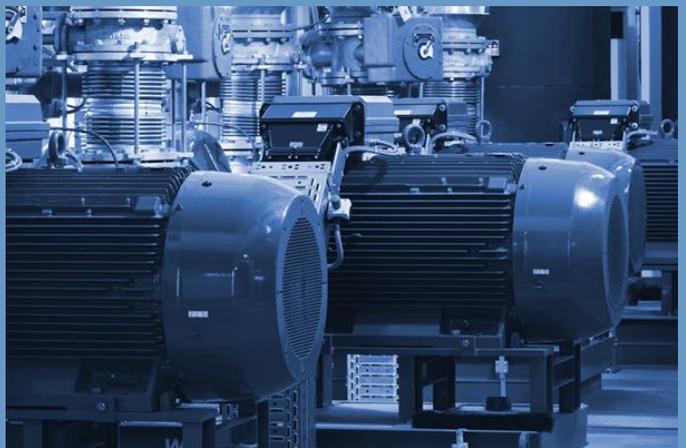


Kursbuch zum Onlinekurs

Elektrische Antriebe kurz und bündig

Erstellt von **w-tech**, Neumannstr. 29, 90763 Fürth, www.w-tech.de



Vorwort und Hinweise

Das vorliegende Kursbuch bildet die zentrale Wissensquelle zum Onlinekurs "Elektrische Antriebe kurz und bündig". Es führt Sie in die facettenreiche Welt der elektrischen Antriebe ein und erläutert auf anschauliche Weise die verschiedenen Antriebslösungen. Viele Bilder und grafische Darstellungen erleichtern Ihnen das Verständnis für die technischen Zusammenhänge.

Nach allen Hauptkapiteln finden Sie Fragen und Aufgaben zum behandelten Lehrstoff. Diese Fragen dienen als Selbsttest. Durch ihre Bearbeitung festigen Sie das erworbene Wissen und machen es für Sie abrufbereit. Nehmen Sie sich deshalb Zeit und beantworten Sie die Fragen schriftlich unter Verwendung des Kursbuches. Vergleichen Sie erst danach Ihre Antworten mit den Lösungen, die sich am Ende des Kursbuches befinden.

Weitere Übungsaufgaben finden Sie online in Ihrem persönlichen Kursraum.

Sollten Sie an einer Stelle nicht weiterkommen, nutzen Sie die Möglichkeit zur persönlichen Konsultation, die Ihnen im Rahmen des Kurses angeboten wird.

Zum Abschluss des Kurses beantworten Sie die Prüfungsfragen, die Ihnen ebenfalls online zur Verfügung stehen. Im Anschluss daran erhalten Sie ein Zertifikat, das Ihnen die erfolgreiche Teilnahme am Kurs bestätigt.

Viel Erfolg und viel Spaß auf Ihrer Entdeckungsreise in die Welt der elektrischen Antriebe wünscht Ihnen Ihr **w-tech**-Team

1 Grundlagen

1.1 Erzeugung des Drehmomentes in Elektromotoren

1.1.1 Lorentzkraft

Kraft auf Ladungsträger

In den meisten Elektromotoren beruht die Erzeugung des Drehmomentes auf der Lorentzkraft. Die Lorentzkraft wirkt auf elektrische Ladungen, die sich in einem Magnetfeld bewegen.

Drei-Finger-Regel

Zwischen der Bewegungsrichtung der elektrischen Ladungen, der Richtung des Magnetfeldes und der auftretenden Kraft besteht ein definierter Zusammenhang. Alle drei Komponenten stehen bei optimaler Anordnung im rechten Winkel zueinander. Zur Verdeutlichung können die einzelnen Richtungen mit den Fingern der rechten Hand (nicht der linken Hand) entsprechend der „Drei-Finger-Regel“ nachgebildet werden:

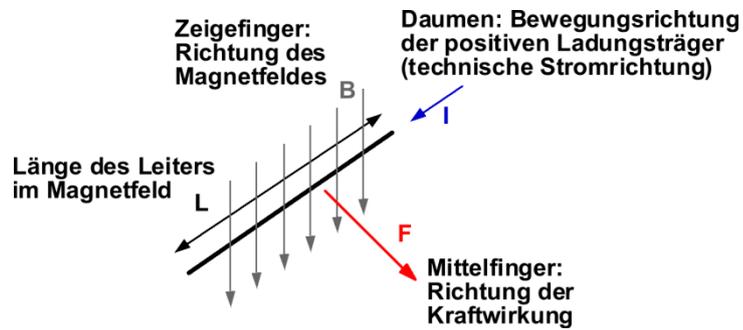


Bild 1-1 Drei Finger Regel

Hinweis: Bewegen sich die elektrischen Ladungsträger parallel zur den Feldlinien des Magnetfeldes, wirkt die Lorentzkraft nicht.

Kraft auf stromdurchflossenen Leiter

In Elektromotoren bewegen sich die Ladungsträger in elektrischen Leitern. Setzt man einen stromdurchflossenen Leiter einem Magnetfeld aus, wirkt auf die Ladungsträger die Lorentzkraft. Die Ladungsträger übertragen diese Kraftwirkung auf den Leiter, aus dem sie nicht entweichen können. Im Ergebnis wirkt auf den gesamten stromdurchflossenen Leiter die Lorentzkraft. Ist der Leiter mechanisch nicht fixiert, bewegt er sich entsprechend der angreifenden Kraft.

Hinweis: Auf ruhende elektrische Ladungen und auf stromlose elektrische Leiter wirkt die Lorentzkraft nicht.

Stärke der Lorentzkraft

Die Stärke der Lorentzkraft ist proportional zur

- Stärke des Magnetfeldes B sowie
- zu Geschwindigkeit und Anzahl der bewegten Ladungsträger und damit zur Stärke des elektrischen Stromes I.

Die Lorentzkraft auf einen stromdurchflossenen Leiter, der senkrecht im Magnetfeld steht, berechnet sich zu:

$$F = B \cdot L \cdot I$$

mit:

- | | | | |
|----|---------------------------------|----|-------------------------|
| F: | Lorentzkraft | B: | Magnetische Flussdichte |
| L: | Länge des Leiters im Magnetfeld | I: | Elektrische Stromstärke |

Damit sind bereits die wesentlichen Einflussgrößen zur Erzielung eines hohen Drehmomentes bei Elektromotoren genannt. Durch Erzeugung starker Magnetfelder, durch lange elektrische Leiter im Magnetfeld und durch Einprägen hoher Ströme wird bei Elektromotoren ein hohes Drehmoment bzw. eine hohe Kraftwirkung erreicht.

Hinweis: Bis auf Reluktanzmotoren nutzen alle elektrischen Motoren die Lorentzkraft aus. Die Drehmomententstehung bei Reluktanzmotoren beruht auf der Anziehungskraft zwischen Elektromagneten und Eisen.

1.1.2 Von der Lorentzkraft zum Drehmoment

Kraft auf stromdurchflossene Leiterschleife im Rotor des Motors

Um die auf den stromdurchflossenen Leiter wirkende Lorentzkraft in ein Drehmoment umzuformen, wird der Leiter zu einer Leiterschleife erweitert. Die Leiterschleife besteht aus einem langen Hin- und einem langen Rückleiter sowie den Verbindungsstücken zwischen Hin- und Rückleiter. Die Leiterschleife ist drehbar gelagert und befindet sich in einem Magnetfeld. Das Magnetfeld wird von einem Permanentmagneten im feststehenden Teil des Motors, dem Stator erzeugt.

