, weil das Kompensationsfeld entgegen dem Ankerfeld gerichtet ist. Auch die entsprechenden Spulen werden vom Ankerstrom durchflossen. Sie ändern sich daher bei Belastungsänderungen entsprechend.

## Eigenschaften von Gleichstrommotoren:

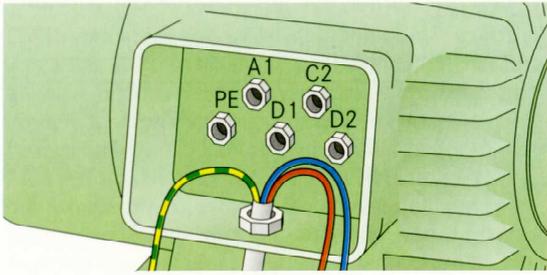
- großes Anzugsmoment
- hohe Drehzahlen
- stufenlose Drehzahlregelung
- Drehrichtungsumkehr durch Umpolung der Ankerwicklung

### Bestandteile des Gleichstrommotors



### 3.2 Motorschaltungen

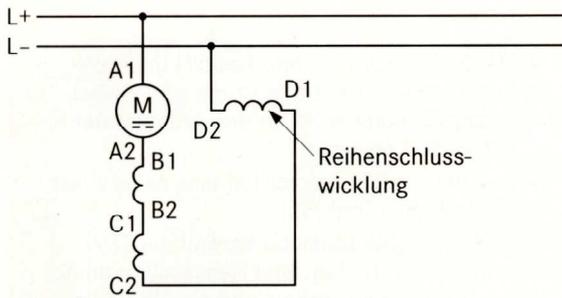
Im **Klemmenkasten** sind der Anschluss für den Schutzleiter und Anschlüsse für die verschiedenen Motorwicklungen zu finden. Je nach Anschluss lassen sich verschiedene Motorschaltungen realisieren:



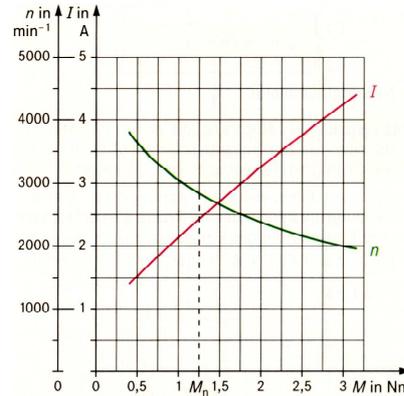
Klemmen	Bezeichnung	Darstellung
A1 - A2	Ankerwicklung	
D1 - D2	Reihenschlusswicklung	
E1 - E2	Nebenschlusswicklung	
B1 - B2	Wendepolwicklung	
C1 - C2	Kompensationswicklung	
F1 - F2	fremderregte Feldwicklung	

#### Reihenschlussmotor:

Liegt die Erregerwicklung in Reihe zur Ankerwicklung, wird sie als Reihenschlusswicklung und der Motor als **Reihenschlussmotor** bezeichnet.



#### Kennlinien:



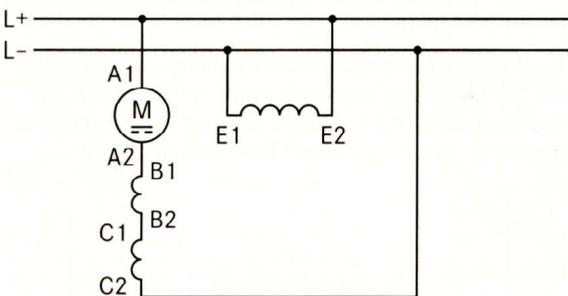
Der Reihenschlussmotor hat eine stark lastabhängige Drehzahl. Man spricht von einer „weichen Drehzahlkennlinie“. Unbelastet steigt die Drehzahl auf sehr hohe Werte an. Der Motor kann dadurch „durchgehen“ und zerstört werden.

Bei steigender Belastung sinkt zwar die Drehzahl, es steigt aber der Ankerstrom und somit auch der Erregerstrom. Hieraus resultiert ein starkes Magnetfeld und ein großes Drehmoment ( $M_{\text{Welle}} \uparrow \Rightarrow n \downarrow \Rightarrow U_G \downarrow \Rightarrow I_A \uparrow \Rightarrow \Phi_A \uparrow \Rightarrow M_{\text{Motor}} \uparrow$ ). Anlaufmoment:  $U_g = 0 \Rightarrow I_{\text{Anker}} = I_{\text{Erreger}} \text{ groß} \Rightarrow \Phi_{\text{Anker}} \text{ und } \Phi_{\text{Erreger}} \text{ groß} \Rightarrow M_{\text{Motor}} \text{ groß}$

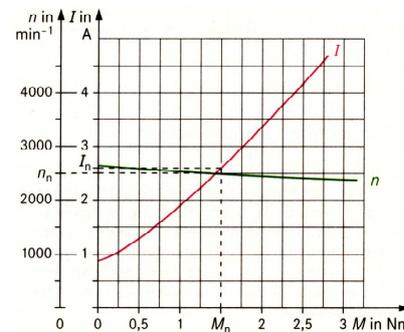
➔ Reihenschlussmotoren dürfen nie ohne Last betrieben oder über Keilriemen mit der Last verbunden werden. Sie eignen sich besonders für den Anlauf unter Schwerlast.

#### Nebenschlussmotor:

Werden die Erregerspule und die Ankerspule parallel angeschlossen, wird der Motor als **Nebenschlussmotor** bezeichnet.



