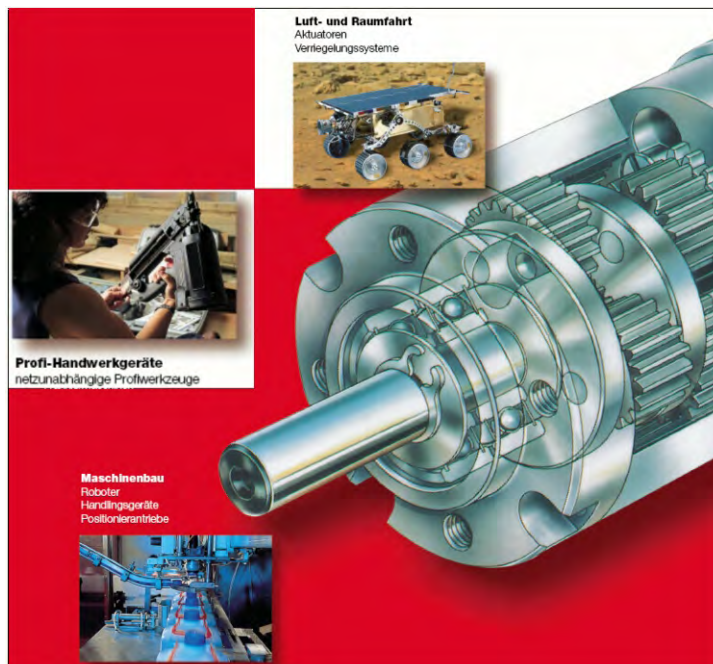


Skript Elektrische Antriebe

Prof. Dipl.-Ing. Peter F. Orlowski
Fachbereich ME



Inhaltsverzeichnis

1.	Aufgaben der elektrischen Antriebstechnik	4
1.1	Grundbegriffe der elektrischen Antriebstechnik	5
1.1.1	Magnetisches Feld	5
1.1.2	Elektromagnetismus	6
1.1.3	Magnetischer Kreis	9
1.1.4	Stromdurchflossener Leiter im homogenen Magnetfeld	11
1.1.5	Stromdurchfl. Leiterschleife im homogenen Magnetfeld	12
1.1.6	Induktionsgesetz	13
1.2	Transformator- und Stern-Dreieck-Schaltungen	13
1.3	Kleine Formel-Sammlung der Antriebstechnik	15
1.3.1	Moment und Leistung bei Standard-Motoren	15
1.3.2	Leistungsbilanz von Standard-GS- und DS-Motoren	16
1.4	Belastungs-Charakteristiken von Arbeitsmaschinen	18
1.5	Einige wichtige Schaltzeichen nach DIN-IEC	19
1.6	Stromrichterschaltungen	22
2.	GS-Maschinen	23
2.1	Anwendungsgebiete	23
2.2	Aufbau und Wirkungsweise eines GS-Motors	23
2.3	Fremderregter GS-Motor	26
2.4	GS-Nebenschlußmotor	32
2.5	GS-Reihenschlußmotor und Universalmotor	34
2.6	Anwendungen, Vergleich der drei Standard-GS-Motoren	36
2.7	Quasi-dynamischer Fahrvorgang eines Förderkorbes	37
2.7.1	Vier-Quadranten-Betrieb	39
2.8	Steuerung von GS-Antrieben	40
2.9	Stromrichtergespeiste GS-Antriebe	43
2.9.1	Kennlinie eines Thyristors und GTO's	43
2.9.2	Stromrichter für Mehr-Quadranten-Betrieb	45
3.	DS-Maschinen	49
3.1	Anwendungsgebiete	49
3.2	Aufbau und Wirkungsweise eines DS-Motors	49
3.3	DS-Asynchronmotor	53
3.4	Steuerung von DS-Antrieben	56
3.4.1	Anlassen von Motoren mit Schleifringläufer	56
3.4.2	Anlassen von Motoren mit Käfigläufer	58
3.5	Stromrichtergespeiste DS-Motoren	65
3.6	Die DS-Stromrichterantriebe im Vergleich	74
3.7	GS-Antriebe und DS-Antriebe im Vergleich	75
4.	Sonderbauformen- und Kleinantriebe	76
4.1	Formelsammlung für Kleinmotoren	76
4.2	Servomotor	77
4.3	Torquemotor	80
4.4	Reluktanzmotoren	81
4.5	Scheibenläufermotoren	83
4.6	Glockenankermotor	86
4.7	Spaltmotor	88
4.8	Vorschub und Positionierantriebe	90

4.8.1	Schrittmotor	91
4.8.2	Linearmotoren	94
5.	Betriebsarten elektrischer Maschinen	99
5.1	Die vier wichtigsten Betriebsarten S1, S2, S3, S5	99
6.	Personen- und Motorschutz, EMV	102
6.1	IP-Schutzarten und Aufstellungsarten	102
6.2	Motorschutz für Niederspannungs-DS-Motoren	102
6.3	EMV	102
6.4	Massenträgheitsmomente der Antriebstechnik	107
7.	Literaturverzeichnis	108
8.	Hersteller von Motoren, Getrieben, Steuerung	109
9.	Übungsaufgaben Elektrische Antriebe	110
10.	Prüfungsfragen-Vorbereitung	119

1. Aufgaben der elektrischen Antriebstechnik

Hauptaufgabe der Antriebstechnik ist die Erzeugung von geradlinigen oder rotatorischen mechanischen Bewegungen zum Transport von Personen, Gütern und Bauelementen innerhalb eines Arbeitsablaufs.

Solche Prozesse sind mit folgenden Schlagworten verknüpft:

Fahrzeugtechnik, Aufzüge, Förderantriebe, Pumpen, Walzwerke, Zentrifugen, Drehautomaten, Ventiltriebe, Meßtische, Uhren, Autofokus, Filmtransport, Robotik

Ausgehend von der Primärenergie für alle Antriebsarten konkurrieren mit dem elektrischen Antrieb teilweise die Dampfmaschine, der Verbrennungsmotor, die Gasturbine, der Hydraulik- und Pneumatikantrieb.

Eine moderne Prozeßführung ist jedoch ohne die elektrischen Antriebe kaum denkbar. Hier lassen sich für und gegen elektrische Antriebe einige Gesichtspunkte anführen:

Vorteile elektrischer Antriebe

Sie sind für nahezu beliebige Leistungen erhältlich (1W bei Uhren bis 100MW bei Kesselspeisepumpen).

Sie überstreichen einen weiten Drehzahl- und Drehmomenten-Bereich (10Nm und 100000/min bei Zentrifugen, 1MNm und 100/min bei Walzmotoren).

Sie sind umweltverträglich (keine feuergefährlichen Brennstoffe, keine Abgase, kaum Verschleißteile, kaum Geräuscentwicklung).

Sie sind sofort betriebsbereit und belastbar (kein Warmlaufen).

Die Verluste sind gering. Also sind der Wirkungsgrad und die Lebensdauer hoch.

Sie sind leicht steuerbar und regelbar. Ihre Kennlinien lassen sich leicht verändern (z.B. als elektrisches Getriebe).

Sie sind in allen vier Quadranten im Dauerbetrieb benutzbar und es besteht die Möglichkeit der Energierückspeisung in's Netz.

Den konstruktiven, an den Prozesse angepaßten Bauformen sind wenig Grenzen gesetzt (z.B. robuster Drehstrom-Asynchronmotor, Scheibenläufermotor, Glockenankermotor).

Nachteile elektrischer Antriebe

Sie sind abhängig von einer leistungsfähigen Stromversorgung (Stromrichter sind häufig erforderlich, Versorgung durch Batterie).

Sie haben meist ein höheres Leistungsgewicht als beispielsweise vergleichbare Hydraulikmotoren (Flugzeugbau).

Die Auswahl des optimalen Antriebssystems ist meist an den technischen und wirtschaftlichen Bedingungen des Einzelfalls orientiert. Die Unterstützung des Antriebs-Lieferanten ist dabei ebenso wichtig, wie der Kenntnisstand des Anwenders (Kommunikations-Schnittstelle).

Die zunehmende Fertigungs- und Produktions-Automatisierung führt zu einem deutlichen Anwachsen geregelter Antriebe und der damit verbundenen Forderungen an:

Regelbarkeit
Bedienkomfort
Inbetriebnahmefreundlichkeit
Servicefreundlichkeit
Verfügbarkeit
Betriebssicherheit
Kommunikationsfähigkeit Mensch - Maschine
Kostenoptimierung

1.1 Grundbegriffe elektrischer Antriebe

Zum Verständnis der Funktionsweise elektrische Antriebe gehören Kenntnisse über Entstehung und Charakter magnetischer und elektrischer Felder, die teilweise bereits in den Grundlagen der Elektrotechnik vermittelt werden.

Im freien Raum können Kräfte auf Körper einwirken, die sich weder als Stoß-, noch als Reibungs-, Trägheits- oder Gravitationskräfte deuten lassen. Solche Kräfte können auf die Wirkung magnetischer oder elektrischer Felder zurückgeführt werden.

1.1.1 Magnetisches Feld

Ein Magnet besitzt die Fähigkeit, auf Eisen, Nickel und Kobalt eine Kraftwirkung auszuüben.

Die Erfahrung zeigt, da jeder Magnet einen Nord- und Südpol ausbildet und es ergibt sich durch Beobachtung:

Gleichnamige Pole stoßen sich ab -
ungleichnamige Pole ziehen sich an.

Jeder Magnet versetzt den ihn umgebenden Raum in einen Zustand, den man als magnetisches Feld bezeichnet.

Dieses Feld ist nicht unmittelbar wahrzunehmen. Man kann es mit Hilfe von kleinen Eisenfeilspänen nachweisen. Es ist dann der Feldverlauf anschaulich darstellbar.

Infolge der Kraftwirkung richten sich die Eisenteilchen entlang bestimmter "Linien" aus, die man Feldlinien nennt. Aber auch zwischen den Feldlinien ist der Raum felderfüllt.

Betrachtet man die Eigenschaften eines Permanent-Magneten genauer, so sind folgende Dinge festzustellen:

Die Feldlinien sind geschlossene Kurvenzüge.

Innerhalb eines Magneten ist das Feld homogen, d.h. die Feldlinien verlaufen parallel zueinander im gleichen Abstand.

Innerhalb eines Magneten verlaufen die Feldlinien vom Süd- zum Nordpol, außerhalb vom Nord- zum Südpol.

Die Feldlinien stehen senkrecht auf den Aus- und Eintrittsflächen des Magneten.

Die Feldliniendichte ist ein Maß für die Feldstärke bzw. Flußdichte.

Natürliche oder Permanentmagnete finden zahlreiche Anwendung. So z.B. als Haftmagnete, Magnetabscheider, bei magnetischen Kupplungen oder Bremsen, bei elektrischen Antrieben im Läufer oder Ständer, bei Meßinstrumenten, Uhren, Aufzeichnungsgeräten usw.

1.1.2 Elektromagnetismus

Um jeden stromdurchflossenen Leiter bildet sich ein Magnetfeld (Bild 1.1). Ist der Leiter massiv, geradlinig und (theoretisch) unendlich lang, bilden sich konzentrische Kreise aus, die senkrecht zur Längsorientierung des Leiters stehen. Die Richtung des Stromes hat Wirkung auf die Richtung des Feldes. Man spricht von der **“Rechte-Hand-Regel”**, sie lautet:

Zeigt der Daumen der rechten Hand in Stromflußrichtung, geben die gekrümmten Finger die Richtung des Feldes an.

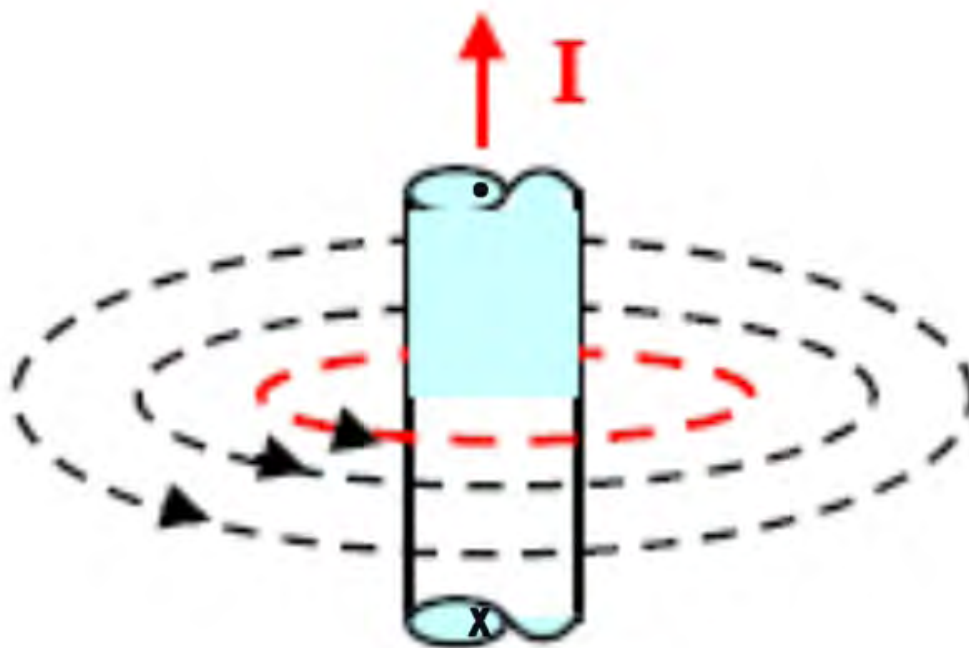


Bild 1.1 Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter

Feldstärke:

Oersted hat 1820 für stromdurchflossene Massivleiter durch Messung herausgefunden, dass das Wegintegral der magnetischen Feldstärke H entlang eines Kreisringes um den z-gerichteten Leiter dem Leiterstrom I entspricht.

Es ist

$$I = \oint H \, ds = \int_0^2 H(r) \, r \, d\varphi = 2\pi r H(r)$$

Demnach ist die Feldstärke H_a außerhalb eines Massivleiters

$$H_a = H(r) = \frac{I}{2\pi r}$$

Darin ist $2\pi r$ genau der Kreisumfang, also die Feldlinienlänge C . Für nicht unendlich lange Leiter gilt ähnliches.

Bei einer Spule beispielweise, haben alle nebeneinander liegenden Leiter die gleiche Stromrichtung (Bild 1.2), so dass sich ihre Felder summieren. Es ergibt sich ein Gesamtfeld, welches dem eines Stabmagneten gleichkommt. Es ist leicht einzusehen, dass die Feldstärke nun mit der Anzahl der Leiterschleifen N steigt, also mit $C = \text{Leiterschleifenlänge } l$:

$$H_a = I \frac{N}{l}$$

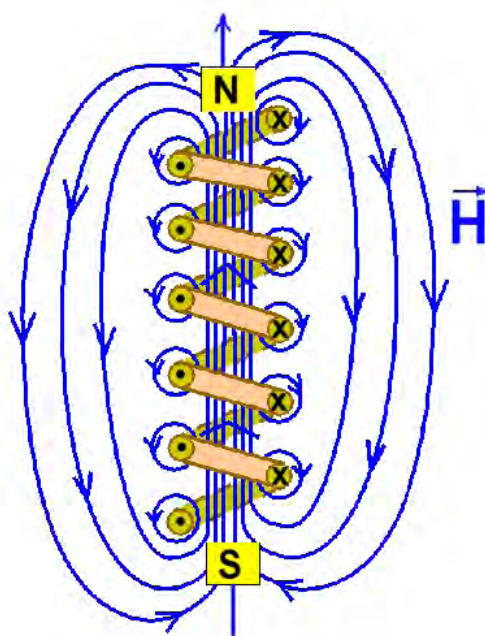


Bild 1.2 Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule

Magnetischer Fluß:

Zum stromflußähnlichen Charakter des magnetischen Flusses Φ sei bemerkt, dass hier nichts fließt! Letztlich läßt sich nur seine Wirkung über die Flußdichte B erkennen.

Magnetische Flußdichte:

Die magnetische Flußdichte ist gleich dem Fluß, der senkrecht aus der Fläche A (Polfläche des Magneten) austritt. Es ist also

**Permeabilität:**

Die magnetische Flußdichte B und die Feldstärke H sind über die Permeabilität (magnetische Leitfähigkeit) miteinander verknüpft.