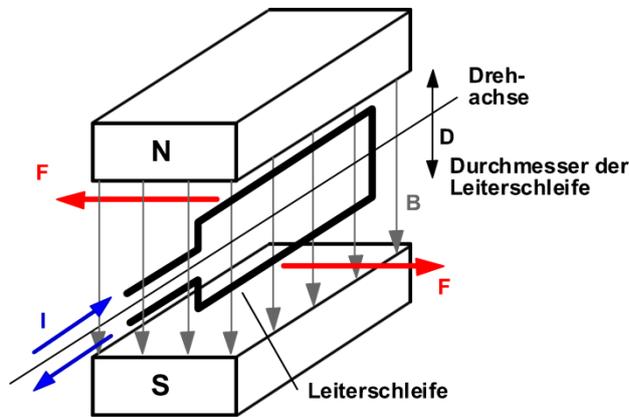


Bild 1-2 Kraftwirkung auf eine drehbare stromdurchflossene Leiterschleife

Wird an die Enden der Leiterschleife eine Spannung angelegt, tritt ein Stromfluss in der Leiterschleife auf. Dabei ist die Stromrichtung im Bezug auf das Magnetfeld im Hin- und Rückleiter der Leiterschleife unterschiedlich. Folglich wirken auf Hin- und Rückleiter der Leiterschleife zwei einander entgegengesetzte Komponenten der Lorentzkraft. Diese beiden Komponenten bewirken über den Hebelarm der Leiterschleife die Entstehung eines Drehmomentes. Das Drehmoment wird auf den beweglichen Teil des Motors, den Rotor übertragen und steht an der Motorwelle zur Verfügung.

Das entstehende Drehmoment ergibt zu:

$$M = F \cdot D = B \cdot L \cdot I \cdot D$$

mit:

- | | | | |
|-----------|--|-----------|--------------------------------|
| <i>M:</i> | <i>Drehmoment</i> | <i>F:</i> | <i>Lorentzkraft</i> |
| <i>D:</i> | <i>Durchmesser der Leiterschleife</i> | <i>B:</i> | <i>Magnetische Flussdichte</i> |
| <i>L:</i> | <i>Länge des Leiters im Magnetfeld</i> | <i>I:</i> | <i>Elektrische Stromstärke</i> |

Daraus ergibt sich, dass zur Erreichung eines hohen Motordrehmomentes der Motor einen großen Durchmesser aufweisen sollte.

Kraft auf stromdurchflossene Leiterschleife im Stator des Motors

Die Anordnung der Leiterschleife und des Magnetfeldes können auch vertauscht werden. Die Leiterschleife wird dann im feststehenden Stator und der Permanentmagnet im drehbaren Rotor angeordnet.

Auf die stromdurchflossenen Leiter der Leiterschleife, die sich im Magnetfeld des Rotors befinden, wirkt die Lorentzkraft. Die Leiterschleife versucht sich am Magnetfeld des Rotors „abzustoßen“. Damit wirkt auf den drehbaren Rotor die Reaktionskraft der Lorentzkraft. Die Reaktionskraft hat den gleichen Betrag wie die Lorentzkraft, wirkt jedoch in die entgegengesetzte Richtung.

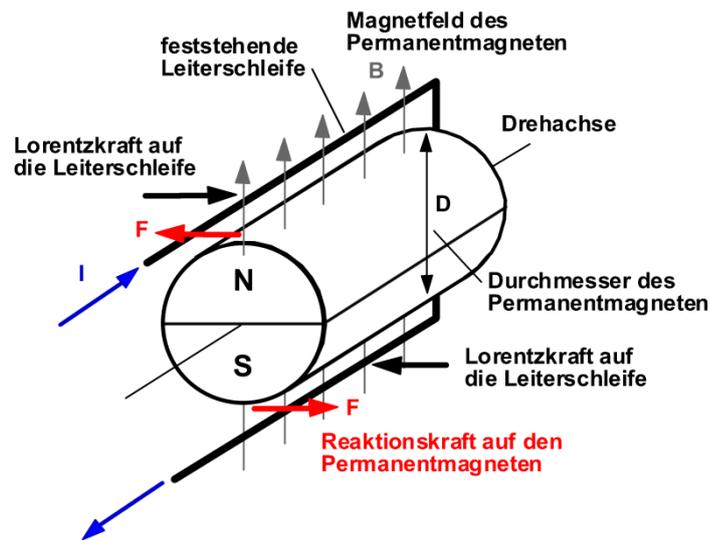


Bild 1-3 Kraftwirkung auf einen drehbaren Permanentmagneten

Im Ergebnis erzeugt die Reaktionskraft über den Hebelarm des Rotors ein Drehmoment, das an der Motorwelle zur Verfügung steht.