#### Kennlinien:



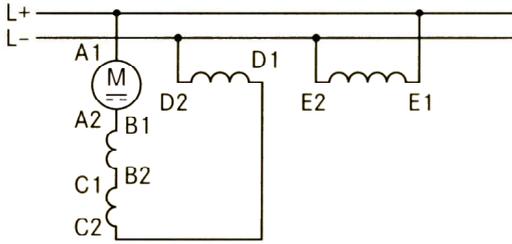
Erregerstrom und somit Erregerfeld eines Nebenschlussmotors sind von der Belastung unabhängig. Dies führt einerseits auch bei ändernder Belastung zu einer nahezu konstanten Drehzahl („harte Drehzahlkennlinie“).

Andererseits fehlt die Feldstärkung im Erreger bei höheren Lasten. Hierdurch ist das abgegebene Drehmoment kleiner als beim Reihenschlussmotor.

➔ Nebenschlussmotoren eignen sich besonders dort, wo konstante Drehzahlen erforderlich sind. Zum Anlauf unter Schwerlast sind sie weniger geeignet.

## Doppelschlussmotor:

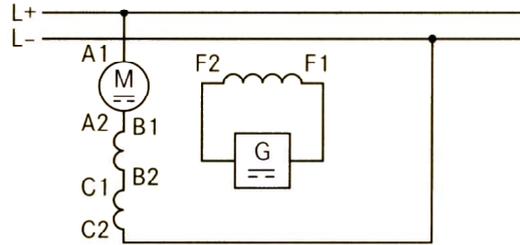
Dieser Motor hat eine Nebenschluss- und eine Reihenschlusswicklung. Er verbindet die positiven Eigenschaften der Reihenschluss- mit denen der Nebenschlussmaschine. Er hat demnach ein großes Anzugsmoment und eine relativ konstante Drehzahl.



## Fremderregter Motor:

Die Erregerwicklung ist an eine zweite („fremde“) Spannungsquelle angeschlossen.

Da auch hier in der Erregerwicklung die Spannung konstant bleibt, ist die Drehzahl bei Belastungsänderung nahezu konstant. Fremderregte Gleichstrommotoren verhalten sich daher wie Nebenschlussmotoren.



## 3.3 Steuerung

### Drehrichtungswahl:

Ergibt sich durch das Zusammenwirken von Erregerfeld und Ankerquerfeld. Das Umpolen der Erreger- oder der Ankerspannung führt zu einer Umkehr der entsprechenden Feldrichtung und somit zur Umkehr der Drehrichtung des Motors.

Das Erregerfeld ist bei einem Gleichstrommotor i.A. stärker als das Ankerquerfeld (höhere Windungszahl). Eine Umpolung der Erregerspannung hätte eine hohe Induktionsspannung (siehe Gegenspannung und Wirbelströme) zur Folge. In der Regel erfolgt daher die Drehrichtungsumkehr durch Umpolen der Ankerspannung.

DIN VDE 0650: Ein Motor dreht rechts, wenn die Erregerwicklung und die Ankerwicklung in der Reihenfolge der Ziffern vom Strom durchflossen werden.

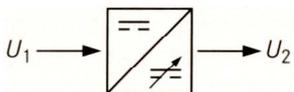
Reihenschlussmotor	Nebenschlussmotor	Doppelschlussmotor	Fremderregter Motor
<b>Rechtslauf</b>			
<b>Linkslauf</b>			
Die Festlegung der Drehrichtung der Gleichstrommotoren kann durch entsprechendes Setzen der Kontaktbrücken im Klemmenkasten erfolgen.			

Ein Vertauschen von L+ und L- hat keine Auswirkung auf die Drehrichtung, da sowohl Erregerfeld als auch Ankerquerfeld umgekehrt werden.

### Drehzahleinstellung:

#### 1. **Änderung der Klemmenspannung:**

Im Allgemeinen nicht direkt möglich, da die Gleichspannungseinspeisung des Versorgungsnetzes konstant ist. Daher kommt ein nachgeschalteter gesteuerter Stromrichter (= **Gleichstromsteller**) zum Einsatz.



## 2. **Erregerfeldschwächung:**

Einsatz eines Widerstandes im Erregerstromkreis (= **Feldsteller**):

Nebenschlussmotor → in Reihe zur Erregerwicklung

Reihenschlussmotor → parallel zur Erregerwicklung

Durch die Verringerung des Erregerstroms reduziert sich auch die induzierte Gegenspannung. Dadurch erhöht sich bei gleicher Belastung des Motors die Drehzahl (auch die Leerlaufdrehzahl wird größer):

$$I_E \downarrow \Rightarrow U_G \downarrow \Rightarrow I_A \uparrow \Rightarrow \Phi_A \uparrow \Rightarrow M_{\text{Motor}} \uparrow \Rightarrow n \uparrow$$