Die Permeabilität ist also eine Materialkonstante. Sie ist definiert als das Produkt aus der magnetischen Feldkonstanten und der relativen Permeabilitätszahl, also insgesamt ist

$$\text{mit } \mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{Vs/Am}$$

Somit gibt die Permeabilitätszahl μ_r an, um wieviel mal höher die magnetische Flußdichte im betreffenden Werkstoff ist, als im Vakuum (vereinfacht auch in Luft mit $\mu_r = 1$). Der Zusammenhang zwischen B und H in Luft ist somit nahezu linear. In Eisen ist die magnetische Leitfähigkeit bzw. Permeabilität wesentlich größer. Sie beträgt bei Magneteisen z.B. $\mu_r = 1,1 \cdot 10^4$. Die Abhängigkeit $B=f(H)$ verschiedener Materialien (bei erstmaliger Magnetisierung) zeigt die Magnetisierungskennlinie (Bild 1.3). Der steile Anstieg zu Beginn der Magnetisierung ist darin begründet, dass zur Ausrichtung der meisten Molekularmagnete nur wenig Energie benötigt wird. Um jedoch sämtliche Molekularmagnete zu magnetisieren bedarf es eines sehr hohen Energieeinsatzes. Man spricht dann vom sog. Sättigungsbereich der Kennlinie.

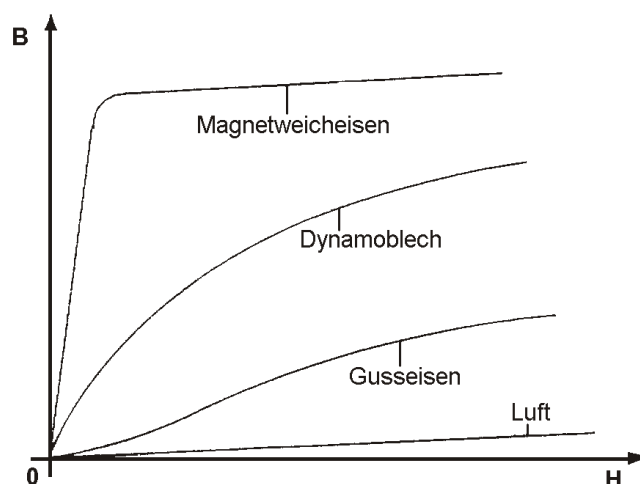


Bild 1.3 Magnetisierungskennlinie verschiedener Materialien

1.1.3 Magnetischer Kreis

Den in sich geschlossenen Weg der Feldlinien durch Material nennt man magnetischen Kreis (Bild 1.4). Dieser ist hier am Beispiel eines Elektromagneten dargestellt.

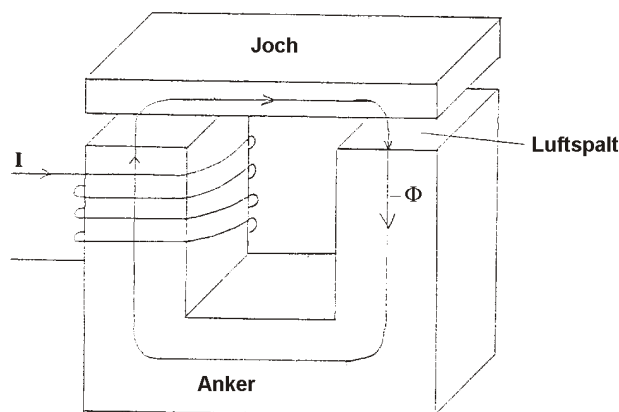


Bild 1.4 Elektromagnet

Durchflutung:

Die Ursache für den magnetischen Fluß ist die Durchflutung. Sie ist mit der elektrischen Spannung U vergleichbar.

Je größer der Strom und die Windungszahl einer Spule, um so höher ist die Durchflutung, so dass gilt:

$$= I N$$

Man kann die Durchflutung auch ausdrücken als Summe der vom Strom I erzeugten Feldstärkeanteile in den einzelnen Materialabschnitten. Dann folgt:

$$= H l_{\text{Anker}} + H l_{\text{Joch}} + H l_{\text{Luft}} = \sum_{i=1}^n H_i l_i$$

Hysteresis:

Magnetisiert man anfangs unmagnetisches Eisen durch Steigerung des äußeren Magnetfeldes mit dem Strom I , so nimmt die magnetische Flußdichte B entlang der sog. Neukurve zu (Bild 1.5).

Läßt man von einem beliebigen Punkt dieser Neukurve das äußere Magnetfeld wieder abfallen, geht die Flußdichte bei $H=0$ nicht auf Null zurück.

Es bleibt infolge der inneren Reibung der Molekularmagnete ein Restmagnetismus erhalten, die magnetische Remanenz B_r .

Erst bei Umkehr der Stromrichtung bis hin zur sog. Koerzitivfeldstärke H_k wird die Flußdichte B schließlich Null. Erfolgt die Magnetisierung mit Wechselspannung, ergibt sich der in Bild 1.5 dargestellte Kurvenverlauf, den man

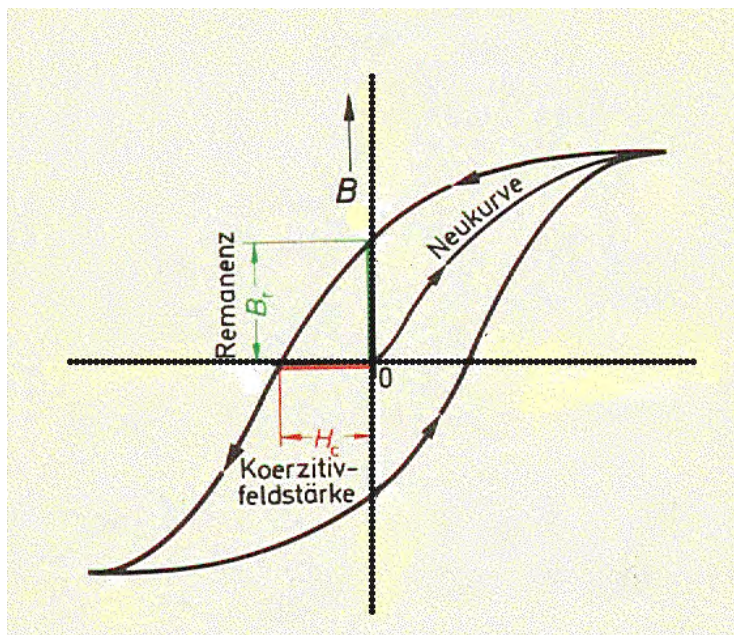


Bild 1.5 Hystereseschleife

Hystereseschleife nennt. Die Folge der inneren Reibung der Molekularmagnete ist eine Erwärmung des Eisenkerns. Je nach Art des Werkstoffes (hart- oder weichmagnetisch), ist die Hystereseschleife breit oder schmal. Man kann sagen, da die Hystereseverluste bzw. die Reibungsverluste der Molekularmagnete proportional dem Flächeninhalt der Hystereseschleife sind (Bild 1.6).

Außerdem hängen sie von der Frequenz des Wechselstromes ab. Für N und l gleich konstant (z.B. Ankerwicklung GS-Maschine) wird $H \sim I$ und mit $A = \text{konstant}$ wird $B \sim \Phi$, so dass schließlich $B = f(H)$ in die Funktion $\Phi = f(I)$ übergeht. Diese Kennlinie wird, wie später noch gezeigt..

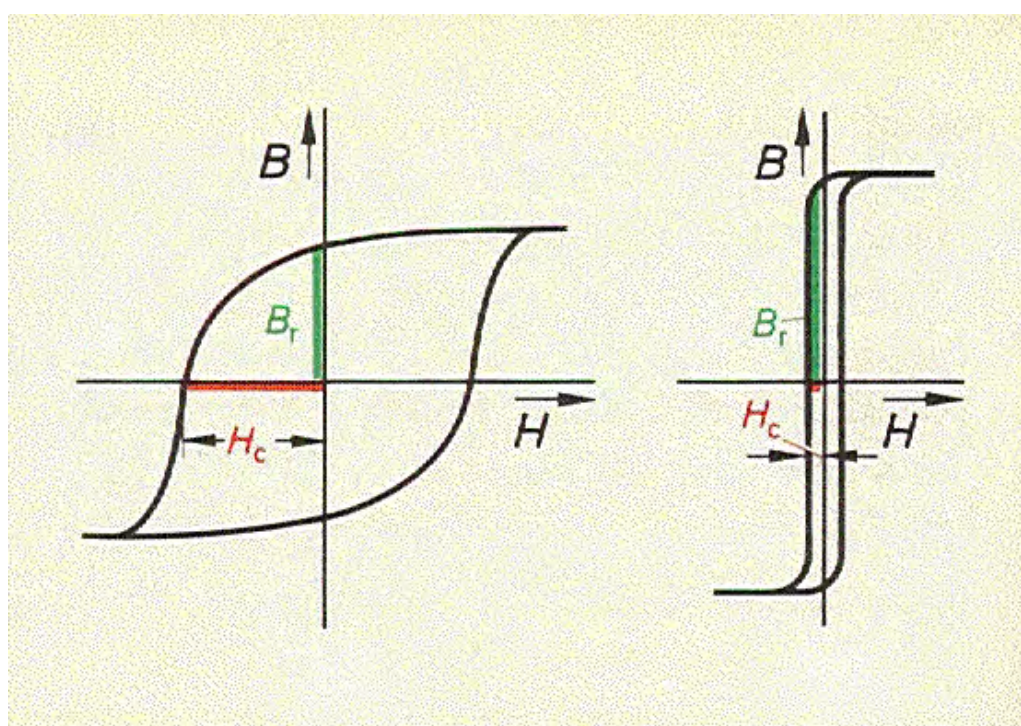


Bild 1.6 verschiedene Hystereseschleifen

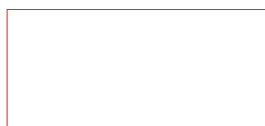
1.1.4 Stromdurchflussener Leiter im Magnetfeld

Ein frei beweglicher stromdurchflussener, linienhafter Massivleiter befinde sich in einem homogenen Magnetfeld (Bild 1.7).

Faraday hat durch Beobachtung herausgefunden, dass auf einen solchen Leiter eine Kraft F wirkt, deren Wirkrichtung sich mit der sog. **“Linke-Hand-Regel”** angeben lässt.

Treten die Feldlinien des Nordpols durch die Handfläche der linken Hand und zeigen die Finger in Stromrichtung, gibt der abgespreizte Daumen die Bewegungsrichtung des Leiters an.

Die Kraft wächst mit dem Strom I , der Dichte des Feldes B und der vom Magnetfeld überdeckten, wirksamen Leiterlänge l .



Die Kraftwirkung beruht darauf, dass das deformierte Gesamtfeld wieder seinen Ruhezustand einnimmt und dabei den Leiter auslenkt.

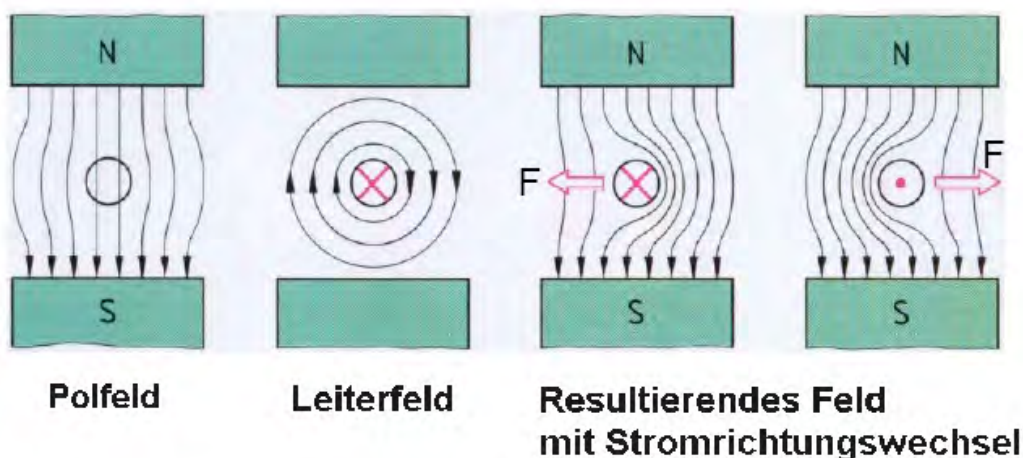
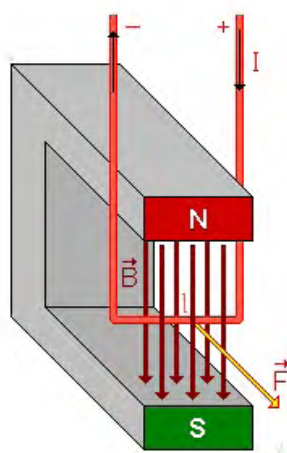


Bild 1.7 Stromdurchflussener Leiter im Magnetfeld

1.1.5 Stromdurchflossene Leiterschleife im Magnetfeld

Eine drehbar aufgehängte, stromdurchflossene Leiterschleife erfährt im homogenen Magnetfeld ein Drehmoment der Größe $M = F D/2$.

Es läßt sich durch vektorielle Addition der Felder von Leiterschleife und Permanentmagnet ein deformiertes Gesamtfeld zeigen, das die beiden Tangentialkräfte $F/2$ erzeugt (Bild 1.8).

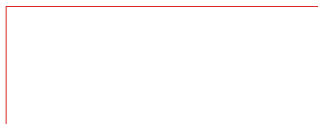
Versucht das Gesamtfeld seine Ruhelage einzunehmen, wird die Leiterschleife in Drehung versetzt. Dies gelingt bis zum Eintritt in die sog. *Neutrale Zone*, in der die Tangentialkräfte verschwinden.

Bei einem realen Motor mit größerer Masse (und auch mehreren Leiterschleifen) wird nach dem durchlaufen der Neutralen Zone infolge Massenträgheit die Stromrichtung in der jeweiligen Leiterschleife umgeschaltet. Auf diese Weise wirken die Tangentialkräfte in der gleichen Drehrichtung wie zuvor. Die Leiterschleife dreht sich also kontinuierlich in einer Drehrichtung.

Die notwendige Umschaltung des Stromes erfolgt mit dem sog. Kommutator (Kollektor). Er besteht im einfachsten Falle aus zwei gegeneinander isolierten, halbkreisförmigen Kupferscheiben, auf denen Kohlebürsten schleifen.

1.1.6 Induktionsgesetz

Führt man einem geschlossenen physikalischen System, wie in Abschnitt 1.1.4 geschehen, elektromagnetische Energie zu, kommt es zu einer Bewegung. Faraday hat durch Messung 1831 herausgefunden, dass dieser Vorgang reversibel ist. Führt man nämlich dem gleichen System Bewegungsenergie zu, wird im Leiter ein Strom fließen. Die physikalische Deutung dieses Phänomens nennt man Induktionsgesetz. Es lautet:



Man kann aus diesem fundamentalen Gesetz eine Systemgleichung für die elektrischen Antriebe ableiten. Für

(Anfahren bei $t=0$)



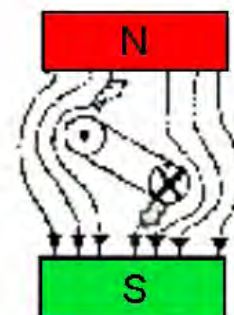
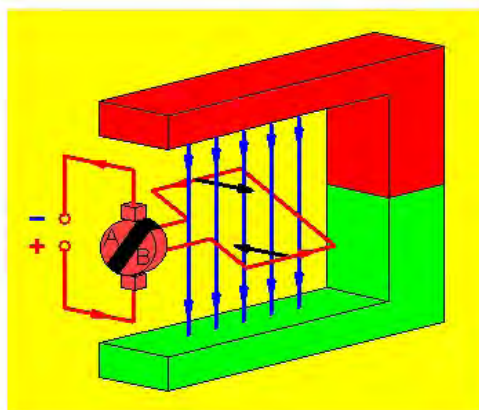
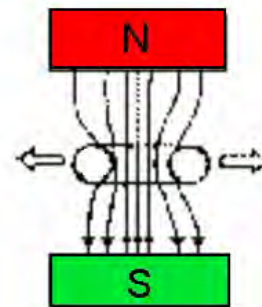
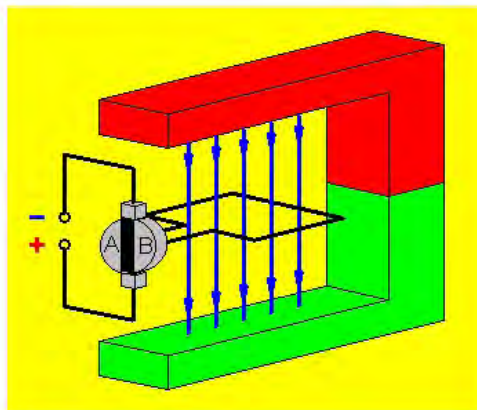
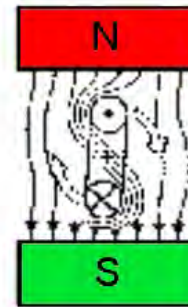
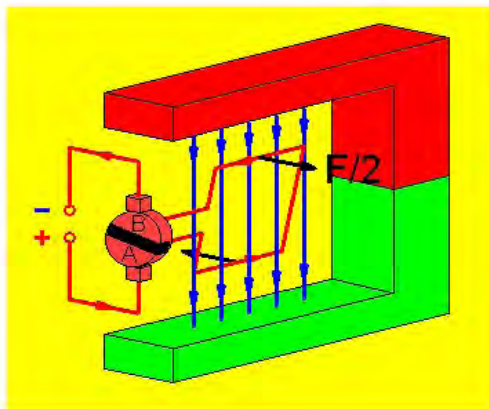


Bild 1.8 Stromdurchflossene Leiterschleife im Magnetfeld (Rechtslauf)

1.2 Transformator- und Stern-Dreieck-Schaltungen

Damit bei einem Transformator auf der Sekundärseite der Wicklung eine Wechselspannung induziert werden kann, ist auf der Primärseite ebenfalls eine Wechselspannung notwendig. Entsprechend dem Induktionsgesetz ergibt sich (ohne eine Belastung an die Sekundärseite anzuschließen sowie ohne Wirbelstrom- und Streuverluste) die einfache Gleichung (Bild 1.9)

D.h., die Spannungen verhalten sich wie die zugehörigen Wicklungszahlen. Auf diese Weise werden Hochspannungen in die üblichen Spannungsarten des Drehstromnetzes heruntertransformiert. Die beiden unterschiedlichen Wechselspannungen 230V und 400 V werden durch die Stern- und Dreiecksschaltung erzeugt (Bild 1.10). Trafos werden häufig auch zur Entkopplung und Oberschwingungsdämpfung beim Einsatz von Stromrichtern eingesetzt.