Von der Leiterschleife zur Motorwicklung

Aufgrund der wirkenden Kräfte würde sich der Rotor in Bild 1-2 und Bild 1-3 beginnen zu drehen. Die Drehbewegung würde jedoch nach Erreichen der waagerechten Position zum Stillstand kommen, da dann die waagrecht wirkenden Kräfte den Rotor auseinander ziehen, aber kein Drehmoment mehr erzeugen. . Damit sind diese sehr einfachen Anordnungen noch nicht als Elektromotoren einsetzbar. Um zu technisch brauchbaren Motoren zu gelangen, werden deshalb

- mehrere, gegeneinander verdreht angeordnete Leiterschleifen verwendet
- die Leiterschleifen mehrlagig ausgeführt und zu echten Motorwicklungen weiterentwickelt und
- die Stromrichtung in den Wicklungen in Abhängigkeit vom Drehwinkel des Rotors geändert.

Die zeitliche Änderung der Stromrichtung erfolgt entweder durch den Motor selbst (Gleichstrommotor) oder durch Anlegen einer zeitlich veränderlichen Spannung an den Motor (Wechselstrommotor).

1.2 Entstehung und Bedeutung der EMK

Entstehung der Motor-EMK

Betrachtet wird eine drehbare Leiterschleife im Magnetfeld. In Abhängigkeit vom Drehwinkel, wird die Leiterschleife von einer größeren oder kleineren Zahl an Magnetfeldlinien durchsetzt.

Bei einer Rotation der Leiterschleife ändert sich damit fortlaufend das Magnetfeld, dass die Leiterschleife einschließt. Diese zeitliche Änderung führt dazu, dass in der Leiterschleife eine elektrische Spannung induziert wird. Diese Spannung kann an den Enden der Leiterschleife gemessen werden. Sie wird auch als Elektromotorische Kraft (EMK) bezeichnet.

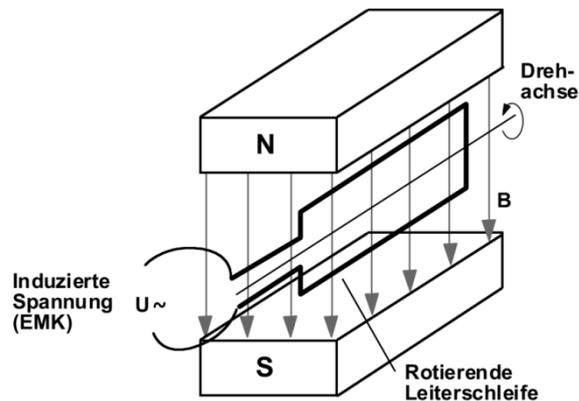


Bild 1-4 Spannungsinduktion in einer rotierenden Leiterschleife

Die EMK ist umso größer,

- je mehr Windungen die Leiterschleife hat und
- je schneller die Leiterschleife im Magnetfeld rotiert

Vor- und Nachteile der EMK

Bei Generatoren wird die EMK zur Spannungserzeugung ausgenutzt. Bei Motoren wirkt sie jedoch als Störgröße, die durch die Klemmspannung des Motors kompensiert werden muss. Erst wenn die Klemmspannung des Motors die EMK übersteigt, kommt es zu einem Stromfluss, der ein motorisches Drehmoment hervorruft.

Je höher die Drehzahl eines Motors ist, umso größer muss die an die Wicklungen des Motors angelegte Klemmspannung sein, um einen Stromfluss und ein Drehmoment zu erzeugen. Die erreichbare Drehzahl eines Motors ist damit durch die Amplitude der maximal verfügbaren Klemmspannung begrenzt.

1.3 Fragen und Aufgaben

1. Was ist die Lorentzkraft?
2. Wie müssen ein gerader stromdurchflossener Leiter und ein Magnetfeld zueinander angeordnet sein, damit die Lorentzkraft auf den Leiter wirken kann?
3. Wie entsteht im Elektromotor ein Drehmoment?
4. Eine senkrecht stehende stromdurchflossene Leiterschleife mit dem Durchmesser D und der Länge L befindet sich in einem Magnetfeld mit der magnetischen Flussdichte B . Folgende Daten sind gegeben:

Länge der Leiterschleife im Magnetfeld	L	0,2 m	
Radius der Leiterschleife	r	0,05 m	
Magnetische Flussdichte	B	1 T = 1 Vs/m ²	
Strom durch die Leiterschleife	I	10 A	

Welches Drehmoment M wirkt auf die Leiterschleife?