## 3. **Ankerfeldschwächung:**

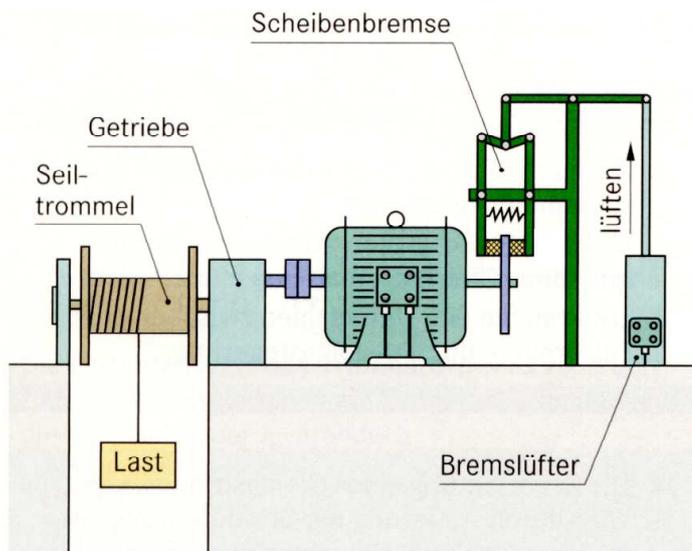
Einsatz eines Widerstandes im Ankerstromkreis

Durch Verringerung der Ankerstromstärke wird auch die Drehzahl verkleinert. Die Leerlaufdrehzahl bleibt unverändert, da der Stromfluss durch den Anker und somit der Spannungsfall am Ankerwiderstand im Leerlauf sehr klein ist.

Ein Nachteil der Feldschwächung liegt in der Umwandlung elektrischer Energie in Wärmeenergie am Widerstand. Diese Drehzahleinstellung ist folglich stark verlustbehaftet.

## Bremsen von Motoren:

1. **Mechanisches Bremsen** durch Scheiben-, Kegel- oder Lamellenbremse.



2. Eine **Gegenstrombremsung** wird durch Umpolung der Ankerspannung erreicht. Hierdurch „will“ der Motor in die andere Richtung drehen und bremst somit automatisch. Ein Drehzahlwächter schaltet bei  $n = 0$  ab.

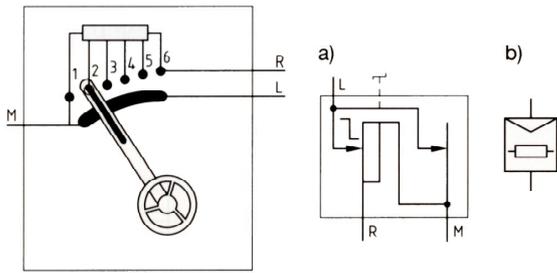
Die Stromstärke im Motor und somit die thermische Beanspruchung wird bei dieser Bremsung jedoch sehr hoch.

3. Zur **Widerstandsbremsung** wird die Zuleitung abgeschaltet und ein Bremswiderstand in den Ankerkreis geschaltet. Der noch drehende Motor wirkt nun als Generator und erzeugt elektrische Energie, die über den Widerstand in Wärmeenergie umgesetzt wird. Hierdurch geht Bewegungsenergie des Rotors verloren und dieser kommt zum Stillstand.

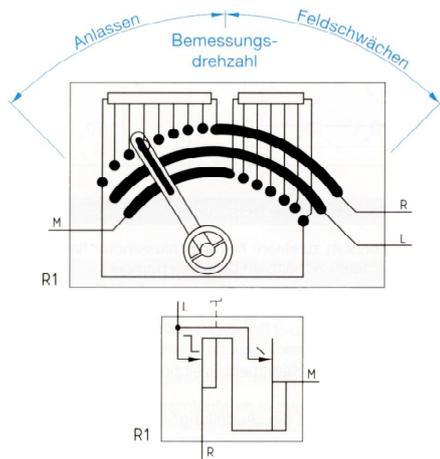
Der Vorteil dieser Bremsung liegt in ihrer Verschleißfreiheit.

4. Bei der **Nutzbremsung** wird die Rotationsenergie in Form von elektrischer Energie wieder ins Versorgungsnetz zurückgespeist. Hierzu sind jedoch spezielle rückspeisefähige Stromrichter erforderlich. Daher wird diese Bremsung nur bei Antrieben eingesetzt, die sehr häufig abgebremst werden müssen.

## Umsetzung in der Praxis:



6 stufiger Anlaser für Gleichstrommotoren



Feldstellanlaser

Zur Anlaufstrombegrenzung wird ein Anlaser in den Ankerkreis geschaltet, dessen Widerstandswert beim Hochfahren in sechs Stufen verringert wird.

An die Klemme L wird die Einspeisung der Ankerwicklung angeschlossen. An die Klemme R wird die Ankerwicklung (A1) angeschlossen.

An die Klemme M kann zusätzlich bei Nebenschlussmotoren die Erregerwicklung angeschlossen werden.

Der Feldstellanlaser verfügt über zwei schaltbare Widerstände unterschiedlicher Größe. Die Widerstände können über ein Stellrad in mehreren Stufen geschaltet werden.

Widerstand 1 dient als Anlasswiderstand, der den Anlaufstrom begrenzt.

Widerstand 2 wird nach dem Erreichen der Bemessungsdrehzahl als Feldsteller (→ Feldschwächung) benutzt, um die Drehzahl zu variieren.

## 4. Universalmotor

Einsatz eines Gleichstrommotors an Wechselstrom:

Umpolung von Erreger- und Ankerspannung  
↓  
Richtungsänderung von Erreger- und Ankerfeld  
↓  
Drehmoment in gleichbleibender Richtung

Die Wicklungen haben bei Wechselspannung aufgrund des jeweils hinzukommenden **Blindwiderstands  $X_L$**  einen größeren Widerstand. Der kleinere Strom führt zu einer geringeren Leistung des Motors:

$$f \uparrow \rightarrow X_L \uparrow \rightarrow Z \uparrow \rightarrow I \downarrow \rightarrow P \downarrow \quad (\text{auch } M \downarrow \text{ und } n \downarrow)$$

Je kleiner die Netzfrequenz, desto effektiver können Gleichstrommotoren an Wechselstrom arbeiten.