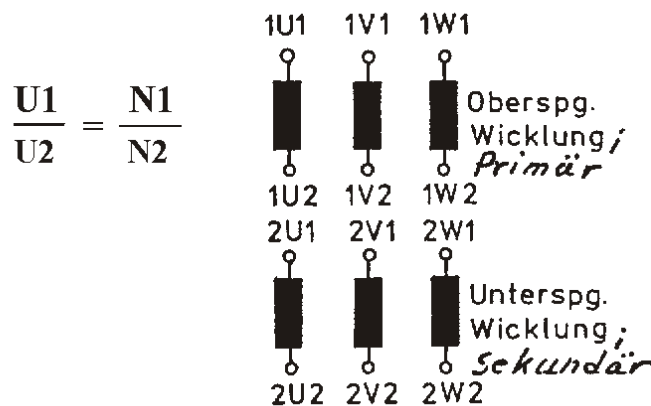


Bild 1.9 Transformatorprinzip

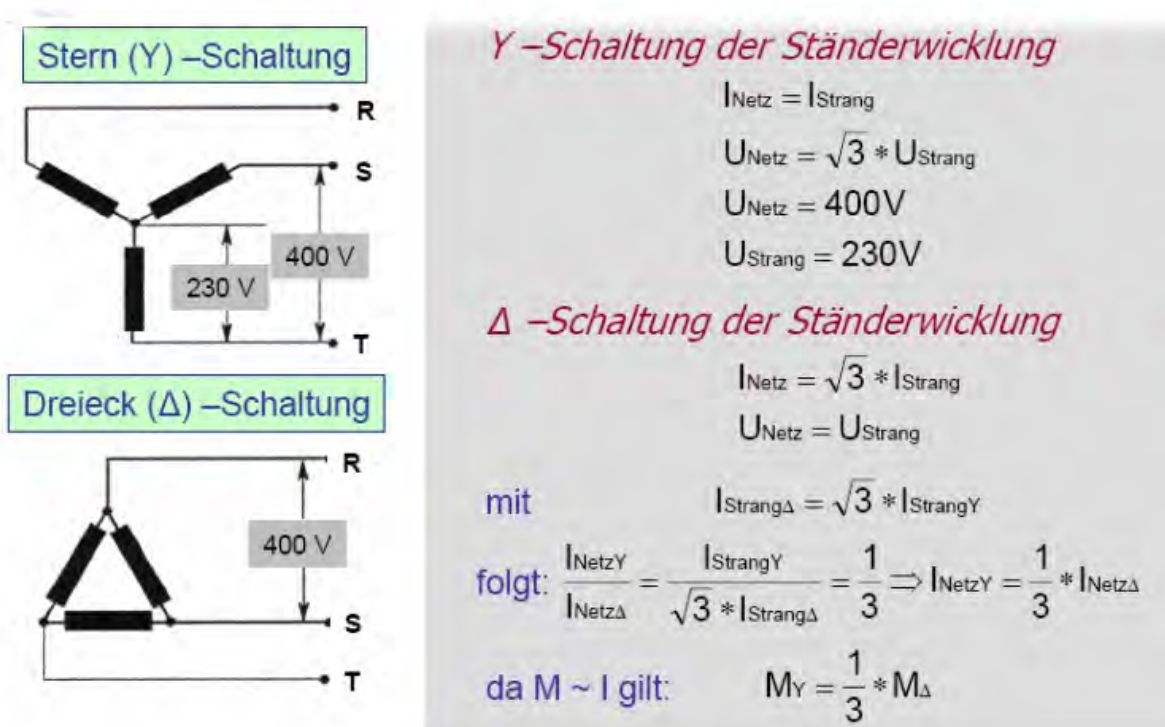


Bild 1.10 Ströme und Spannungen in der Stern-Dreieckschaltung

1.3 Kleine Formelsammlung der Antriebstechnik

1.3.1 Moment und Leistung bei Standard-Motoren

Das Moment eines Gleichstrommotors läßt sich mit Hilfe der Kraftwirkung des magnetischen Feldes auf eine Leiterschleife ableiten.

$$M = F \frac{d_A}{2} \quad \text{mit} \quad F = B I l N \quad \text{folgt}$$

$$M = B I l N \frac{d_A}{2} = \frac{I l N d_A}{2 A}$$

mit $C_2 = \frac{l N d_A}{2 A}$ und $I = I_A$ Ankerstrom folgt

$$M = C_2 I_A$$

und für das Nennmoment des GS-Motors

$$M_N = C_2 I_{AN} \text{Max}$$

Außerdem gilt der Zusammenhang: $C_1 = 2 C_2$ (Fischer: "Elektr. Maschinen")

In ähnlicher Weise läßt sich eine Gleichung für das Moment eines DS-Motors angeben, und mit der synchronen Drehzahl n_1 auch ein Näherungsformel:

$$M = C_3 \cdot \Theta_H \cdot I_1 \cdot \sin \alpha \quad M_N = \frac{n_1 - n}{n_1 - n_N}$$

Darin ist I_1 der Leiterstrom, Θ_H der wirksame magnetische Fluß und α der Winkel zwischen dem Strom- und Flußvektor.

Ist das Motormoment aus dem Beharrungsmoment M_L und dem Beschleunigungsmoment M_A einschließlich eines Getriebes zwischen Motor und Last zu berechnen (ohne Reibungsverluste), so gilt:

$$M = \frac{M_L}{i_G} + M_{A \text{ bez}} \quad \text{sowie} \quad J_{\text{ges bez}} = \frac{J_L}{i_G^2}$$

mit $M_{A \text{ bez}} = 2 J_{\text{ges bez}} \frac{n_{\text{Mot}}}{T_H} = 2 J_{\text{ges bez}} \frac{i n_L}{T_H}$

Außerdem erhält man aus Nennmoment und Nenndrehzahl die Nennleistung.

$$P_N = 2 \pi n_N M_N$$

1.3.2 Leistungsbilanz von Standard-GS- und DS-Motoren

Der Wirkungsgrad η enthält alle Verluste und ist der Quotient aus abgegebener Nennleistung P_N und zugeführter elektrischer Leistung P_{zu} .

$$\eta = \frac{P_N}{P_{zu}} = \frac{P_N}{P_A + P_E} = \frac{2 \cdot n_N \cdot M_N}{U_{AN} \cdot I_{AN} + U_E \cdot I_E}$$

Die Ankerleistung P_A des GS-Motors erhält man aus der Ankerkreisgleichung durch Multiplikation mit I_A (Bild 1.11), so dass gilt:

$$P_A = U_{AN} \cdot I_{AN} = U_q \cdot I_{AN} + I_{AN}^2 R_A = P_i + P_{VA}$$

P_{VA} und $P_{VEr} = I_{EN}^2 R_E$ sind die Stromwärmeverluste im Anker und Ständer. Dazu kommen noch die Reibungsverluste P_{VR} und die Magnetisierungsverluste P_{VFe} .

Für einen DS-Motor (hier mit Schleifringläufer) ergeben sich ähnliche Verhältnisse (Bild 1.12).

Von der zugeführten elektrischen Leistung P_{zu} gehen die Ständerverluste P_{VS} ab. Sie beinhalten letztlich die Magnetisierungs- und Stromwärmeverluste der Ständerwicklung.

In den Läufer wird dann die sog. Luftspalt-Leistung P_L übertragen. Von der Nennleistung des Motors gehen dann noch die Reibungsverluste des Läufers P_{VRL} und der Schleifringe P_{VRS} ab.

Außerdem wird die abgegebene Leistung des Motors beim Anfahren durch evtl. eingesetzte Anlaßwiderstände reduziert (P_{VRa}). Es ist demnach

$$P_L = P_N + P_{VRL} + P_{VRS} + P_{VRa}$$

und mit P_{zu} gilt für den Wirkungsgrad:

$$P_{zu} = P_L + P_{VS} = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$$

$$\eta = \frac{P_N}{P_{zu}} = \frac{P_N}{P_L + P_{VS}}$$

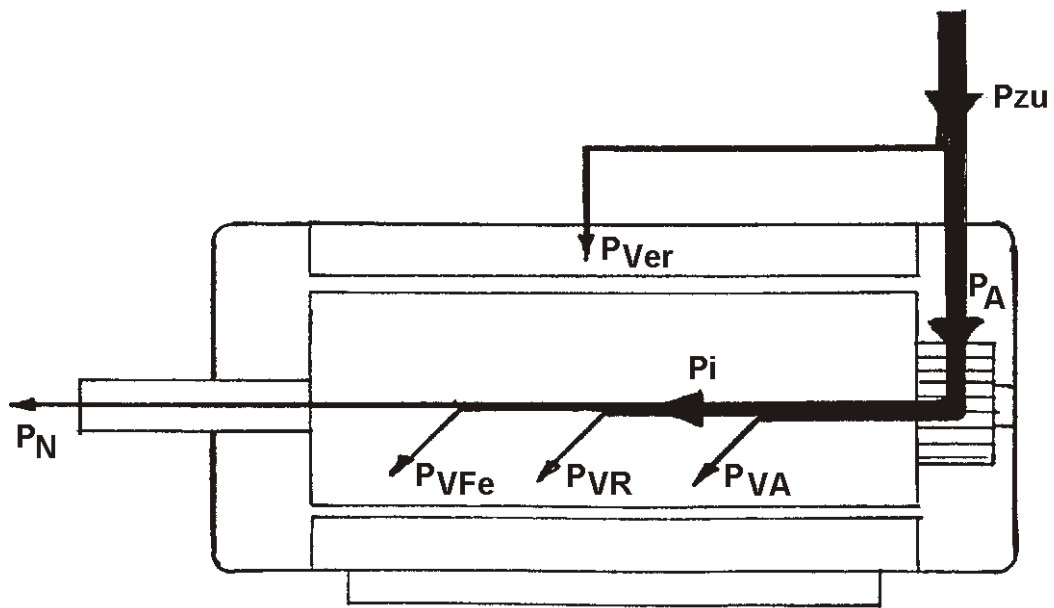


Bild 1.11 Leistungsbilanz eines GS-Motors

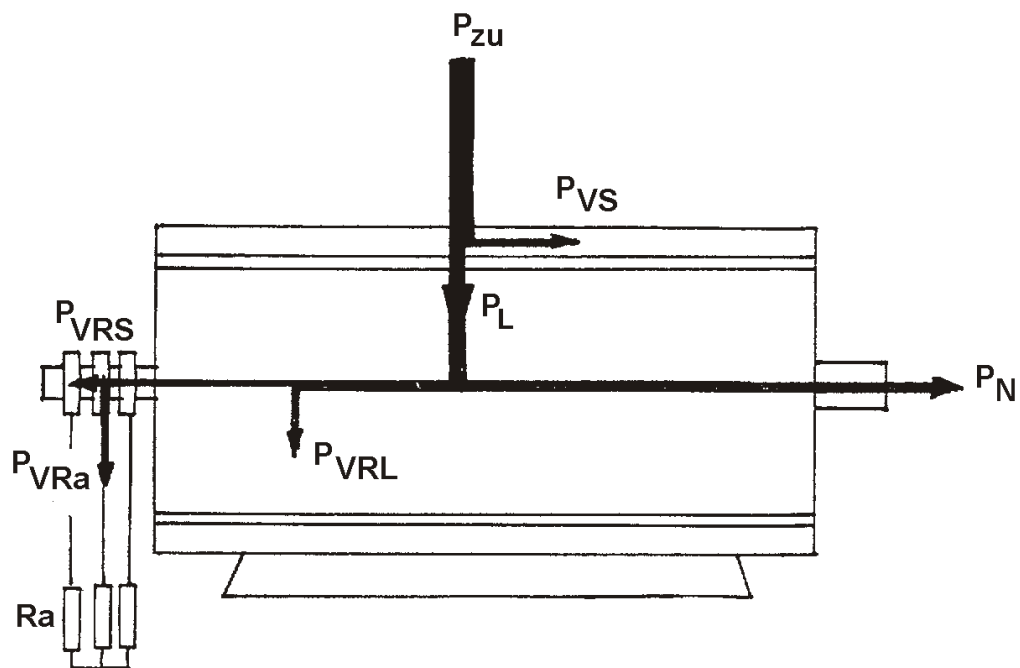


Bild 1.12 Leistungsbilanz eines DS-Schleifringläufermotors

1.4 Belastungs-Charakteristiken von Arbeitsmaschinen






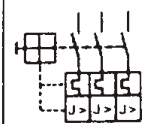
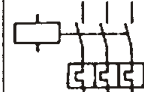











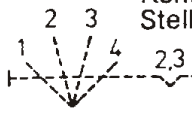





Aus den charakteristischen physikalischen Größen einer Arbeitsmaschine lassen sich mit Hilfe der Gesetze der Mechanik oder durch Messung typische Belastungskennlinien angeben.

In Bild 1.13 sind sechs unterschiedliche, häufig vorkommende Kennlinien dargestellt.

- a) Bei Hebezeugen und Aufzügen (mit konst. Seiltrommeldurchmesser) ist das Widerstands- bzw. Belastungsmoment proportional der zu hebenden Masse und wegen der niedrigen Geschwindigkeit praktisch drehzahlunabhängig.
- b) Arbeitsmaschinen mit reiner Reibungs- und Formgebungsarbeit haben ein weitgehend drehzahlunabhängiges Widerstandsmoment einschließlich eines Losbrechmoments beim Anfahren (Förderbänder, Walzen, Mühlen, Werkzeugmaschinen mit konst. Schnittkraft).
- c) Geschwindigkeitsproportionale Reibungskräfte (Viskosereibung) treten bei der Papier- und Textil-Bearbeitung auf.
- d) Luft- und Flüssigkeitsreibung, wie sie bei Lüftern, Schiffsschrauben, Zentrifugal- und Kreiselpumpen auftritt, bewirkt eine quadratische bis kubische Abhängigkeit des Widerstandsmoments von der Drehzahl.
- e) Arbeitsmaschinen, die auf konstante Geschwindigkeit bzw. Leistung geregelt werden, weisen einen hyperbolischen Verlauf der Belastungskennlinie auf (Wickelantriebe, Haspeln, Rundschleifmaschinen, Werkzeugmaschinen).