5. Welches Drehmoment ergibt sich, wenn die Leiterschleife aus Aufgabe 4 durch eine Wicklung mit 100 Windungen ersetzt werden würde?
6. Was ist die EMK? Wie entsteht sie und in welcher Beziehung steht sie zur Drehzahl und zur Klemmenspannung des Motors?

2 Elektrische Antriebe im Überblick

2.1 Der Aufbau elektrischer Antriebe

Die von elektrischen Antrieben bereitgestellte mechanische Energie dient zur Beeinflussung von Prozessgrößen in Arbeitsmaschinen. Die mechanische Energie muss entsprechend den Anforderungen des Prozesses dosiert bzw. zu- und abgeschaltet werden. Aus diesem Grund bestehen heutige elektrische Antriebe nicht nur aus einem Elektromotor, sondern weisen eine ganze Reihe weiterer Komponenten auf, die nachfolgend beschrieben werden:

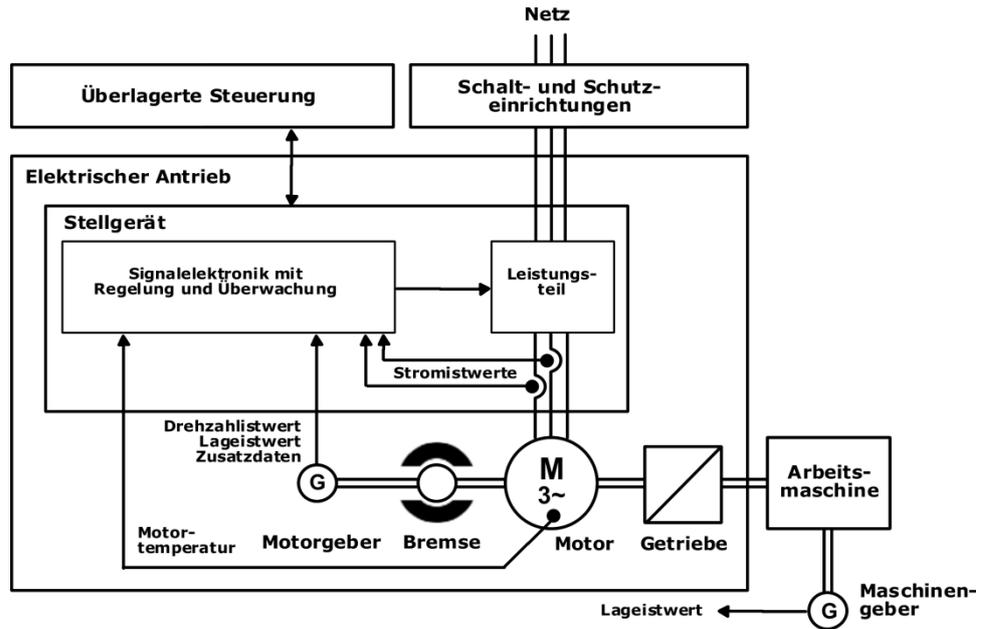


Bild 2-1 Aufbau moderner elektrischer Antriebe

Elektromotor Das Herzstück eines jeden elektrischen Antriebes ist sein Elektromotor. Er dient als Energiewandler, der die zugeführte elektrische Energie in mechanische Energie umsetzt. Im generatorischen Betrieb (z. B. bei Bremsvorgängen) erfolgt der Energiefluss in entgegengesetzter Richtung. Mechanische Energie wird dann in elektrische Energie umgewandelt.

Motorgeber Der am Motor angebaute Geber (Motorgeber) ermittelt aktuelle Bewegungsgrößen wie Drehzahl, Geschwindigkeit, Lage und stellt sie der Signalelektronik zur Verfügung.

Bremse Die Haltebremse verhindert Bewegungen des Motors bei abgeschaltetem Stellgerät. Besonders bei "hängenden" Lasten (z. B. Roboterarmen, Aufzügen, Hubwerken) sorgt die Bremse für die Fixierung des mechanischen Systems auch im inaktiven Zustand des Antriebes.