### Aufbau:

Nebenschlussmotoren benötigen immer eine hohe Windungszahl der Erregerwicklung, daher werden als **Universalmotoren** nur Reihenschlussmotoren eingesetzt.

- getrennte Anschlüsse für Gleichspannung (hohe Windungszahl) und Wechselspannung (kleine Windungszahl)
- Stator wird geblecht ausgeführt, um Wirbelströme zu verringern.

### Anwendung:

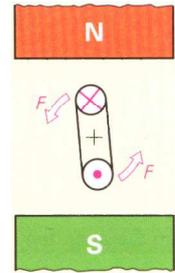
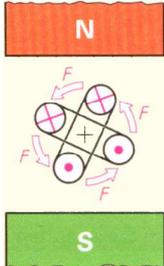
- Haushaltsgeräte (Waschmaschine, Staubsauger, Küchengeräte)
- Werkzeugmaschinen
- Fahrmotoren bei der Bahn (Bahn-Netz: 16,33 Hz, Leistungen bis x00 kW)

Universalmotoren sind im Betrieb sehr laut und die Kohlen verschleissen schnell, weshalb man sie für oft und lange laufende Geräte wie z. B. Kühlgeräte nicht verwendet.

## 5. Drehstrommotoren

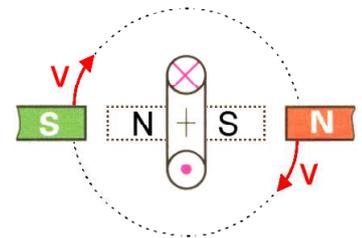
### 5.1 Funktionsprinzip einer Drehfeldmaschine

Beim **Gleichstrommotor** wird der Anker gewissermaßen angestoßen, wenn das Ankerquerfeld senkrecht zum Erregerfeld steht. Eine Viertelumdrehung des Ankers später wird die Ankerspannung durch einen Stromwender umgepolt. Eine weitere Viertelumdrehung später erfolgt der nächste Anstoß. Zwischen den einzelnen Anstößen bremsen der Motor automatisch bedingt durch die auftretenden Reibungsverluste in den Lagern.



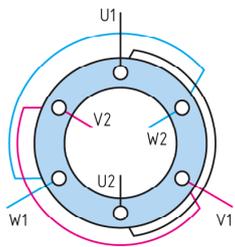
Der Gleichlauf des Motors lässt sich durch Erhöhung der Polpaarzahl verbessern. Auch die Erhöhung der Polpaarzahl ändert jedoch nichts daran, dass auf einen kurzzeitigen Anstoß stets eine kurzzeitige Abbremsphase folgt.

**Drehfeldmaschinen** folgen einem anderen Prinzip: Umlaufende äußere Magnetpole bilden im Bereich des Ankers ein annähernd homogenes (im Beispiel) rechtsdrehendes Magnetfeld. Die Pole des Ankerquerfeldes werden quasi von den umlaufenden Magnetpolen mitgezogen.

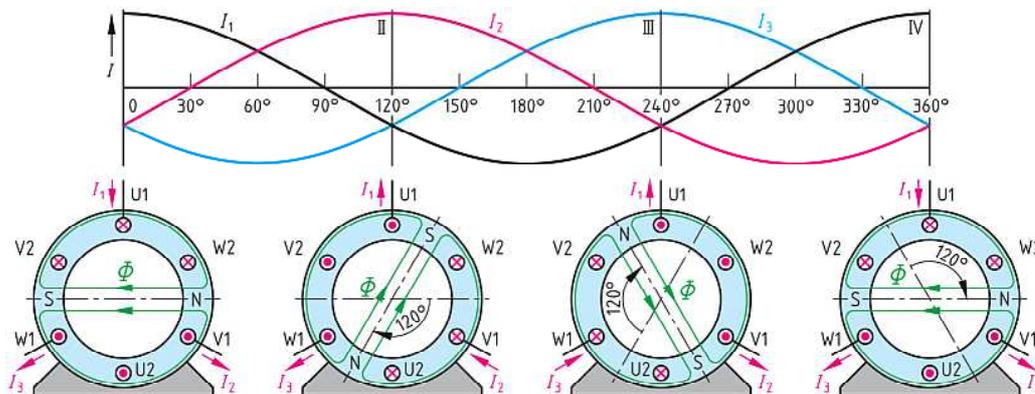


### 5.2 Erzeugung eines Drehfeldes

Bei Drehfeldmaschinen werden die Wicklungen der drei Erregerspulen in eingefräste Nuten des Ständers eingelegt, wobei die Spuleneingänge U1, V1 und W1 den entsprechenden Spulenausgängen U2, V2 und W2 genau gegenüber liegen.



Jede Spule erzeugt ein magnetisches Wechselfeld. Durch Überlagerung der drei Einzelfelder ergibt sich ein drehendes gemeinsames Magnetfeld, das sogenannte **Drehfeld**.