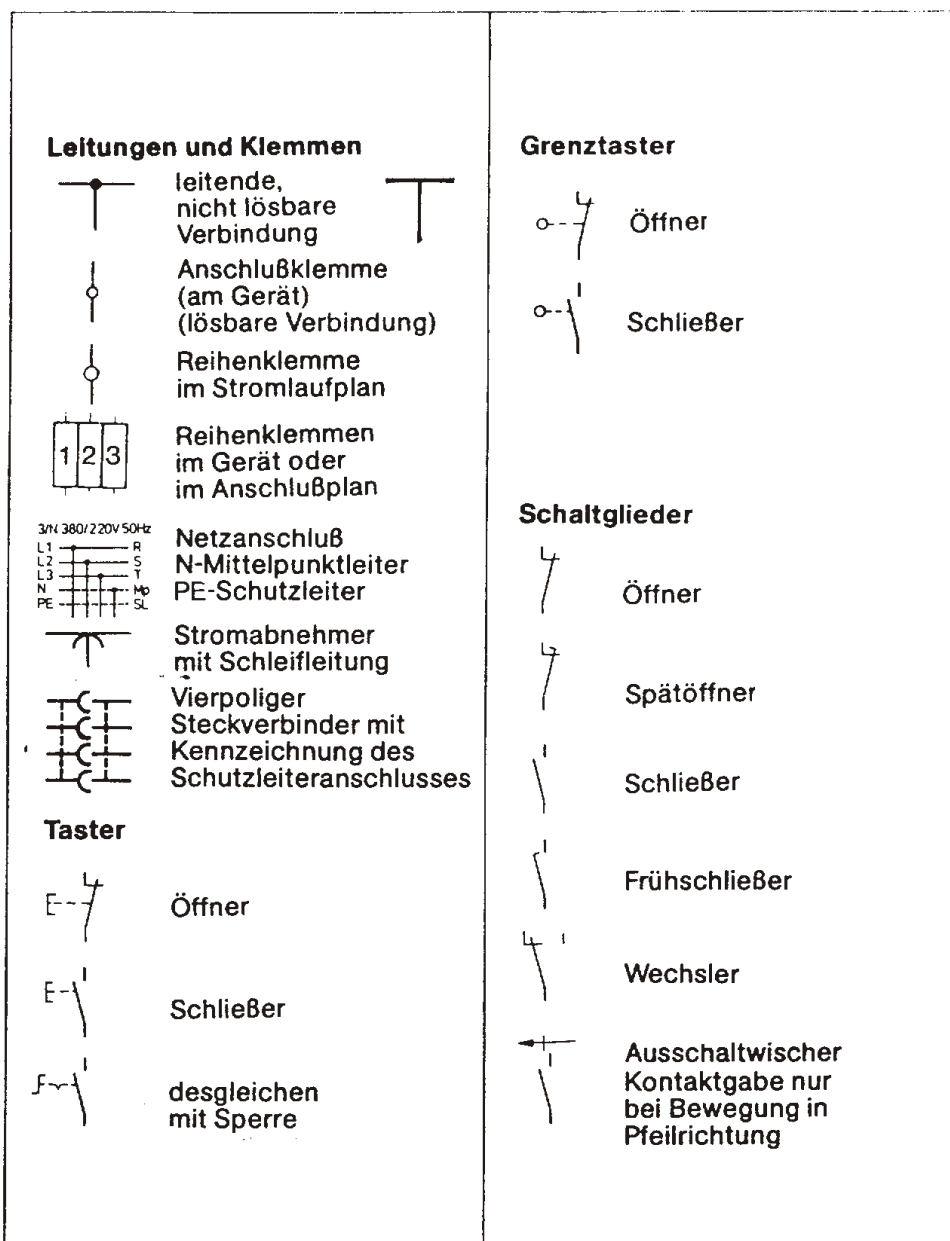
1.5 Einige wichtige Schaltzeichen nach DIN-IEC

Schaltzeichen (DIN 40700 – 40716)






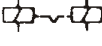




















Schutzeinrichtungen	Melder
 Wechsler eines elektrothermisch verzögerten Überstromauslösers (Motorschutzrelais)	 Leuchtmelder allgemeine Kontrolllampe insbesondere Glühlampe
 Schmelzsicherung allgemein	 Hupe
 Sicherungsautomat mit Überstrom- und Kurzschluß-Auslösung	
 Motorschutzschalter	
 Schütz mit Motorschutzrelais	
Handantrieb	Kraftantrieb
 allgemein	 allgemein
 drücken	 durch Temperatur
 ziehen	 durch Druck
 drehen	 durch Menge
 kippen	 Schaltschloß mit mechanischer Freigabe
 andere Antriebe, z.B. Fußantrieb	 Kennzeichnung der Stellungen eines Handantriebes, Stellungen 2 und 3 sind Raststellungen
 abnehmbarer Antrieb, z.B. Steckschloß	 Raste
 Fühler zur mechanischen Betätigung (z.B. Grenztaster)	 Bewegung in einer Richtung sperrend
 mit Nocken	

(C) Prof. Dipl.-Ing. Peter F. Orlowski

(C) Prof. Dipl.-Ing. Peter F. Orlowski



(C) Prof. Dipl.-Ing. Peter F. Orlowski

Elektromagnetische Antriebe  Elektromechanischer Antrieb, z.B. mit Angabe einer wirksamen Wicklung  Elektromechanischer Antrieb mit Angabe der elektrischen Einflußgröße, z.B. Überschreiten einer bestimmten Stromstärke  Zeitrelais mit Anzugverzögerung  Öffner öffnet verzögert  Schließer schließt verzögert		 Kipprelais  Blinkrelais  Zeitrelais mit Abfallverzögerung  Öffner öffnet sofort und schließt verzögert  Schließer schließt sofort und öffnet verzögert	
 Elektromagnetisch betätigtes Ventil, Magnetventil geöffnet	 Elektromagnetisch betätigte Kupplung, gekuppelt	 Elektromagnetisch betätigte Bremsen	 Elektromagnetisch losbare Bremsen, Bremslüfter
Verschiedene Schaltzeichen  Widerstand allgemein  Veränderbarer Widerstand (Potentiometer)  Spannungsabhängiger Widerstand (Widerstandsänderung gegensinnig der Spannungsänderung)  Temperaturabhängiger Widerstand (Widerstandsänderung gleichsinnig mit der Temperaturänderung) PTC  Kondensator, Kapazität allgemein  Kondensator gepolt, z.B. Elektrolytkondensator		 Wicklung, Induktivität allgemein (Drossel)  Transformator mit 2 getrennten Wicklungen  Stromwandler allgemein  Gleichrichter, elektrisches Ventil allgemein  Thyristor  Begrenzer- oder Zener-Diode	

1.6 Stromrichterschaltungen

Schaltung	Kurzzeichen	Gleichsp.		Ventilsp. $\frac{\hat{u}_A}{u_s}$	Ventilströmen		Stromfließwinkel α in °el.	Transformator-Bauartleistung $S_{Tr}/U_{dio} \cdot I_d$	Steuerkennlinie
		$\frac{U_{dio}}{U_{Tr}}$	$\frac{I_{eff}}{I_d}$		$\frac{\hat{I}_A}{I_d}$	$\frac{I_{eff}}{I_d}$			
	B2	1,8	0,9	2,828	$\sqrt{2}$	0,5	180	1,111	$U_{dik} = U_{dio} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$
	B6	2,34	1,35	2,449	$\sqrt{2}$	0,333	120	1,05	$U_{dik} = U_{dio} \cdot \cos \alpha$ nicht lückend lückend, wie B2
	ZSD	0,9	0,45	2,828	$\sqrt{2}$	0,5	180	1,34	$U_{dik} = U_{dio} \cdot \cos \alpha$ nicht lückend lückend, wie B2
	M3	1,17	0,675	2,449	$\sqrt{2}$	0,333	120	1,345 Dy 1,460 Dz, Yz	$U_{dik} = U_{dio} \cdot \cos \alpha$ nicht lückend lückend, wie B2
	M6	mit 1,17 ohne 1,35	0,675 2,449	2,828	1,225	0,167	120 60	1,26 1,55	$U_{dik} = U_{dio} \cdot \cos \alpha$ nicht lückend lückend, wie B2

(C) Prof. Dipl.-Ing. Peter F. Orlowski

2. GS-Maschinen

2.1 Anwendungsgebiete

Die Fertigungspalette der GS-Antriebe reicht von den Kleinstmotoren für die Feinwerktechnik (Mikroskopie, Meßtische usw.) bis hin zu Großantrieben der Rohstoff- und Verarbeitungsindustrie (Förderantriebe, Nahverkehrsmittel, Walzwerke usw.).

Bei den Großantrieben von 50kW bis > 1MW steht der GS-Motor heute in Konkurrenz mit dem Drehstrommotor. Er ist aber nach wie vor dort notwendig, wo es auf Drehzahlstabilität ankommt und bei Batteriebetrieb.

Kleine GS-Motoren in ihren verschiedenen Bauformen haben einen festen Marktanteil, besonders bei netzunabhängigen Antriebskonzepten (Kameraantriebe, Solarmobil, Batteriefahrzeuge usw.).

2.2 Aufbau und Wirkungsweise eines GS-Motors

Der mechanische Aufbau einer GS-Maschine besteht aus dem Ständer und dem darin drehenden Anker oder Läufer.

Äußeres Haupt-Unterscheidungsmerkmal gegenüber anderen Motoren ist der am Läuferende angebrachte Kommutator bzw. Kollektor.

Wie schon in Abschnitt 1.1.5 erklärt, benötigt der GS-Motor ein konstantes, homogenes Magnetfeld im Ständer und stromdurchflossene Leiterschleifen im Läufer.

Ständer:

Es wird ein magnetischer Kreis über den sog. Jochring gebildet. Daran sind die Haupt- und Wendepole der Maschine angebracht, auf denen sich die Wicklungen befinden. Zur Vermeidung von Wirbelströmen sind die Polschuhe aus geschichtetem Dynamobelch aufgebaut und gegeneinander isoliert.

Anker (Läufer):

Der aus geschichtetem Dynamoblech aufgebaute Ankerkörper enthält Nuten, in denen sich die Ankerwicklung befindet. Wegen der enormen Fliehkräfte ist diese in den Nuten mit Keilen befestigt.

Die Enden und Anfänge der Leiterschleifen (Teilspulen) werden über den Ankerkörper hin zum Kommutator geführt und dort an Hartkupfersegmente angelötet. Die Teilspulen werden so angeordnet, dass jeweils der Anfang einer Teilspule mit dem Ende der nächsten Teilspule an einem Hartkupfersegment verlötet sind. Alle Teilspulen sind also in Reihe geschaltet (Bild 2.1).

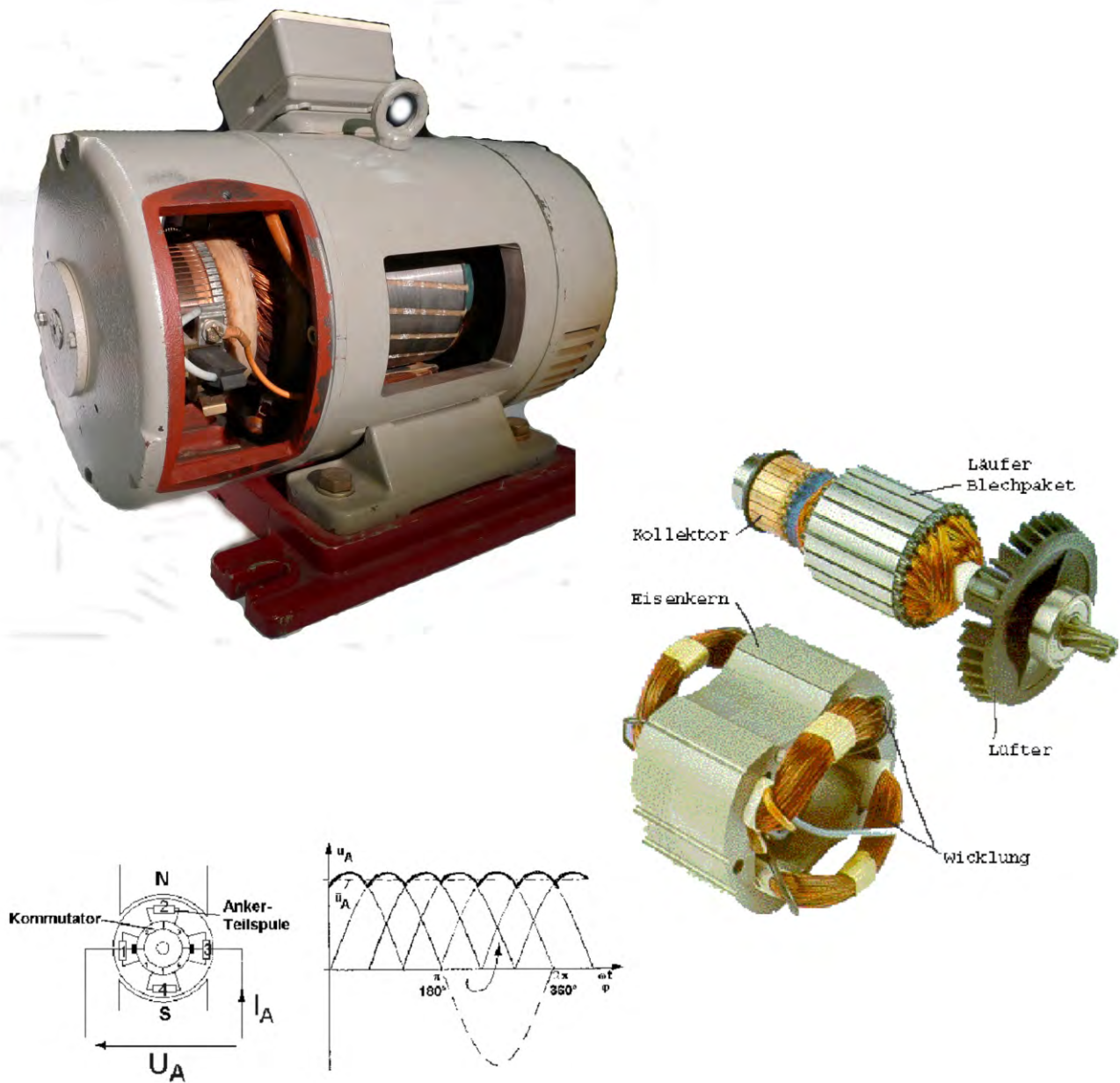


Bild 2.1 Blick auf zwei GS-Motoren

Kommutator:

Die Aufgabe des Kommutators bzw. Kollektors ist es, für jede Leiterschleife (Teilspule) der Ankerwicklung den über die Kohlebürsten zugeführten Strom nach 180° umzuschalten, damit die Drehbewegung erhalten bleibt (siehe Abschnitt 1.1.5).

Wenn der Läufer jedoch im Magnetfeld des Ständers gedreht wird, kann infolge des Induktionsgesetzes am Klemmbrett des Motors die pulsierende Gleichspannung U_A abgegriffen werden. In diesem Falle arbeitet die GS-Maschine generatorisch.

Wendepole:

Die Umschaltung des Stromes in der jeweiligen Teilspule hat eine Induktionsspannung U_{sw} (Stromwendespannung) an den Kohlebürsten zur Folge, die auf der Induktivität der Teilspule beruht.

$$U_{sw} = L_{TSp} \, dI_{TSp} / dt$$

Diese Spannung versucht die Stromrichtung beizubehalten, während die Stromrichtung zwangsweise durch die Drehung des Läufers umgeschaltet wird. Die dabei auftretende Energie wird durch Lichtbögen in Wärme umgesetzt. Diesem Bürstenfeuer wirkt man durch eine **vom Ankerstrom durchflossene Wicklung entgegen**. Sie ist in Höhe der Kohlebürsten angebracht und schwächt dort das Hauptfeld - wirkt also der Induktionsspannung entgegen.

Kompensationswicklungen:

Die von einem Gleichstrom durchflossene Ankerwicklung erzeugt ebenfalls ein magnetisches Feld, welches sich mit dem Hauptfeld überlagert, so dass ein resultierendes Feld entsteht. Dieser Vorgang wird als **Ankerrückwirkung** bezeichnet. Der Scheitelpunkt des resultierenden Feldes ist zur Polkante verschoben. Die Polspitze wird magnetisch gesättigt. Infolge der Sättigung tritt eine Schwächung des *magnetischen Flusses* ein. Das hat zur Folge, dass die zwischen den Kommutatorsegmenten herrschenden Segmentspannungen verschieden groß werden. Diese Segmentspannung muß sehr klein gehalten werden. Wird sie zu groß, bilden sich Funken oder ein Lichtbogen aus, der sich zum Rundfeuer erweitern kann. **Die Ankerrückwirkung wird durch die sog. Kompensationswicklung und Kompoundwicklung, die vom Ankerstrom durchflossen sind** beseitigt, die das Ankerfeld unter den Polspitzen aufhebt.

2.3 Fremderregter GS-Motor

Die wichtigen Kennlinien des fremderregten GS-Motors lassen sich aus seinem elektrischen Ersatzschaltbild mit den Kirchhoff'schen Sätzen ermitteln (Bild 2.3).

Die Gleichspannungsquelle U_A speist den Ankerkreis, in dem die Anker- und Wendepolwicklung zu R_A und L_A im Ersatzschaltbild zusammengefaßt sind. Außerdem befindet sich im Ankerkreis die Spannungsquelle U_q , die durch Induktion bei der Drehung des Läufers entsteht.