Getriebe Das Getriebe ist ein mechanischer Wandler. Es passt die vom Motor abgegebenen mechanischen Größen wie Drehzahl und Drehmoment an die Erfordernisse der Arbeitsmaschine an.

Eine weitere Aufgabe von Getrieben besteht darin, bei Bedarf die rotatorische Bewegung des Motors in eine lineare Bewegung zu wandeln.

Schalt- und Schutzeinrichtungen Schalt- und Schutzeinrichtungen trennen den elektrischen Antrieb bei Bedarf vom Netz und schützen den Antrieb sowie die Versorgungsleitungen vor einer Überlastung. Überlastungen

können zum einen durch die Arbeitsmaschine aber auch durch Fehler im Antrieb hervorgerufen werden.

Das Stellgerät besteht aus dem Leistungsteil und der Signalelektronik.

Stellgerät

- Das **Leistungsteil** "portioniert" die dem Motor zugeführte elektrische Energie und beeinflusst damit die vom Motor abgegebene mechanische Energie. Leistungsteile elektrischer Antriebe sind heute aus Leistungshalbleitern aufgebaut. Diese arbeiten als elektronische Schalter, über die die elektrische Energiezufuhr zum Motor an- und abgeschaltet wird. Integrierte Messsysteme erfassen die elektrischen Ströme und Spannungen und stellen sie der Signalelektronik zur Verfügung.
- Die **Signalelektronik** ist das "Gehirn" des elektrischen Antriebes. Sie bestimmt die Steuersignale für das Leistungsteil so, dass sich an der Motorwelle die gewünschten Kräfte bzw. Bewegungen einstellen. Dazu verfügt die Signalelektronik über verschiedene Steuer- und Regelfunktionen. Die erforderlichen Istwerte der elektrischen Größen erhält die Signalelektronik vom Leistungsteil, mechanische Größen wie Drehzahl und Lage werden vom Motorgeber bereitgestellt. Ihre Sollwerte erhält die Signalelektronik von einer überlagerten Steuerung. An dieses gibt sie auch aktuelle Istwerte zurück.

Neben den erforderlichen Steuer- und Regelfunktionen übernimmt die Signalelektronik auch Schutzfunktionen und verhindert unzulässige Überlastungen für das Leistungsteil und den Motor.

2.2 Überblick über die verfügbaren Antriebslösungen

Elektrische Antriebe sind äußerst vielgestaltig und in unterschiedlichsten Ausführungen verfügbar. Ihre Systematik erfolgt am besten unter Betrachtung von zwei Kriterien:

1. In welcher Anwendung wird der elektrische Antrieb eingesetzt und über welche Fähigkeiten zur Verstellung der Drehzahl muss der Antrieb dazu verfügen?
2. Wie wird der elektrische Antrieb technisch realisiert?

2.2.1 Anwendung des elektrischen Antriebes

Elektrische Antriebe haben die Aufgabe, Elemente einer Maschine oder Anlage zu bewegen. Je nach Anwendung sind dabei unterschiedliche Anforderungen an die Drehzahlverstellbarkeit zu erfüllen. Entsprechend dieser Anforderungen lassen sich grob 3 Kategorien von elektrischen Antrieben bilden:

- Konstantantriebe
- Drehzahlveränderliche Antriebe
- Servoantriebe



Bild 2-2 Klassifizierung elektrischer Antriebe bezüglich der Drehzahlverstellbarkeit

Konstantantriebe

Konstantantriebe werden mit einer festen Drehzahl betrieben. Sie verfügen lediglich über Einrichtungen zum Zu- und Abschalten sowie zum Schutz vor Überlastung. Eine Einrichtung zur Drehzahlverstellung ist nicht vorhanden, so dass sich belastungsabhängig durchaus Drehzahlschwankungen ergeben können.

Typische Anwendungen für Konstantantriebe sind Lüfter und Pumpen, die mit einem Asynchronmotor direkt am Netz betrieben werden.