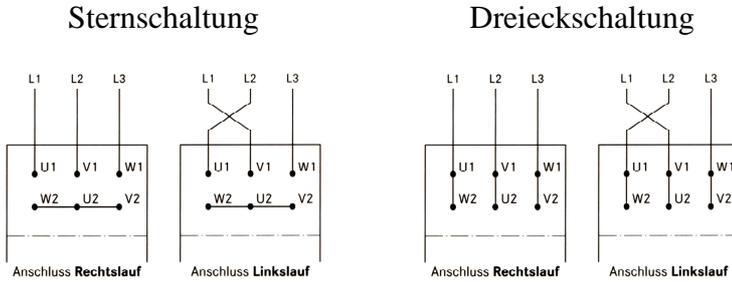


Während einer Periode der Netzspannung macht das Drehfeld genau eine Umdrehung. Das Drehfeld erreicht bei direktem Anschluss des Motors an das Drehstromnetz folglich eine Drehzahl von  $3000 \text{ min}^{-1}$ .

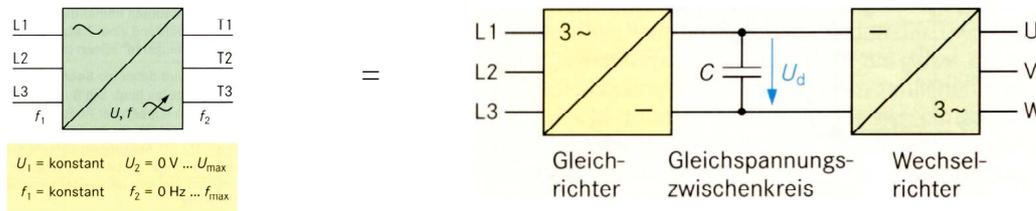
Wichtige Motorarten: - **Asynchronmotor** mit **Schleifringläufer**, Asynchronmotor mit **Kurzschlussläufer**  
 - **Synchronmotor**

### 5.3 Drehsinn und Drehzahl

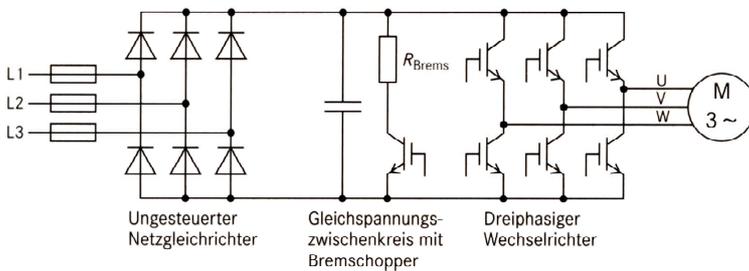
Drehstrommotoren drehen rechts, wenn die Außenleiter L1, L2 und L3 an die Klemmen U1, V1 und W1 angeschlossen sind. Durch Tausch zweier Außenleiter wird die Drehrichtung umgekehrt.



Da die Drehzahl nur von der Frequenz der Erregerspannung abhängt, werden zur Drehzahlregelung **Frequenzumrichter** eingesetzt, die die Netzspannung in eine Wechselspannung mit anderer (regelbarer) Frequenz umwandeln. Sie bestehen aus Gleichrichter, Gleichspannungszwischenkreis und Wechselrichter.

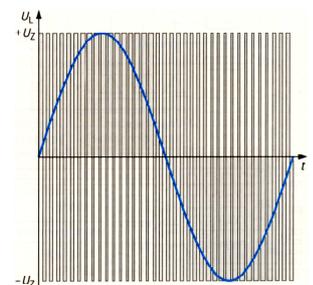


#### Schaltbild:



Die Gleichrichterschaltung (**Sechspuls-Brückenschaltung** B6U) liefert eine leicht wellige Ausgangsspannung, die vom Kondensator des Zwischenkreises geglättet wird.

Der Wechselrichter arbeitet mit mikroprozessorgesteuerten Schalttransistoren und erzeugt an den Erregerwicklungen sogenannte **pulsweitenmodulierte Spannungen**. Durch das ständige Ein- und Ausschalten der Spannungen ergeben sich in den Spulen sinusförmige Wechselströme. Die Höhe der Spulenströme und auch deren Frequenz können in weiten Grenzen geregelt werden.



Solange die angeschlossene Maschine im **Motorbetrieb** arbeitet, fließt Energie vom Netz zum Motor. Wird die Maschine gebremst, arbeitet sie im **Generatorbetrieb**. Nun wird Energie zurück in den Zwischenkreis übertragen. Diese muss nun über den Bremswiderstand in Wärme umgewandelt werden, damit der Zwischenkreiskondensator nicht zerstört wird. Dieser wird beim Bremsen über einen Schalttransistor, den sogenannten **Bremschopper** eingeschaltet.

## 6. Motorleistung, Drehzahl und Drehmoment

Die **Leistung P** ist definiert als die je Zeit  $t$  verrichtete Arbeit  $W$ :

$$P = \frac{W}{t}$$

Die **Arbeit W** ist das Produkt aus aufgewendeter Kraft und zurückgelegter Wegstrecke:

$$W = F \cdot s$$

$$P = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot \frac{s}{t} = F \cdot v$$

Ein Motor überträgt seine **Kraft F** über eine Drehbewegung, zum Beispiel über eine Riemenscheibe. Mit deren **Umfangsgeschwindigkeit v** ergibt sich:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{t} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n \rightarrow P = F \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n = F \cdot r \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

Das übertragene **Drehmoment M** ist das Produkt aus dem Radius  $r$  der Riemenscheibe und der Kraft  $F$ . Die **Drehzahl n** ist eine Frequenz. Multipliziert mit dem Faktor  $2 \cdot \pi$  ergibt sich die **Winkelgeschwindigkeit  $\omega$** :

$$M = F \cdot r, \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \rightarrow P = M \cdot \omega$$

In der Praxis lassen sich die aufgenommene elektrische Leistung bzw. die abgegebene mechanische Leistung eines Drehstrommotors über folgende Formeln berechnen:

$$P_{auf} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

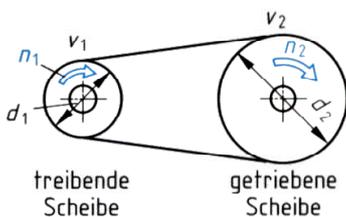
$$P_{ab} = \sqrt{3} \cdot \eta \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Da üblicherweise auf dem Leistungsschild eines Motors die mechanische Leistung, die Bemessungsspannung und der Bemessungsstrom sowie der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  angegeben sind, lässt sich über obige Formeln der Wirkungsgrad des Motors berechnen.