Das Erregerfeld, welches ein konstantes Magnetfeld erzeugt, wird der Gleichspannung U_E gespeist, die von U_A unabhängig ist..

Anker- und Feldkreis sind also elektrisch voneinander getrennt !

Aus dem Ersatzschaltbild lassen sich so mit $U = 0$ die Anker- und Feldkreisgleichung angeben.

Die **Bürstenspannung**, die am Übergang zu den Kohlebürsten auftritt, liegt bei ca. $U_B = 1V$ und ist daher **vernachlässigbar**.

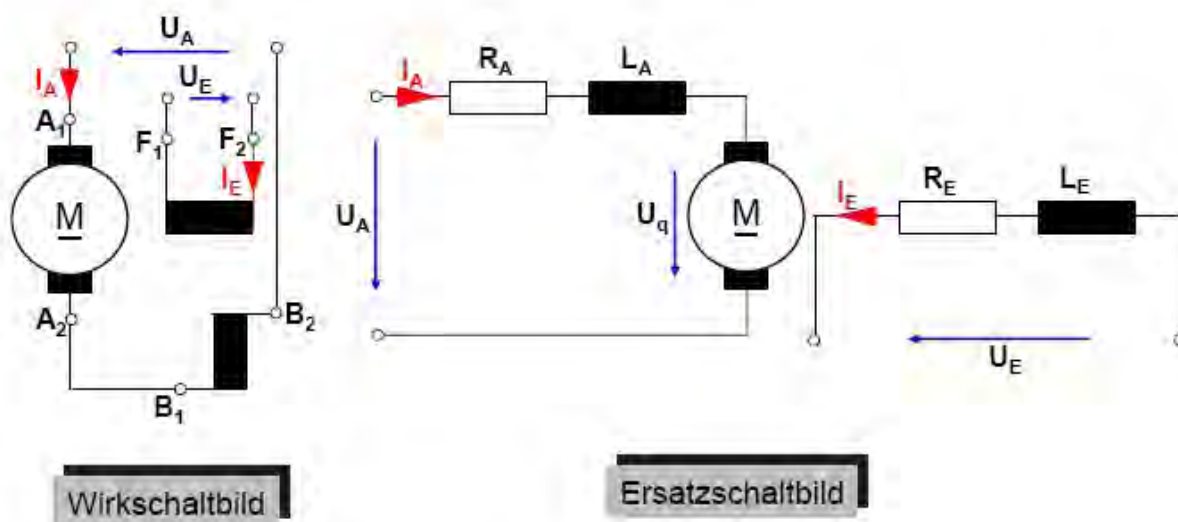
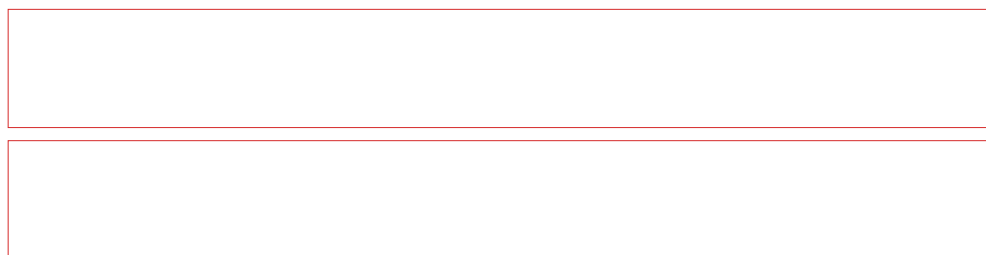


Bild 2.3 Fremderregter GS-Motor

Die zugehörige Anker- und Feldkreis-Zeitkonstante lauten:

Es handelt sich also bei der Anker- und Feldkreisgleichung um lineare, inhomogene Differentialgleichungen erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten. Eine plötzliche Änderung der Systemgrößen U_A , I_A oder \emptyset wird daher einen Einschwingvorgang zur Folge haben.

Stationärer Betrieb:

Der sog stationäre Betrieb liegt dann vor, wenn alle zeitlichen Änderungen der Systemgrößen Null oder gegenüber anderen Größen vernachlässigbar klein sind (z.B. $dI_A/dt = 0$).

Leerlauf:

Ein Motor befindet sich im Leerlauf, wenn er nicht belastet wird. Beim GS-Motor macht sich eine Zunahme der Belastung durch das Ansteigen des Ankerstromes bemerkbar (wegen $M = C_2 \cdot I_A$).

Im Leerlauf nimmt der GS-Motor nur den sehr geringen Leerlaufstrom auf, so dass der Term $I_A R_A$ gegenüber anderen Größen vernachlässigbar ist.

Am Beispiel einer plötzlichen Fluß-Verminderung im Erregerkreis (Ständerwicklung) soll gezeigt werden, wie sich die wichtigen Systemgrößen verhalten.

Zum besseren Verständnis wird angenommen, dass sich der Motor im stationären Betrieb befindet. Dann gilt:

Außerdem sei der Motor unbelastet, so dass sich die Ankerkreisgleichung folgendermaßen vereinfacht:

Da die angelegte Gleichspannung U_A konstant ist, muß auch das Produkt $C_1 \cdot n$ konstant sein. Daher ergibt sich bei einer Flußverminderung eine proportionale Drehzahlerhöhung, so dass $\emptyset \sim 1/n$ (Bild 2.4).

Bild 2.4 Zur Erläuterung der Drehzahlerhöhung bei Flußschwächung

Dass eine Flußschwächung einer Drehzahlerhöhung gleichkommt, ist zunächst nicht einzusehen. Wenn doch \emptyset sinkt, steht weniger Fluß für die Kraftwirkung und damit für das Drehmoment zur Verfügung.

Allerdings besteht das gesamte Motorfeld nicht nur aus dem Erregerfeld, sondern auch aus dem Feld, das die vom Ankerstrom durchflossenen Leiter-schleifen beitragen. Es gilt also $\emptyset_{\text{ges}} = \emptyset_{\text{Err}} + \emptyset_{\text{Ank}}$.

Das heißt, zur Aufrechterhaltung des gleichen Drehmoments muß der Leerlaufstrom (Ankerstrom) nur leicht zunehmen, damit über den dann auch zunehmenden Fluß \emptyset_{Ank} wieder $\emptyset_{\text{ges}} = \text{konst.}$ erreicht wird.

Magnetisierungs-Kennlinie:

Die Magnetisierungs-Kennlinie entsteht aus der Hysterese-Schleife und ist immer dann aufzunehmen, wenn eine Fluß-Steuerung oder -Regelung des Motors erfolgt (Bild 2.5). Wird die angelegte Gleichspannung U_E verlustlos gleich der induzierten Spannung U_q gesetzt, folgt:

Da die Magnetisierungs-Kennlinie bei konstanter Leerlaufdrehzahl aufgenommen wird, ist dann:

Bei allen Betrachtungen an GS-Motoren wird in dieser Vorlesung jeweils nur vom sog. linearen Bereich der Magnetisierungs-Kennlinie ausgegangen.

Bild 2.5 Magnetisierungskennlinie

U_q-n-Kennlinie:

Der Verlauf der induzierten Spannung U_q über der Drehzahl im Leerlauf gibt Aufschluß über das Anfahren eines fremderregten GS-Motors (Bild 2.6). Die Kennlinie läßt sich in die drei Sektoren aufteilen.

Zunächst wird der Fluß auf \varnothing_{\max} gestellt. Dann fährt man den Motor mit der Ankerspannung bis auf die Leerlaufdrehzahl n_0 hoch. Da die Ankerspannung nicht betriebsmäßig über ihren Nennwert U_{AN} hinaus erhöht werden darf, ist ein Drehzahlanstieg über n_0 hinaus nur mit der Feldschwächung möglich. Der Fluß \varnothing wird verringert und bei $\varnothing=\varnothing_{\min}$ ist die Nenndrehzahl n_N erreicht. $\varnothing=0$ ist betriebsmäßig nicht einstellbar, da der Motor sonst durchgeht. Der Bereich der Überdrehzahl ist nur für Test- und Prüfwzwecke benutzbar.

Bild 2.6 U_q-n-Kennlinie

Belastungs-Kennlinie:

Die Belastungs-Kennlinie wird jeweils im stationären Betrieb aufgenommen. Es wird dabei der Graph $n=f(I_A)$ bzw. $n=f(M)$ aufgetragen. Dafür erhält man aus der Ankerkreisgleichung, umgestellt nach n , folgenden Zusammenhang:



Aus dieser Gleichung läßt sich eine Schar von Belastungs-Kennlinien zeichnen, bei denen jeweils U_A und \emptyset Parameter sind (Bild 2.7).

Der qualitative Verlauf eines Graphen ist leicht nachvollziehbar. Denn für $U_A = \text{konst.}$ und $\emptyset = \text{konst.}$ wird vom ersten konstanten Term der Gleichung ein linear mit der Belastung wachsender Strom I_A subtrahiert.

Nimmt man eine solche Kennlinie meßtechnisch auf, zeigt der Motor ein sehr "starres" Drehzahlverhalten. Er gibt also bei Belastung in der Drehzahl kaum nach. Die Kennlinien verlaufen nahezu parallel zueinander und sind durch alle vier Quadranten kontinuierlich verschiebbar. Unterhalb n_0 spricht man von Anker-Steuerung oberhalb (bis n_N) von Feld- bzw. Fluß-Steuerung.

Ein Balkendiagramm soll noch einmal den Zusammenhang der einzelnen Spannungen bei Leerlauf und Belastung verdeutlichen (für stationären Betrieb).

$$U_A = U_q + I_A R_A$$

Leerlauf

Belastung

2.4 GS-Nebenschlußmotor

Beim Nebenschlußmotor sind Anker- und Feldkreis parallel geschaltet und werden von einer Spannungsquelle U gespeist. Es ist daher sicher eine große Ähnlichkeit zwischen dem fremderregten und dem Nebenschlußmotor zu erwarten. In Bild 2.8 sind der Wirkschaltplan und das Ersatzschaltbild für Rechtslauf (motorisch) dargestellt.

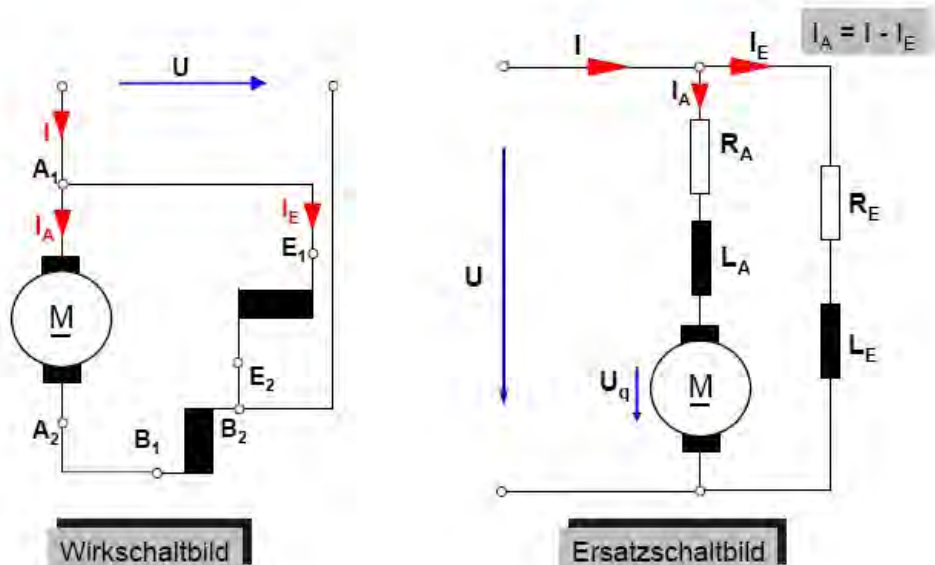


Bild 2.8 GS-Nebenschlußmotor

Aus dem Ersatzschaltbild lassen sich so mit $U = 0$ die Anker- und Feldkreis-Gleichung angeben.

Außerdem gilt: $I_A = I - I_E$ Die zugehörigen Zeitkonstante lauten:

Eine **Uq-n-Kennlinie** für den Nebenschlußmotor kann es nicht geben, da eine Trennung zwischen Anker- und Fluß-Steuerung bei Parallel-Schaltung technisch nicht sinnvoll ist.

Belastungs-Kennlinie:

Die Belastungs-Kennlinie wird wieder im stationären Betrieb aufgenommen. Es wird der Graph $n=f(I)$ aufgetragen. Dafür erhält man aus der Ankerkreisgleichung, umgestellt nach n , folgenden Zusammenhang:

Der qualitative Verlauf der Belastungs-Kennlinie ist leicht nachvollziehbar (Bild 2.9).

Bei konstanter Erregung ($U=U_E=\text{konst.}$) werden $I_E=\text{konst.}$ und $\Phi=\text{konst.}$ Vom ersten, nun konstanten Term der Gleichung, wird mit zunehmender Belastung (steigender Strom I) der zweite Term subtrahiert.

Damit ist die Belastungs-Kennlinie qualitativ gleich der des fremderregten GS-Motors. Durch Messung läßt sich jedoch zeigen, dass die Kennlinie des Nebenschlußmotors etwas stärker geneigt ist. Dieser Motor gibt somit bei Belastung stärker in der Drehzahl nach.

Wegen der Parallel-Schaltung von Anker und Feld ist auch der **Betrieb an Wechselfspannung möglich**. Denn mit jeder Halbwelle der Wechselfspannung wechseln gleichzeitig der Ankerstrom I_A und der Fluß ihre Richtung, so dass die Drehrichtung des Motors erhalten bleibt.

2.5 GS-Reihenschlußmotor und Universalmotor

Beim Reihenschlußmotor sind Anker- und Feldkreis in Reihe geschaltet und liegen an einer Gleichspannungsquelle U . In Bild 2.10 sind der Wirkschaltplan und das Ersatzschaltbild für Rechtslauf (motorisch) dargestellt.

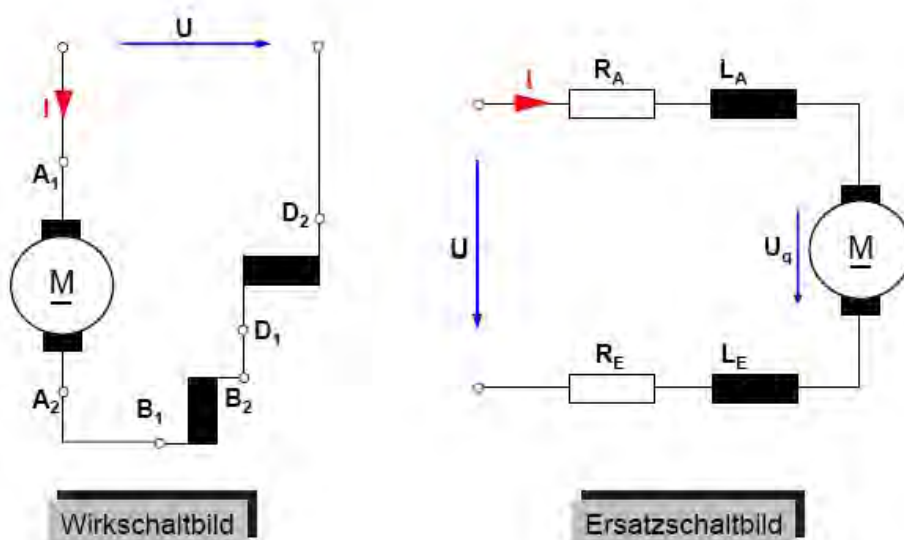


Bild 2.10 GS-Reihenschlußmotor

Aus dem Ersatzschaltbild läßt sich mit $U = 0$ und $I = I_A = I_E$ folgende Differentialgleichung angeben.



Belastungs-Kennlinie:

Die Gleichung der Belastungs-Kennlinie wird wieder für den stationären Betrieb ermittelt. Es gilt:

Wegen der Reihenschaltung von Anker und Feld ändert sich mit dem Strom auch der magnetische Fluß Φ . Entsprechend der Magnetisierungs-Kennlinie verhalten sich Φ und I zueinander proportional ($\Phi = C_H I$), so dass schließlich folgt:



Die Belastungs-Kennlinie ist in Bild 2.11 dargestellt. Sie hat die Form einer Hyperbel, denn es ist hier $n \sim 1/I$ (abzüglich des konstanten zweiten Terms). Es zeigt sich, dass der Motor nicht unbelastet ($I=0$) betrieben werden darf - er geht im Leerlauf durch. Insgesamt zeigt er sehr "weiche" Belastungs-Charakteristik. Er paßt seine Drehzahl somit der jeweiligen Belastung an. Besonders günstig erweist sich dieser Motor bei Anwendungen, wo beim Anfahren ein hohes Moment gefordert ist.