Drehzahlveränderliche Antriebe

Drehzahlveränderliche Antriebe sind in ihrer Drehzahl verstellbar und mit mindestens zwei verschiedenen Drehzahlen betreibbar. Diese Antriebe verfügen neben dem Elektromotor über ein Stellgerät, dass für die Drehzahlverstellung verantwortlich ist. Je nach Anforderung ist das Stellgerät entsprechend komplex und gestattet unterschiedliche Stellbereiche und Genauigkeiten für die Drehzahl.

- **Drehzahlumschaltbare Antriebe** ermöglichen den Betrieb mit mindestens zwei verschiedenen Drehzahlen.
Beispielanwendungen sind drehzahlumschaltbare Lüfter und Pumpen oder Fahrwerke mit Vor- und Rückbewegung. Zum Einsatz kommen typischerweise Asynchronmotoren mit Schützsteuerungen.
- **Drehzahlsteuerbare Antriebe** sind in ihrer Drehzahl stufenlos verstellbar. Allerdings erfolgt auch hier keine Rückführung des Drehzahlwertes, so dass sich je nach Ausführung des Antriebes lastabhängig Abweichungen von der Sollzahl ergeben können. Für die Drehzahlsteuerung sind Stellgeräte mit elektronischen Leistungsteilen erforderlich.
Beispiele für derartige Antriebe sind Asynchronmotoren mit Frequenzumrichtern und U/f-Steuerung.
- **Drehzahlregelbare Antriebe** sind in ihrer Drehzahl ebenfalls stufenlos verstellbar und erfassen die aktuelle Drehzahl des Motors. Damit können Abweichungen der Drehzahl vom gewünschten Sollwert erkannt und korrigiert werden. Für drehzahlgeregelte Antriebe werden leistungsfähige Stellgeräte mit entsprechenden Regelalgorithmen benötigt. Eine sehr weit verbreitete Ausführung des drehzahlgeregelten Antriebes stellt der Asynchronmotor mit Frequenzrichter und vektorieller Regelung dar.



Bild 2-3
Frequenzumrichter und Drehstromasynchronmotoren für drehzahlveränderliche Antriebe,
Quelle: Siemens AG

Servoantriebe

Servoantriebe sind so optimiert, dass sie Maschinen- und Anlagenelemente positionieren können. Die dafür erforderlichen Drehzahländerungen können Servoantriebe sehr schnell und präzise ausführen. Sie sind damit für komplexe Bewegungsvorgänge, die durch sich laufend ändernde Geschwindigkeiten gekennzeichnet sind, besonders gut geeignet. Servoantriebe kommen in allen Bereichen des Maschinenbaus zum Einsatz und werden häufig durch Synchronmotoren mit Frequenzumrichtern realisiert.



Bild 2-4
Stellgeräte und Motoren für Servoantriebe,
Quelle: Siemens AG

2.2.2 Technische Realisierung des elektrischen Antriebes

Im Laufe der Zeit haben sich verschieden Typen von Elektromotoren herausgebildet, die jeweils spezifische Stärken und Schwächen sowie bevorzugte Leistungsbereiche aufweisen. Aus diesem Grund und in Verbindung mit der sehr langen Lebensdauer von Motoren sind fast alle Motortypen auch in heute noch anzutreffen. Berücksichtigt man zusätzlich die verschiedenen Ausprägungen an Stellgeräten, ergibt sich eine Vielzahl von Antriebsvarianten. Nachfolgend sollen nur die Grundvarianten an Motoren sowie ihre möglichen Stellgeräte vorgestellt werden.