## 7. Drehzahlübersetzung

Zum Übersetzen von Drehzahlen werden **Getriebe** eingesetzt.

### Riemenantrieb:



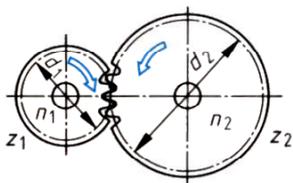
Die Umfangsgeschwindigkeiten beider Scheiben sind gleich:

$$v_1 = v_2, \quad v = \pi \cdot d \cdot n \rightarrow \pi \cdot d_1 \cdot n_1 = \pi \cdot d_2 \cdot n_2 \rightarrow d_1 \cdot n_1 = d_2 \cdot n_2$$

Das Verhältnis der Drehzahlen in Richtung des Kraftflusses bezeichnet man als **Übersetzungsverhältnis i**:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} \quad \begin{array}{l} n_1, n_2: \text{Drehzahlen der Scheiben} \\ d_1, d_2: \text{Durchmesser der Scheiben} \end{array}$$

### Zahnradgetriebe:

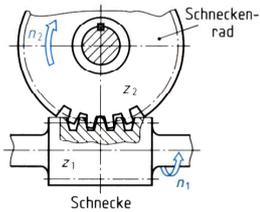


Zahnradgetriebe übersetzen Drehzahlen ähnlich wie der Riemenantrieb:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} \quad \begin{array}{l} n_1, n_2: \text{Drehzahlen der Scheiben} \\ z_1, z_2: \text{Zähnezahl der Scheiben} \end{array}$$

Das angetriebene Zahnrad dreht sich entgegengesetzt zum treibenden Zahnrad.

## Schneckengetriebe:



Dreht sich eine einzahnige Schnecke einmal um die eigene Achse, wird das angetriebene Schneckenrad um einen Zahn weiter bewegt. Hierdurch ergeben sich große Übersetzungsverhältnisse:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

$n_1$ : Drehzahl der Schnecke

$n_2$ : Drehzahl des Schneckenrades

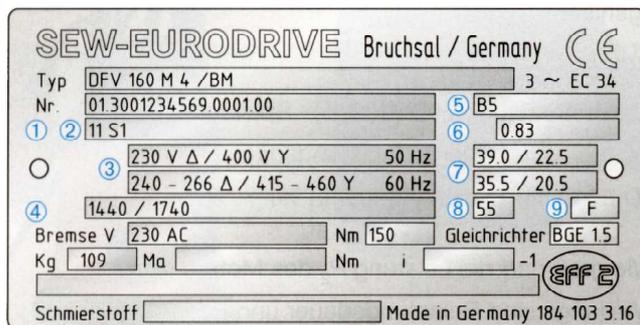
$z_1$ : Zähnezahl der Schnecke (=Gangzahl)

$z_2$ : Zähnezahl des Schneckenrades

Bei **Mehrfachübersetzungen** ergibt sich das Übersetzungsverhältnis aus dem Produkt der Einzelübersetzungen.

## 8. Angaben des Typenschildes

Auf dem Leistungsschild sind die Kennwerte der Maschine angegeben.



- ① Bemessungsleistung
- ② Betriebsart
- ③ Bemessungsspannung
- ④ Bemessungsdrehzahl
- ⑤ Bauform
- ⑥ Leistungsfaktor
- ⑦ Bemessungsstromstärke
- ⑧ Schutzart
- ⑨ Isolierstoffklasse

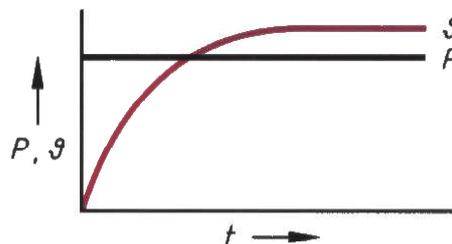
Typen- oder Leistungsschild

Die **Bemessungsleistung** (= **Nennleistung**) in kW ist die mechanisch über die Motorwelle abgegebene Leistung für welche der Motor ausgelegt ist.

Je nach den verwendeten Isolierstoffen darf bei einem Motor eine bestimmte höchstzulässige Temperatur nicht überschritten werden. Diese Temperatur wird im Motor aber erst nach einiger Zeit erreicht. Ist ein Motor nur für kurze Betriebszeiten vorgesehen, darf er folglich höher belastet werden. Es wird daher zwischen unterschiedlichen **Bemessungsbetriebsarten** unterschieden. Ist keine Betriebsart angegeben, so ist die Maschine für Betriebsart S1 bemessen.