Bild 2.11 Belastungskennlinie des GS-Reihenschlußmotors

Auch der Reihenschlußmotor **kann an Wechselspannung betrieben werden**. Bei Motorleistungen bis 2kW spricht man dann vom **Universalmotor**. Ankerstrom und Fluß wechseln auch hier gleichzeitig, so dass die Drehrichtung unverändert bleibt. Eine veränderte Drehzahlcharakteristik wird durch Anzapfen der Erregerwicklung oder Ändern der Klemmenspannung erreicht.

2.6 Anwendungen, Vergleich der drei Standard-GS-Motoren

Das Anwendungsspektrum der Motoren ist stark an der Belastungs-Charakteristik und Bauweise orientiert.

Fremderregter GS-Motor:

Durch die getrennte Speisung von Anker und Feld ist der Motor sehr drehzahlstabil.

Anwendungen

GS-Nebenschlußmotor:

Mechanisch gleich aufgebaut wie der fremderregter GS-Motor.
Durch die Parallel-Schaltung von Anker und Feld ebenfalls drehzahlstabil.
Betrieb an Wechselspannung möglich.

Anwendungen

GS-Reihenschlußmotor und Universalmotor:

Sehr stark lastabhängige Drehzahl und damit weiches Drehzahlverhalten.
Hohes Anfahrmoment, geht im Leerlauf durch.
Betrieb an Wechselspannung möglich (Universalmotor). Dann mit veränderter Bauweise bis ca. 2kW Motorleistung und für Drehzahlen $>3000\text{min}^{-1}$.

Anwendungen

2.7 Quasi-dynamischer Fahrvorgang eines Förderkorbes

Der Antrieb eines Förderkorbes stellt eine Feder-Masse-System höherer Ordnung dar (Masse der Seiltrommel, des Seiles, des Förderkorbes, des Gegengewichtes und des Motors, Federsteife des Seiles).

Das Anfahren und Bremsen soll am Beispiel eines freierregten GS-Motors gezeigt werden.

Der Motor muß das der Zugkraft proportionale Beharrungsmoment M_L und das Beschleunigungsmoment M_A aufbringen, so dass ohne Reibungsverluste gilt:

Mit

erhält man eine Gleichung für den Ankerstrom, in der der Seiltrommeldurchmesser D praktisch konstant ist.



In Bild 2.12 sind die entsprechenden Kurvenverläufe ohne Einschwingvorgänge qualitativ aufgetragen.

Man erhält infolge der Momentenumkehr beim Bremsen des Förderkorbes einen negativen Ankerstromanteil.

Für eine eventuelle Stromrichter-Auslegung ist der Spitzenwert dieses Stromes eine wichtige Größe.

Bild 2.12 zeigt den Fahrvorgang lediglich für eine Drehrichtung des Motors. Sind jedoch alle Betriebsfälle in die Betrachtung einbezogen, spricht man vom Vier-Quadranten-Betrieb.

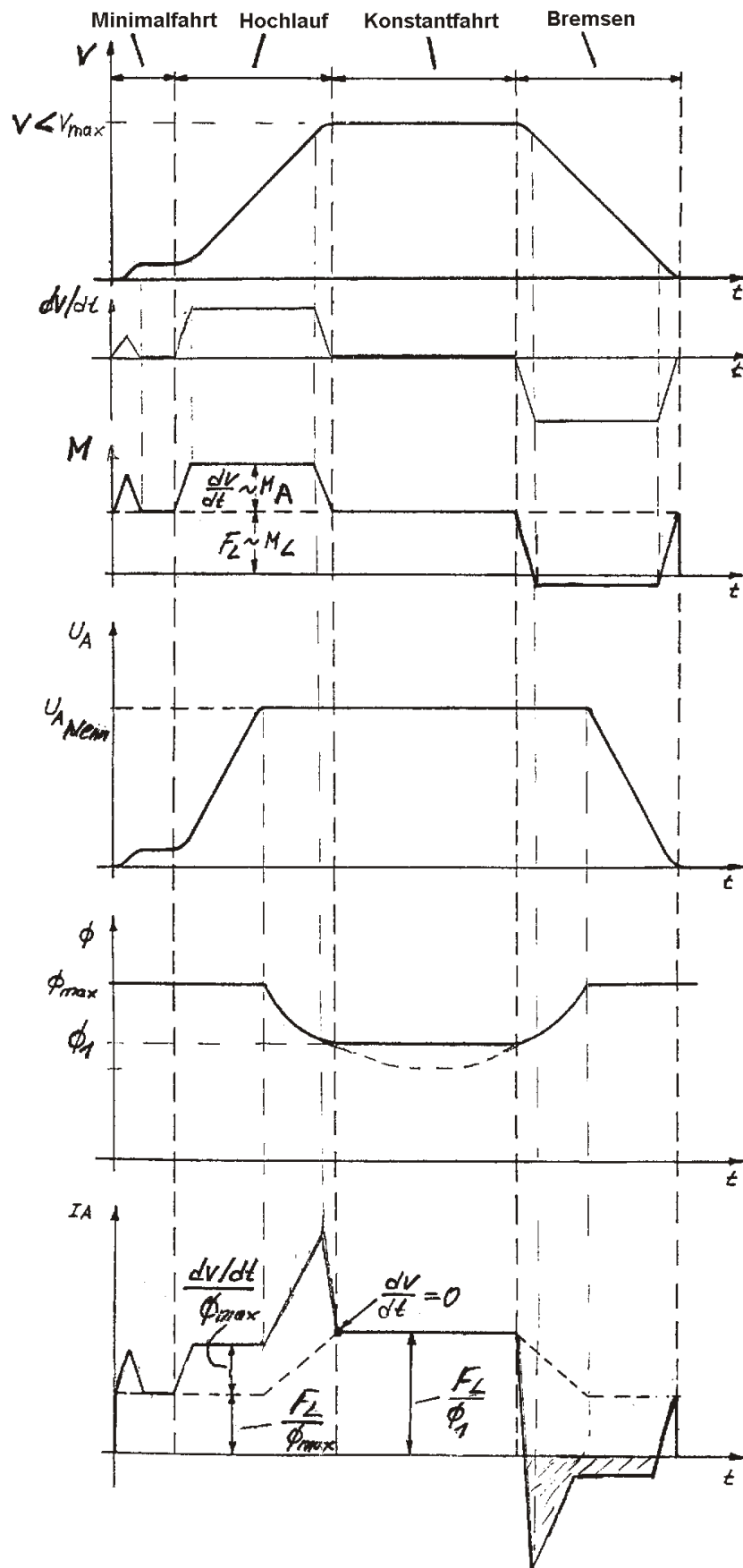


Bild 2.12 Anfahren und Bremsen eines Schachtförderantriebs

2.7.1 Vier-Quadranten-Betrieb

Wegen der Momentenumkehr und der Drehrichtungsumkehr beim Anfahren und Bremsen muß ein Antriebskonzept in allen Betriebszuständen betrachtet werden.

Dies ist in Bild 2.13 am Beispiel des fremderregten GS-Motors dargestellt. Es wird n über M aufgetragen.

Mit der Ankerleistung $P_A = U_{AN} I_{AN}$ läßt sich in jedem Quadranten herausfinden, ob die Maschine motorisch oder generatorisch arbeitet. D.h., ob sie Leistung aus dem Netz aufnimmt oder an's Netz abgibt.

Ist P_A positiv, arbeitet die Maschine motorisch, ist P_A negativ liegt der Generatorbetrieb vor.

2.8 Steuerung von GS-Antrieben

Grundsätzlich sind bei allen Steuer- und Regelschaltungen für elektrische Antriebe die einschlägigen Vorschriften der Elektro-Versorgungs-Unternehmen (EVU's) zu beachten.

Direkteinschalten:

Motoren kleiner Leistung bis ca. 0,5kW, können direkt eingeschaltet und belastet werden.

Anwendungen

Kurzzeitanlassen mit R_V :

Motoren größerer Leistung können im einfachsten Falle über einen Anlaßwiderstand angefahren werden (Bild 2.14). Dieser befindet sich im Ankerkreis des Motors und wird zeitlich begrenzt zugeschaltet. Auf diese Weise läßt sich der Ankerstrom (hier bei einem Nebenschlußmotor) sehr einfach begrenzen.

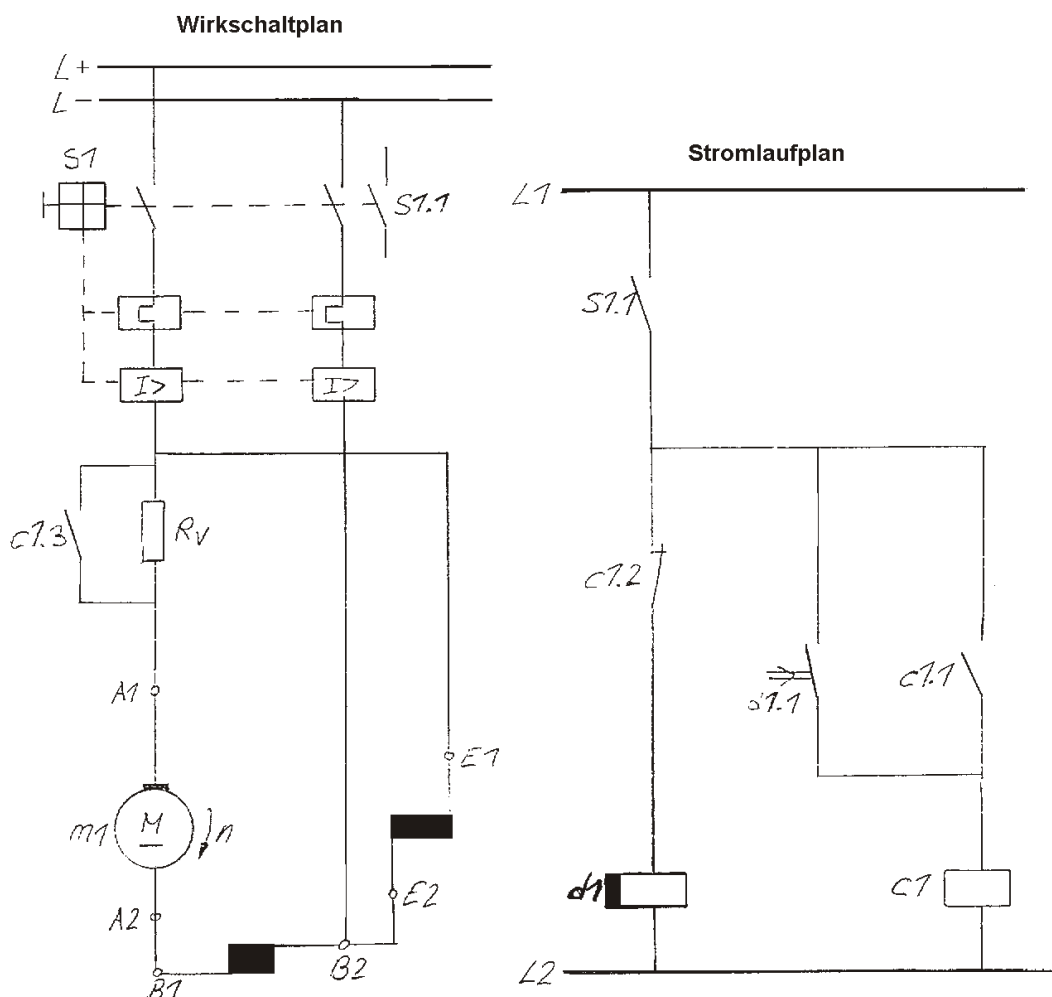


Bild 2.14 Schaltung für das Anfahren mit Anlaßwiderstand

Der Anlaßwiderstand R_V läßt sich aus den Daten des Motors wie folgt ermitteln. Der geringe Spannungsabfall an den Kohlebürsten ist dabei vernachlässigbar ($U_B \approx 2 \text{ V}$). Es sei:

$$U_{AN} = 220 \text{ V}$$

$$I_{AN} = 25 \text{ A}$$

$$I_{Amax} = 1,5 I_{AN}$$

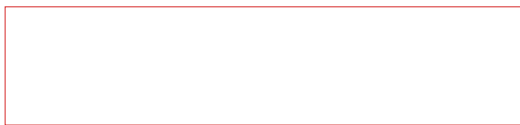
$$R_A = 0,16$$

Mit diesen Werten ergibt sich aus der Ankerkreisgleichung des Nebenschluß-motors zunächst der Strom ohne R_V im Augenblick des Einschaltens, also bei $n=0$ zu:

Diesem Strom wäre der Motor zwar nur kurz ausgesetzt, er ist aber entschieden zu hoch.

Wegen der Reihenschaltung von R_V mit R_A folgt nun für die Dimensionierung des Anlaßwiderstandes:

und schließlich



Auf diese Weise wird I_A auf $I_{Amax} = 37,5 \text{ A}$ begrenzt.

Gegenstrombremsung:

Bei Reihenschluß- und Nebenschlußmotoren kleiner Leistung (oder im Notfall) wird die Gegenstrombremsung durch Umschalten des Motors auf die entgegengesetzte Drehrichtung angewendet.

Dieses Verfahren belastet den Motor sehr stark. Zusätzlich ist ein Drehzahlwächter an der Motorwelle anzubringen, damit bei Drehzahl Null abgeschaltet werden kann und der Motor nicht in der entgegengesetzten Richtung hochläuft.

Widerstandsbremsung:

Die Widerstandsbremsung ist bei fremderregten GS-Motoren als Notfall-Bremsung bzw. bei Netzausfall der Ankerspannung gebräuchlich.

Dann ist der Ankerkreis vom Netz getrennt und wird auf Widerstände geschaltet, das Erregerfeld bleibt erhalten ($\emptyset = \text{konst.}$). Der Antrieb arbeitet generatorisch, da die kinetische Energie des Systems über die Widerstände in Wärme umgesetzt wird.

Durch eine stetige Verkleinerung des Widerstandes R_v kann der Antrieb fast bis auf $n=0$ abgebremst werden, denn es gilt mit $U_A = 0$:

Und mit



R_v verhält sich somit proportional zu n/M und daher fallen die Widerstands-Geraden mit kleiner werdendem R_v stärker ab (Bild 2.15).

Die Grafik zeigt, dass bei Verwendung kleiner werdender Bremswiderstände das mittlere Bremsmoment M_{br}/M_N gegenüber nur einem Bremswiderstand steigt. Denn bei stetiger Verkleinerung der Widerstände kommt die schraffiert gekennzeichnete Fläche noch hinzu. Da

$$M_{br} = 2 J \frac{n}{t}$$

ist, hat ein größeres M_{br} in gleicher Zeit t ein größeres n zur Folge, d.h. der Motor bremst schneller ab.

Bild 2.15 Widerstandsbremung mit verschiedenen R_v

Nutzbremung:

Bei der Nutzbremung wird die Bremsenergie in's Netz zurückgeführt. Diese Art GS-Antriebe abzubremsen ist nur beim fremderregten Motor sinnvoll und erfolgt mit Stromrichtern.

2.9 Stromrichtergespeiste GS-Antriebe

Jeder Maschinenbauer und Feinwerktechniker sollte einmal einen Blick in die gängigen Fachzeitschriften werfen, um sich vom Stand der Antriebstechnik ein Bild zu machen. Da wären z.B. die *antriebstechnik*, die *VDI-Z* sowie die *Hydraulik und Pneumatik*.

Man wird feststellen, dass praktisch kein Hersteller nur Motoren, sondern stets die passende Stromrichtertechnik mit anbietet.

2.9.1 Kennlinie eines Thyristors und GTO's

Mit Hilfe der U-I-Kennlinie eines Standard-Thyristors läßt sich seine Funktionsweise erläutern (Bild 2.16).

Bild 2.16 Kennlinie des Thyristors

Am Beispiel zweier antiparallelgeschalteter Thyristoren an Wechselspannung mit einer ohmschen Last von $R_L = 1 \Omega$ kann die Wirkung von Zündimpulsen an Gate erläutert werden (Bild 2.17).

In der pos. Halbwelle wird die Leistung über den Thyristor T1 gesteuert, in der neg. Halbwelle über T2. Die Leistung entspricht jeweils der schraffierten Fläche aus dem Produkt $U \cdot I$. Da es sich um ohmsche Last handelt, liegen U und I in Phase.

Ersetzt man das Thyristor-Paar durch ein sogenannten TRIAC mit entsprechender Ansteuerlektronik, entspricht die Schaltung dem allgemein bekannten Dimmer.