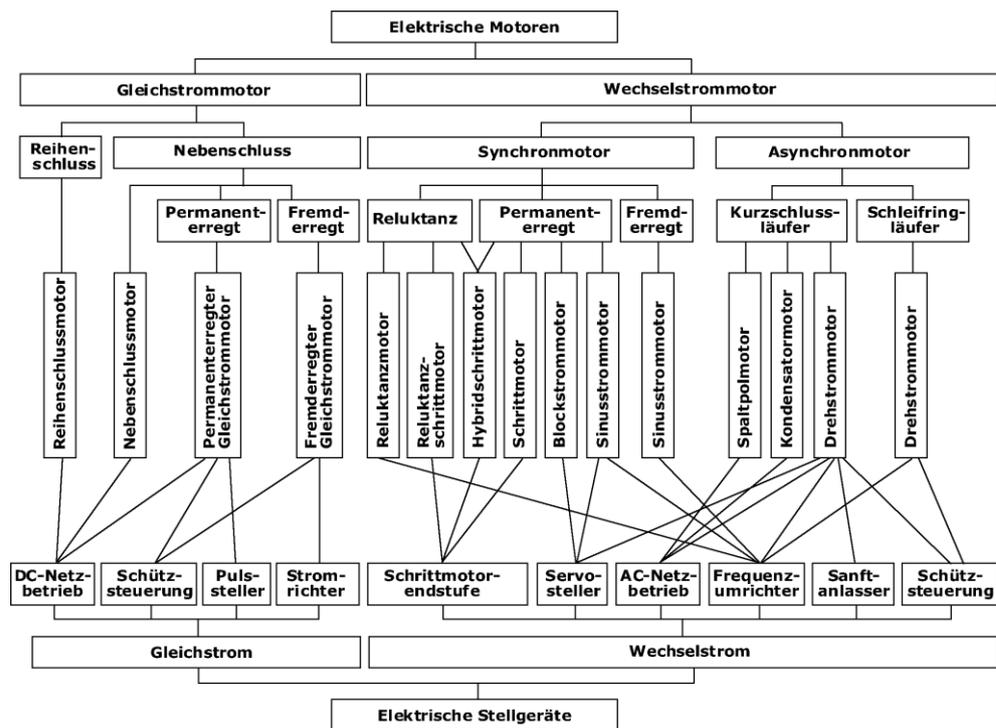


Bild 2-5 Klassifizierung elektrischer Antriebe nach ihrer technischen Realisierung

Entsprechend der Form des Motorstromes unterscheidet man Gleichstromantriebe und Wechsel- bzw. Drehstromantriebe

- **Gleichstromantriebe** verwenden einen Gleichstrommotor und werden mit Gleichstrom betrieben. Bei kleineren Leistungen wird das erforderliche Magnetfeld mit Permanentmagneten, bei größeren Leistungen mit einer separaten Erregerwicklung erzeugt. Für Servoanwendungen kommen als Stellgeräte hochdynamische Pulssteller, für drehzahlveränderbare Antriebe Stromrichter zum Einsatz.

- **Wechselstromantriebe** verwenden Motoren, die mit ein- oder mehrphasigem Wechselstrom betrieben werden. Dabei hat die Frequenz des Motorstromes einen entscheidenden Einfluss auf die Motordrehzahl. Synchronmotoren folgen in ihrer Drehbewegung exakt der Frequenz des speisenden Stromes, während bei Asynchronmotoren eine Differenz zwischen der Frequenz des Motorstromes und der Drehfrequenz auftritt.

Antriebe mit Synchronmotoren verfügen im Allgemeinen immer über ein Stellgerät. Asynchronmotoren können sowohl direkt am Netz als auch mit Stellgeräten betrieben werden. Die Wahl des Stellgerätes hängt von den Anforderungen an die Drehzahlverstellbarkeit und die gewünschte Genauigkeit entsprechend Kap. 2.2.1 ab.

2.3 Fragen und Aufgaben

1. Was ist ein elektrischer Antrieb?
2. Aus welchen Komponenten besteht ein elektrischer Antrieb? Welche Aufgaben haben diese Komponenten?
3. Nach welchen Kriterien können elektrische Antriebe sinnvoll klassifiziert werden?
4. Klassifizieren Sie die in den folgenden Applikationen eingesetzten Antriebslösungen nach den in Aufgabe 3 festgelegten Kriterien!
 - Ein-/Ausschaltbarer Pumpenantrieb mit Asynchronmotor
 - Vorschubantrieb mit Synchronmotor in ein einer Drehmaschine
 - Spindelantrieb mit Asynchronmotor in ein einer Drehmaschine
 - Hubwerk mit Gleichstrommotor in einem Portalkran
 - Drehzahlverstellbarer Förderbandantrieb mit Asynchronmotor
 - Drehzahlverstellbarer Fahrzeugantrieb in einem Elektroauto mit Synchronmotor
 - Positionierantrieb in einer Verpackungsmaschine mit Synchronmotor