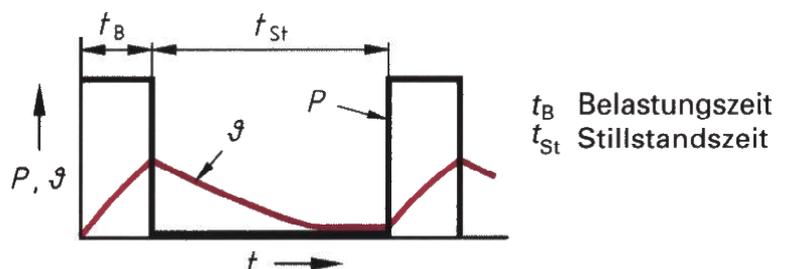
### Dauerbetrieb S1:

Der Motor darf ununterbrochen mit Nennlast betrieben werden. Je höher seine Temperatur wird, umso mehr nimmt auch seine Wärmeabfuhr zu. D.h. der Motor erwärmt sich immer langsamer und verbleibt letztendlich bei seiner **Beharrungstemperatur**.



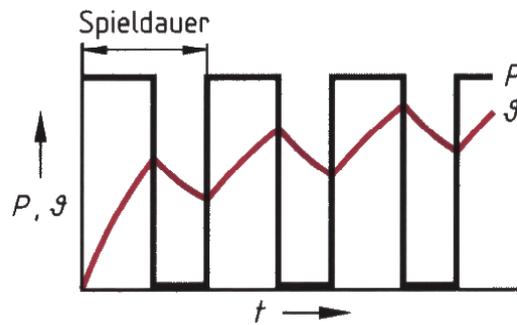
### Kurzzeitbetrieb S2:

Die Betriebsdauer unter Nennlast ist kurz im Vergleich zur folgenden Pause, in der der Motor abgeschaltet ist. Die Pause ist so lang, dass der Motor auf die Umgebungstemperatur abkühlt. Die auf dem Leistungsschild angegebene Betriebsdauer darf nicht überschritten werden und der Motor darf erst nach vollständiger Abkühlung erneut verwendet werden.



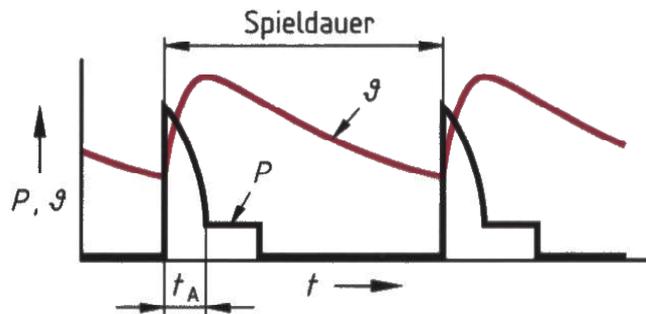
### Aussetzbetrieb S3:

Die Betriebsdauer unter Nennlast ist kurz, die folgende Pause auch. Die Abkühlung während der Stillstandzeit reicht aus, damit der Motor auch bei den zyklisch folgenden Betriebszeiten nicht überhitzt. Die Zeit von einem Einschaltzeitpunkt zum nächsten wird **Spieldauer** genannt. Die **Einschalt-dauer** wird prozentual zur Spieldauer angegeben. Sofern keine andere Angabe gemacht wird, beträgt die Spieldauer 10 Minuten.



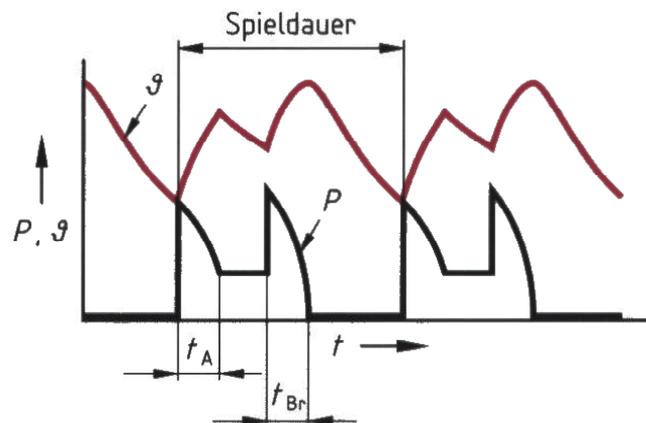
### Aussetzbetrieb mit Einfluss des Anlaufens S4:

Ist die Spieldauer sehr kurz, wird der Motor sehr oft eingeschaltet. Da der Anlaufstrom sehr hoch ist, kann er hier nicht vernachlässigt werden.



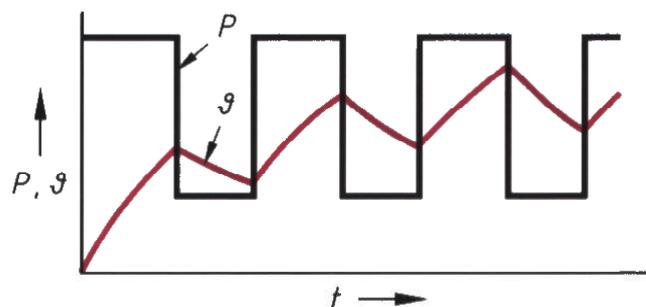
### Aussetzbetrieb mit elektrischer Bremsung S5:

Wird ein häufig geschalteter Motor elektrisch gebremst, ruft der Bremsstrom zusätzlich eine Erwärmung hervor.