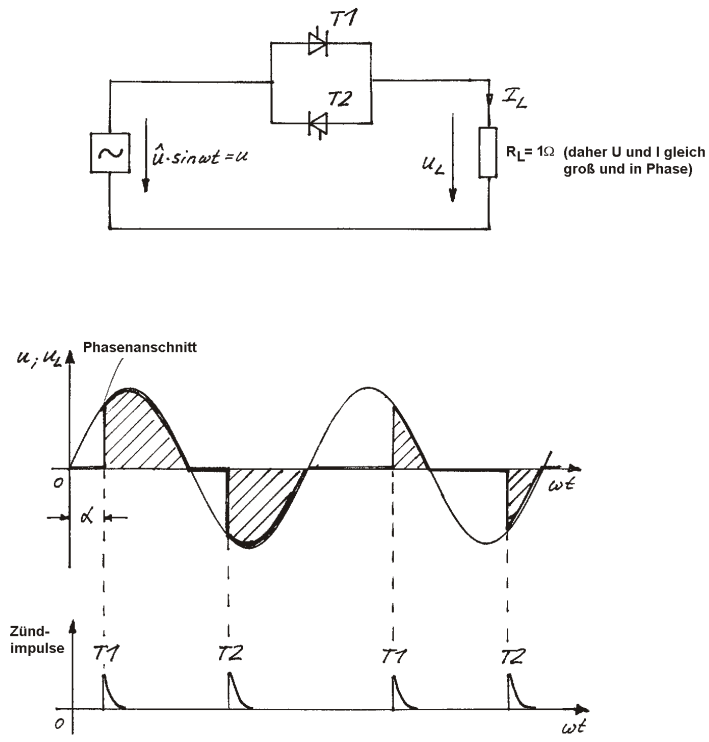


Bild 2.17 Thyristoren an Wechselspannung

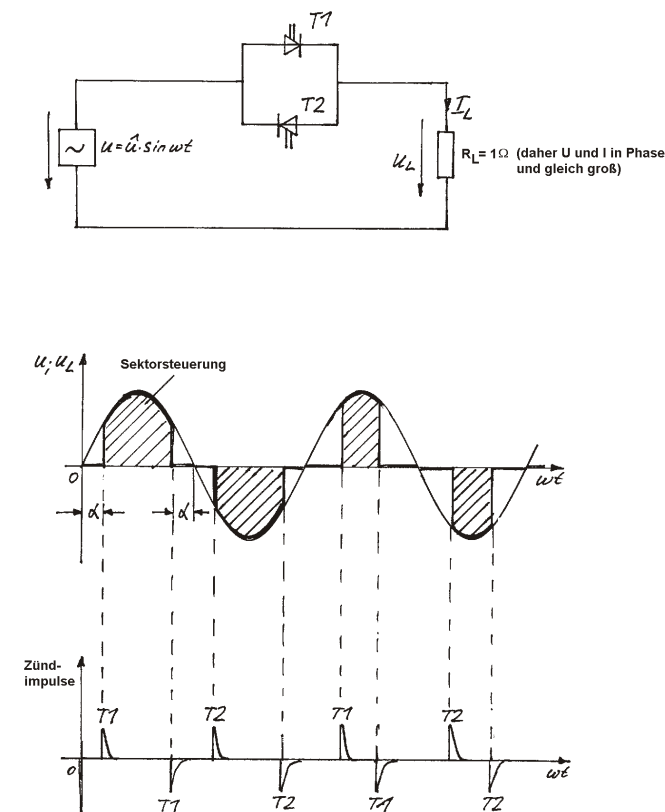


Bild 2.18 GTO's an Wechselspannung

Entscheidender Vorteil beim Einsatz von Thyristoren ist die **quasi verlustlose Leistungssteuerung**. Da die Durchlaßspannung der Thyristoren nur beträgt, ist die Verlustleistung sehr gering gegenüber der gesteuerten Leistung.

Im Gegensatz zu den Standard-Thyristoren sind die GTO's (Gate-Turn-Off-Thyristoren) ein- und ausschaltbare Halbleiterventile. Ihre Funktionsweise wird am Beispiel eines antiparallelgeschalteten GTO-Paares und dem ohmschen Widerstand $R_L = 1$ an Wechselspannung sichtbar (Bild 2.18).

Wird der jeweilige GTO-Thyristor symmetrisch zur Sinus-Halbwellen ein- und ausgeschaltet, spricht man von der Sektorsteuerung. **Hauptvorteil dieses Verfahrens ist der geringere Oberschwingungsgehalt und damit eine kleinere Blindleistung.**

2.9.2 Stromrichter für Mehr-Quadranten-Betrieb

Bei der Speisung von GS-Motoren über Stromrichter ist die vollgesteuerte Drehstrom-Brückenschaltung am weitesten verbreitet. Für den konkreten Einsatz an einem technischen Prozeß sind folgende Kriterien von Bedeutung.

1. Drehrichtungen des Antriebs (Wickelrichtung)
2. Drehmomentrichtungen (Momentenumkehr beim Bremsen)
3. Momentenlose (tritt bei Momentenumkehr auf)
4. Ankerstrommaximalwert (in pos. und neg. Richtung)
5. Anker- oder Feld-Umkehr (Stromrichter im Anker- oder Feldkreis)

Je nach den technologischen Forderungen des zu bearbeitenden Prozesses ist der Stromrichter für den Ein- oder Mehr-Quadranten-Betrieb auszuwählen. Beim Vier-Quadranten-Betrieb kann mit zwei antiparallelgeschalteten, vollgesteuerten DS-Brückenschaltungen auch die Bremsenergie in's Netz zurückgespeist werden.

Durch Messung läßt sich zeigen, dass die Anker-Umkehr mit der DS-Brückenschaltung für schnelle Reversiervorgänge am besten geeignet ist.

Hier müssen die Zeiten für die Stromrichter-Umschaltung nur im Bereich von $<100\text{ms}$ liegen.

In Bild 2.19 sind zwei antiparallelgeschaltete, vollgesteuerte DS-Brückenschaltungen an den Ankerkreis eines fremderregten GS-Motors angeschlossen. Es soll gezeigt werden, wie aus dem Drehstrom-Netz eine steuerbare Gleichspannung für den Motor erzeugt werden kann (Bild 2.20). Dabei wird zunächst auf eine Erklärung für die Ansteuer-Elektronik verzichtet.

Die Darstellung bezieht sich der Einfachheit halber auf ohmsche Last.

Die Ankerspannung ist durch verändern der Zündzeitpunkte der Thyristoren kontinuierlich einstellbar.

Der Zündzeitpunkt wird durch den Steuerwinkel festgelegt und beginnt am Schnittpunkt zweier verketteter Phasenspannungen des DS-Netzes. Dieser Schnittpunkt wird auch natürlicher Kommutierungspunkt genannt.

Die Ankerspannung kann allerdings nur zwischen $10 \dots 150$ verändert werden. Auf diese Weise wird die Kommutierungszeit (Umschaltzeit von einem auf den nächsten Thyristor) und die Freiwerdezeit (Übergang von der neg. Sperr- in die pos. Sperr-Kennlinie) berücksichtigt. Außerdem kann bei Steuerwinkeln kleiner 10° das sog. Leelaufpendeln auftreten.

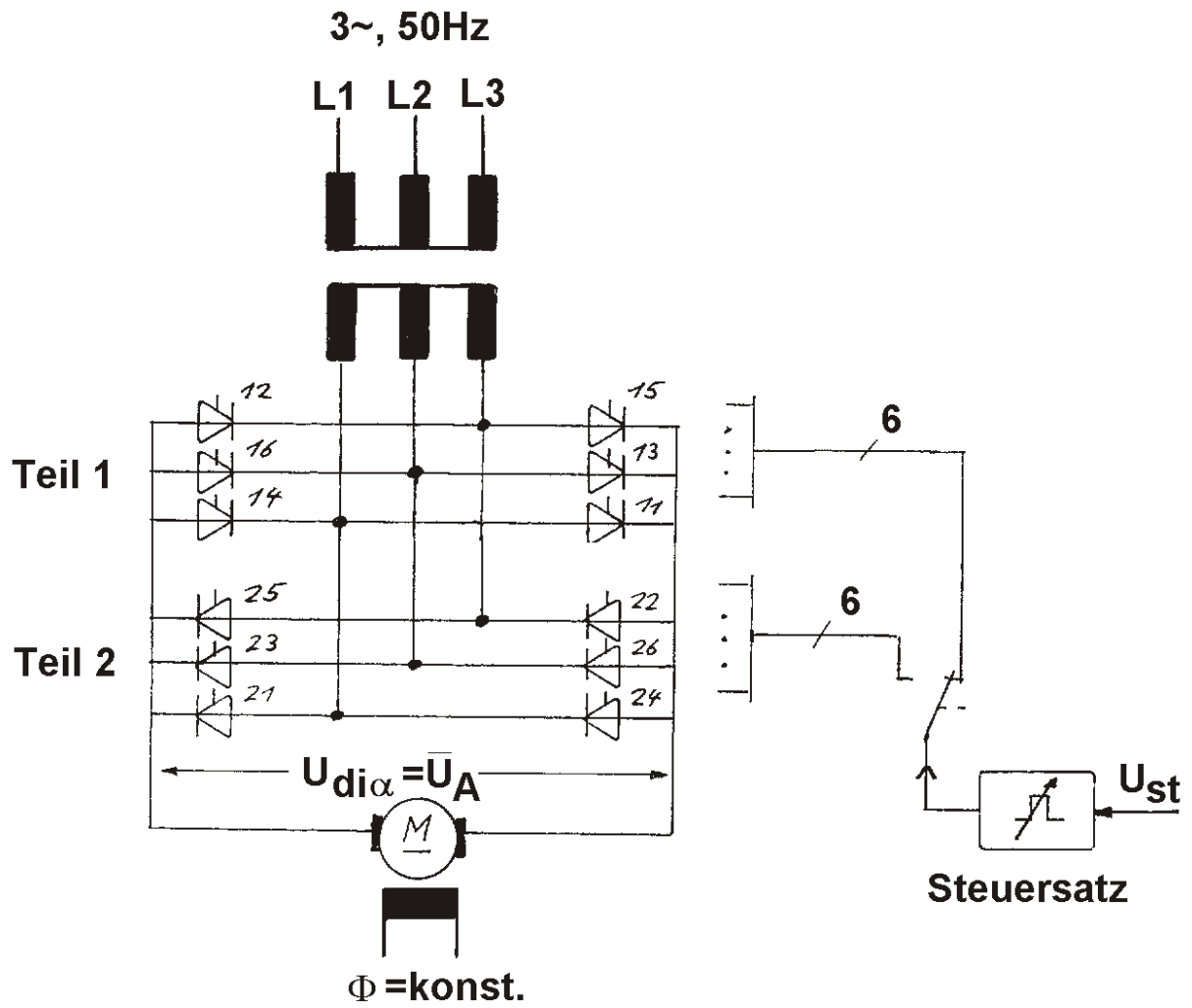


Bild 2.19 vollgesteuerte DS-Brückenschaltung

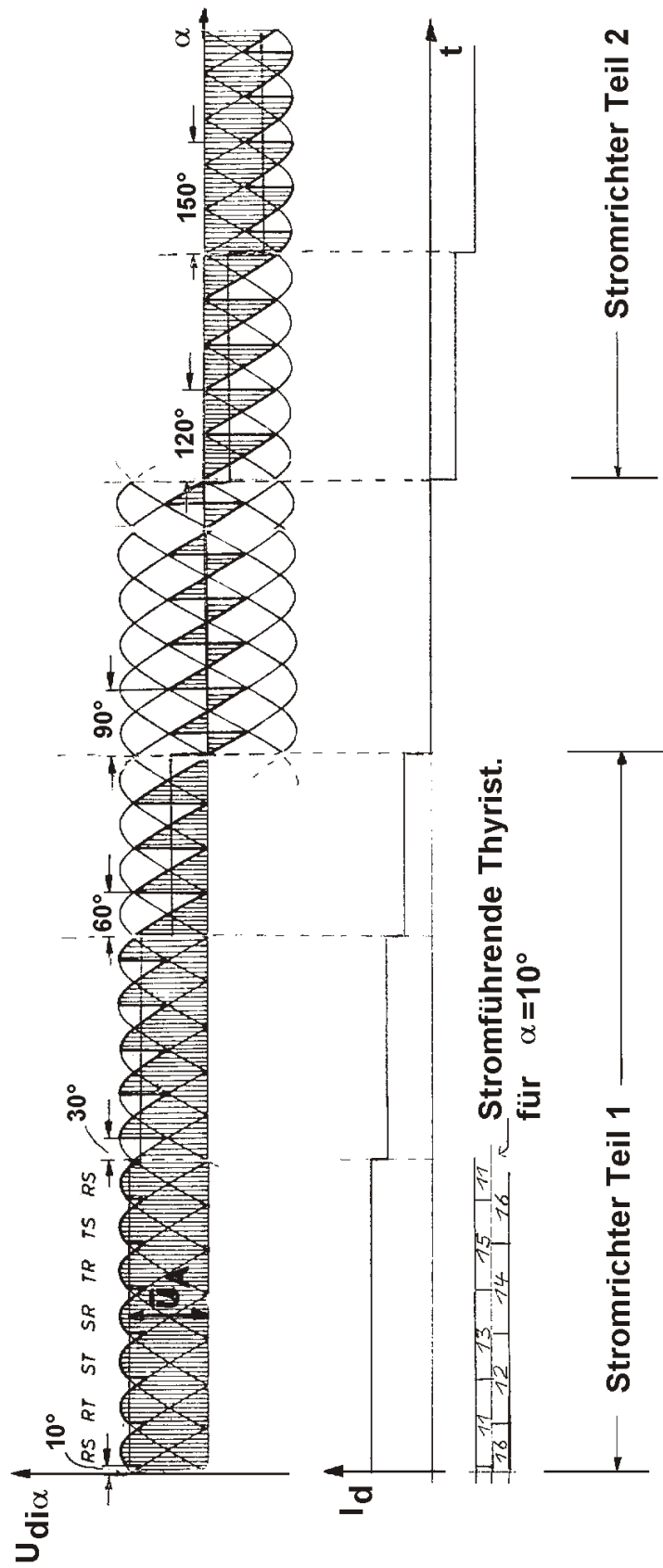


Bild 2.20 Verlauf der gesteuerten Gleichspannung

Im nichtlückenden Betrieb errechnet sich der Mittelwert der Ankerspannung aus der Leiterspannung U_L dann wie folgt (nähere Erklärungen siehe /2/):

$$U_{di} = U_A = 1,35 U_L \cos$$

Je länger man nach dem natürlichen Kommutierungspunkt mit dem Zünden des nächsten Thyristors wartet, desto kleiner wird der Mittelwert der Ankerspannung.

Bei 90° ist schließlich $U_A=0$. Hier wird der Stromrichter Teil 1 ausgeschaltet und gegebenenfalls auf Teil 2 umgeschaltet.

Prinzipielle Herleitung der Zündimpulse:

Der für jeden einzelnen Thyristor notwendige Zündimpuls wird durch den Vergleich einer gemeinsamen Steuer-Gleichspannung (eingestellt z.B. mit einem Poti) mit der jeweiligen verketteten DS-Spannung erzeugt (Bild 2.21).

Immer, wenn die DS-Spannung die Steuer-Gleichspannung abwärts schneidet, wird ein Zündimpuls durch eine Elektronik an den betreffenden Thyristor abgegeben.

Dazu benutzt man sog. Komparatoren (Vergleicher), die aus dem Spannungsvergleich ein Digitalsignal erzeugen, welches einen Zündimpulsgeber freigibt (solche Schaltungen sind u.a. Thema der Vorlesung Angewandte *Elektronik*).