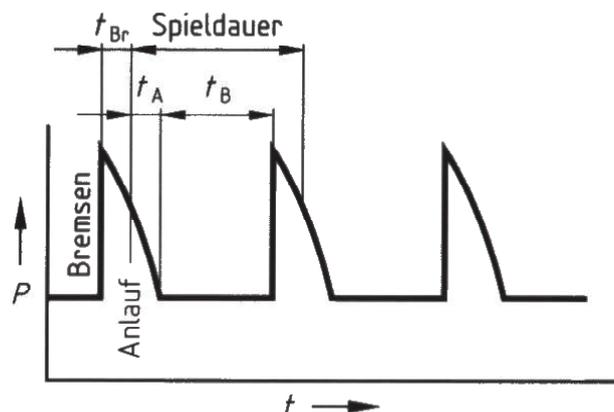
### Ununterbrochener periodische Betrieb mit Aussetzbelastung S6:

Der Motor ist dauernd eingeschaltet und läuft auch dauernd. Es ist aber keine dauernde Belastung vorhanden. Nach jeder Belastung tritt eine Leerlaufphase ein.



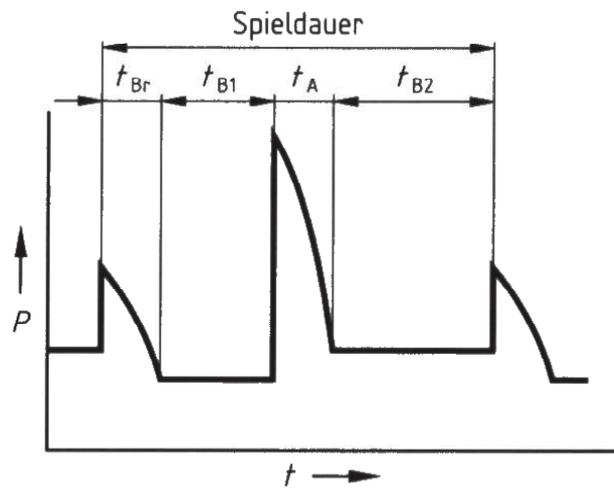
### Ununterbrochener periodischer Betrieb mit elektrischer Bremsung S7:

Während jedes Spiels erfolgt ein Anlauf, eine Arbeitszeit unter Vollast und danach eine elektrische Bremsung, z. B. als Gegenstrombremsung.



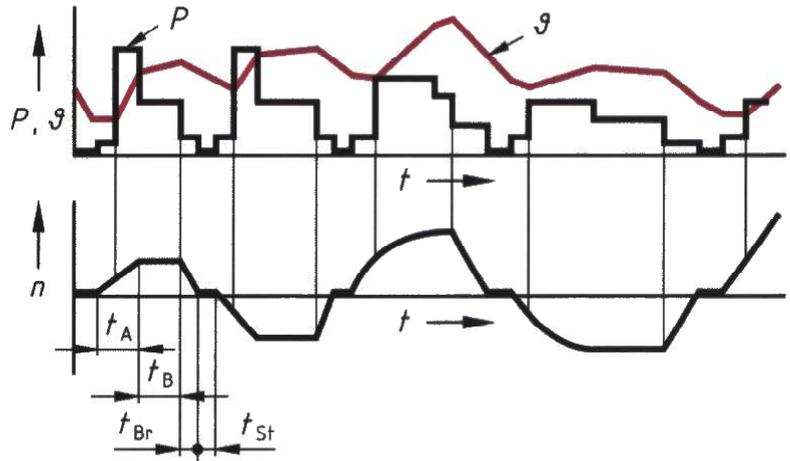
### Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Drehzahländerung S8:

Der Motor arbeitet mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Die Betriebsart tritt insbesondere bei polumschaltbaren Drehstrommotoren auf. Auf dem Leistungsschild sind Trägheitsmomente, Spieldauer und Einschaltdauer angegeben.



### Ununterbrochener Betrieb mit nichtperiodischer Last- und Drehzahländerung S9:

Last und Drehzahl ändern sich innerhalb des Betriebsbereiches nichtperiodisch. Lastspitzen können weit über der Bemessungsleistung liegen.



Die **Bemessungsdrehzahl**  $n$  ist die Drehzahl, für die Maschine ausgelegt ist. Die Umfangsgeschwindigkeit einer auf der Motorwelle angebrachten Scheibe mit dem Durchmesser  $d$  beträgt  $v = \pi \cdot d \cdot n$ .

### Motorbauformen:

IEC-Code I IEC-Code II	Bild	Erklärung
IM B3 IM 1001		2 Schildlager, 1 freies Wellenende
IM B5 IM 3001		mit 2 Schildlagern, Befestigungsflansch
IM B6 IM 1051		wie IM B3, aber für Wandbefestigung, Füße links
IM B8 IM 1071		wie IM B3, aber für Deckenbefestigung
IM B10 IM 4001		mit 2 Schildlagern, Befestigungsflansch
IM B14 IM 3601		mit 2 Schildlagern, Befestigungsfläche an der Stirnseite

Maschinen mit Schildlagern

IEC-Code I IEC-Code II	Bild	Erklärung
IM V1 IM 3011		mit 2 Schildlagern, Flansch und freies Wellenende unten
IM V2 IM 3231		wie IM V1, aber freies Wellenende oben
IM V3 IM 3031		wie IM V1, aber Flansch und freies Wellenende oben
IM V4 IM 3211		wie IM V3, aber freies Wellenende unten
IM V5 IM 1011		mit 2 Schildlagern, freies Wellenende unten, Füße für Wand- befestigung
IM V10 IM 4011		mit 2 Schildlagern, freies Wellenende und Befestigungsflansch unten
IM V18 IM 3611		wie IM V10, aber Befestigungsfläche an der Schildstirnseite

Maschinen für senkrechte Anordnung