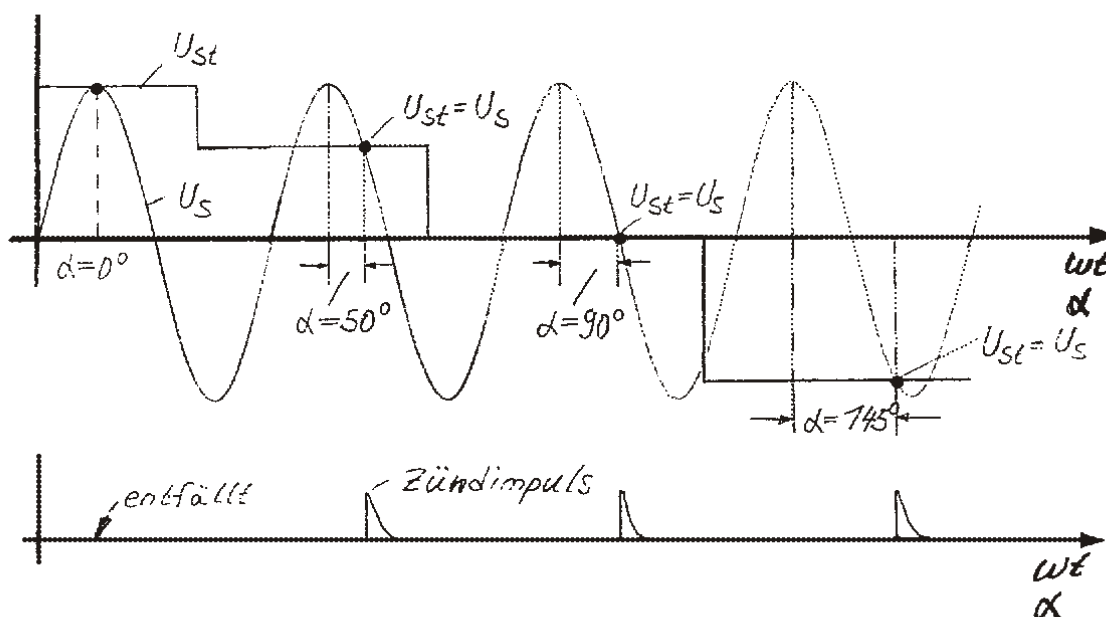


Bild 2.21 zur Herleitung der Zündimpulse

3. DS-Maschinen

3.1 Anwendungsgebiete

DS-Motoren werden größtenteils als Antriebe in der Rohstoff-, Verarbeitungs- und Energieversorgungs-Industrie eingesetzt (Förderantriebe, Wickelantriebe, Verpackungsmaschinen, Nahverkehrsmittel, Elektrizitätswerke usw.). Die Leistungsbandbreite reicht hier von ca. 5kW bis 25MW.

Erst mit dem rasanten Fortschritt der Stromrichtertechnik und Regeltechnik hat sich dem DS-Motor auch das Feld der geregelten Antriebe eröffnet. Die Robustheit des DS-Motors und das Fehlen eines Kommutators führt im Vergleich zu einem GS-Motor (bei gleicher Leistung) zu folgenden Vorteilen:

geringere Masse
kleinere Baulänge
kleinere Anlauf- und Bremszeiten
wartungsärmer
wenig Verschleißteile
kein Bürstenfeuer

Zusammen mit einem passenden Stromrichter sind DS-Motoren heute problemlos als Hauptantriebe für Werkzeugmaschinen, Haspel- und Walzantriebe in Walzwerken einsetzbar.

3.2 Aufbau und Wirkungsweise eines DS-Motors

In dieser Vorlesung wird auf die spezielle Darstellung des Synchronmotors zugunsten der zahlreicheren Anwendungen des Asynchronmotors verzichtet (Ausnahme ist der Servomotor und Sondermotoren in Abschnitt 4).

Ständer:

Der Ständer einer Asynchronmaschine besteht im Inneren des Stahlgußgehäuses aus geschichtetem Dynamoblech mit der Ständerwicklung. Die in Nuten eingebettete Wicklung besteht im einfachsten Falle aus drei getrennten, um 120° räumlich versetzt angeordneten Spulen, die über einen Klemmenkasten zugänglich sind.

Die Spulen können im Stern oder Dreieck geschaltet werden (Bild 3.1). Sie werden aus dem Drehstrom-Netz mit den Phasenspannungen L1, L2 und L3 (früher R, S, T) gespeist.

Mit nur drei Ständerspulen spricht man von einer einpoligen Maschine.

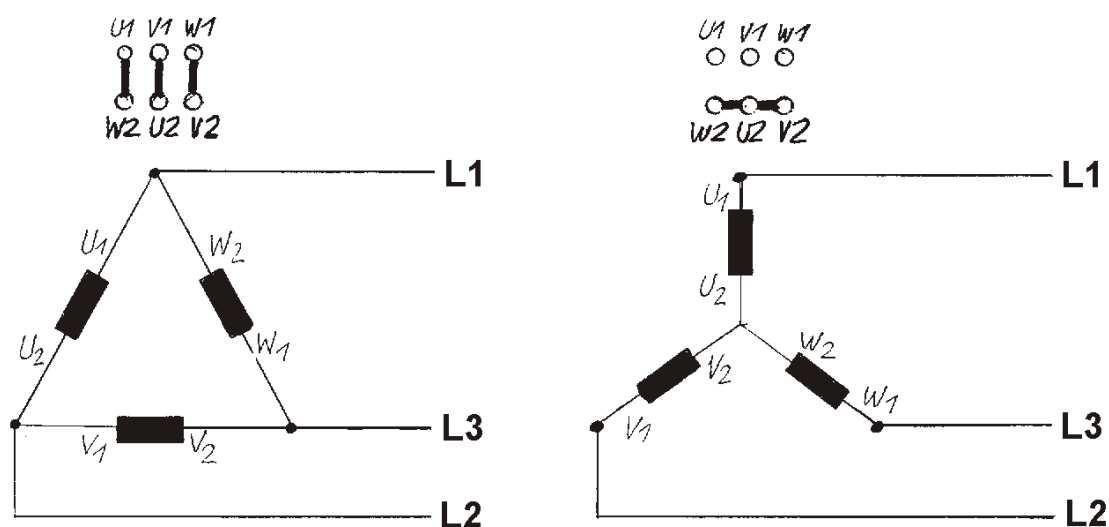


Bild 3.1 Stern-Dreieck-Schaltung am Motorklemmbrett

Schleifringläufer:

Diese Art Läufer besteht aus einer in Nuten eingebetteten Wicklung, deren Anzahl auf die der Ständerwicklung angepaßt ist.

Diese Wicklung ist in der Regel im Stern geschaltet. Nur die Wicklungsenden sind über drei Messingschleifringe vom außen zugänglich.

Diese Bauform erweist sich bei einigen Anlaß- und Steuerverfahren als recht günstig.

Kurzschlußläufer (Käfigläufer):

Bei dieser Läuferbauform sind die Nuten mit Profilkupfer ausgegossen. An den Läuferstirnseiten sind diese Stäbe mit einem Kupferring kurzgeschlossen. Dieser Ring dient, mit entsprechenden Rippen versehen, gleichzeitig der Kühlung (Bild 3.2 und Bild 3.3).

**Läufer mit
geschränkten Stäben**



Staffelläufer



Doppelstaffelläufer

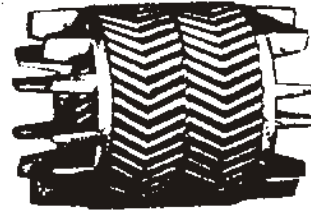
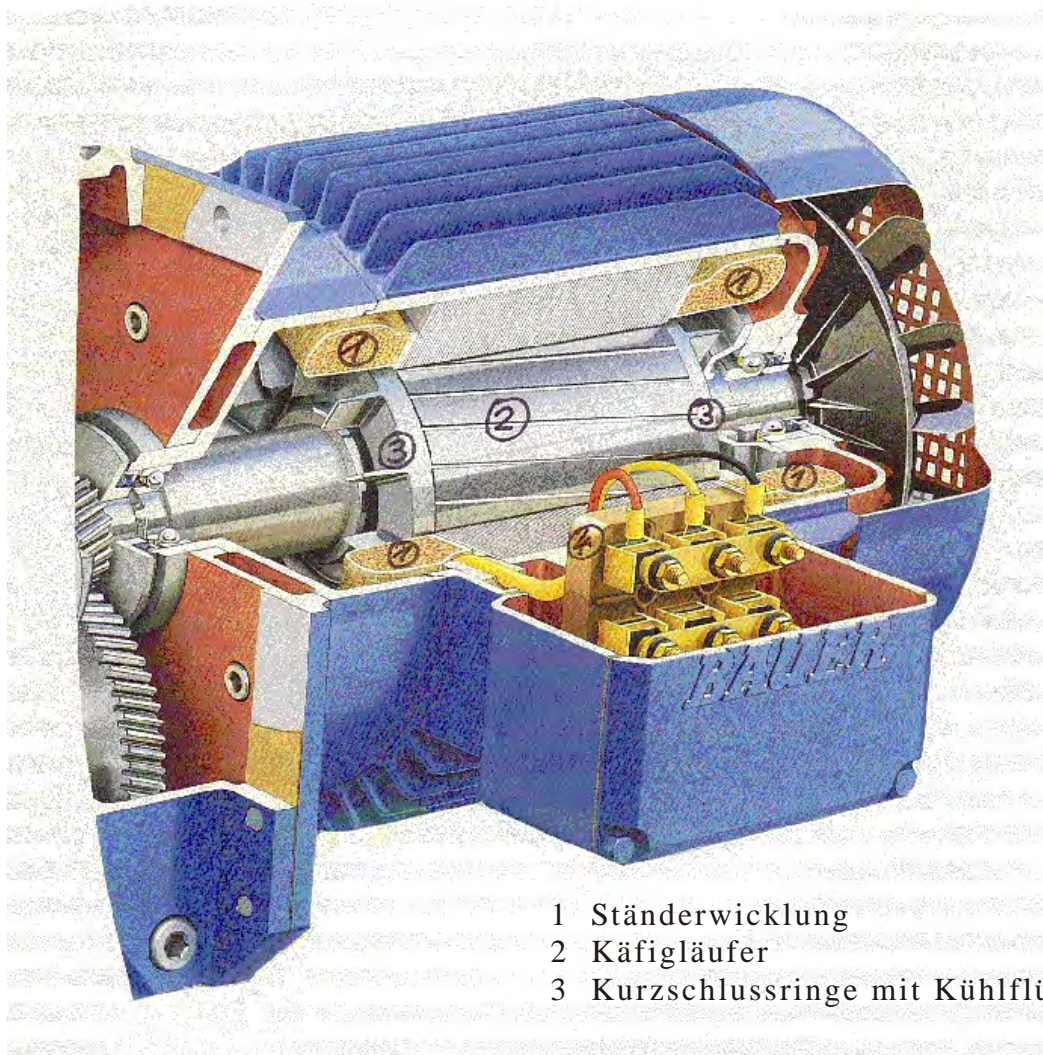


Bild 3.2 Käfigläufer-Bauformen



- 1 Ständerwicklung
- 2 Käfigläufer
- 3 Kurzschlussringe mit Kühlflügeln

Bild 3.3 Asynchronmotor im Schnittbild

Wirkungsweise:

Wie bei allen elektrischen Maschinen, so muß auch der DS-Motor das Induktionsgesetz erfüllen, damit eine Drehbewegung zustande kommt.

Legt man an die um 120° räumlich versetzten Ständerwicklungen die um 120° phasenverschobenen Drehspannungen L1, L2 und L3 an, erhält man ein räumlich und zeitlich veränderliches Magnetfeld.

Dieses Drehfeld läuft mit der Netzfrequenz f_1 um und ist außerdem von der Polzahl p abhängig.

Die sich einstellende Drehzahl des Feldes nennt man synchrone Drehzahl n_1 oder Drehfelddrehzahl.



Eine genauere Darstellung des Drehfeldes findet sich in "Fischer, El. Maschinen, S.166 und 182". Das Drehfeld schneidet die Leiterschleifen des Läufers und induziert in ihnen einen Strom, der die Tangentialkraft F zur Folge hat, die dann den Läufer in Drehung versetzt (Bild 3.4). Oder anders formuliert: Das Drehfeld induziert in den Leiterschleifen des Läufers eine Spannung, die ein magnetisches Feld der Flußdichte B zur Folge hat. Dieses Läuferfeld versucht sich nach dem Ständerfeld auszurichten, d.h. der Flußvektor B des Läuferfeldes eilt dem Ständerfeld nach. Da $I \sim H \sim B$ ist, kann man z.B. der positiven Halbwelle eines Leiterstromes einen Nordpol und der negativen einen Südpol zuordnen und so die Drehung des Flußvektors B zeigen.

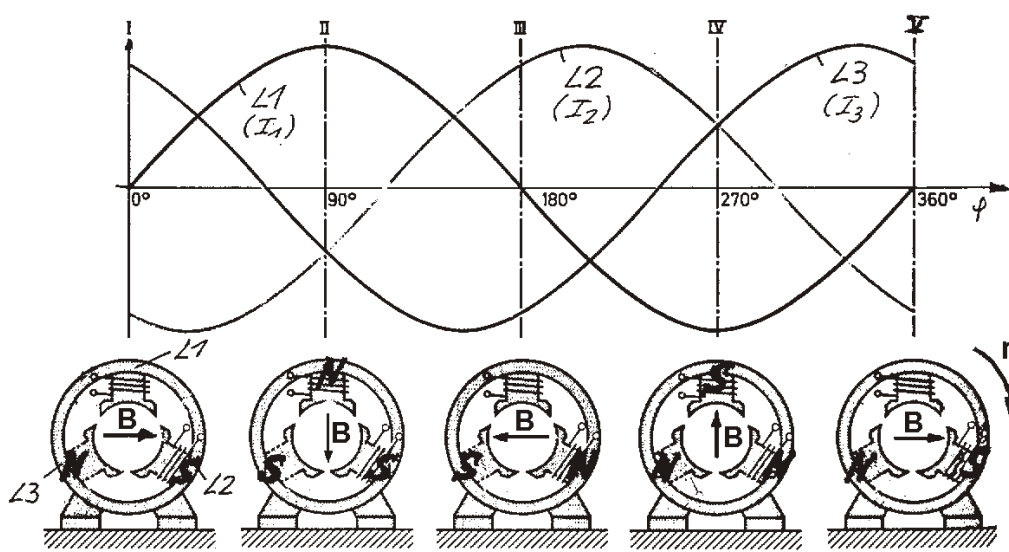
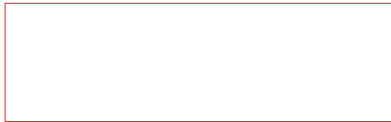


Bild 3.4 zur Entstehung des Drehfeldes

Die Drehzahldifferenz zwischen der synchronen Drehzahl n_1 des Ständerfeldes und der Drehzahl an der Welle des Motors nennt man Schlupf. Es ist:



Aus dem Nennschlupf s_N der Maschine, der ca. 1%...6% beträgt, läßt sich die Nenndrehzahl errechnen.

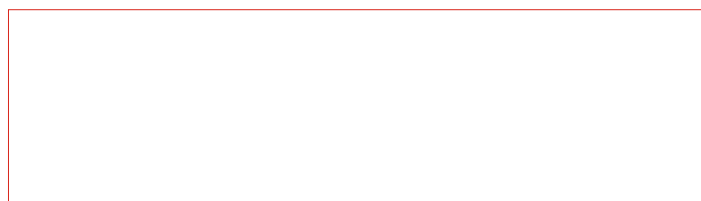


3.3 DS-Asynchronmotor

Der Verlauf von Drehmoment und Strom als Funktion der Drehzahl ist von der Läuferbauform, dem Leistungsbereich, der Polzahl und dem Schlupf der Maschine abhängig.

Momenten- und Strom-Kennlinie:

Da die momentenbildenden Größen einer Berechnung nicht so leicht zugänglich sind, ist es sinnvoll, den Momentenverlauf zu messen (Bild 3.5). Er wird näherungsweise durch die sog. Kloss'sche Gleichung beschrieben.



Es zeigt sich, dass das Anfahrmoment M_A praktisch dem Losbrechmoment infolge Haftreibung entspricht. Bei verkleinerter Netzspannung bleiben die synchrone Drehzahl und das Momenten-Maximum M_K bei der Kippdrehzahl erhalten. Der Graph verläuft unter dem bei Nennspannung.

Der Verlauf des Stromes über der Drehzahl zeigt, dass beim direkten Einschalten des Motors der vier- bis zehnfache Nennstrom fließen kann. Wegen der einschlägigen Vorschriften der Elektro-Versorgungs-Unternehmen beim Anfahren und zum Schutz der Maschine sind daher verschiedene Anfahrverfahren gebräuchlich.

Bild 3.5 Momenten- und Stromverlauf

Belastungs-Kennlinie:

Die Belastungs-Kennlinie des Asynchronmotors zeigt große Ähnlichkeit mit der des fremderr. GS-Motors oder GS-Nebenschlußmotors. Man spricht daher häufig vom Nebenschlußverhalten des Asynchronmotors (Bild 3.6).

3.4 Steuerung von DS-Antrieben

Stellglieder zum Anlassen und Steuern von DS-Motoren sind Schalter, Schütz-schaltungen und Widerstandssteller. Auf die Stromrichter wird im Abschnitt 3.5 gesondert eingegangen.

3.4.1 Anlassen von Motoren mit Schleifringläufer

Durch stufenlose oder stufige Verstellung von Anlaß-Widerständen in jeder Phase der Läuferwicklung ist eine Änderung des Momentenverlaufs und Stromverlaufs möglich (Bild 3.7).

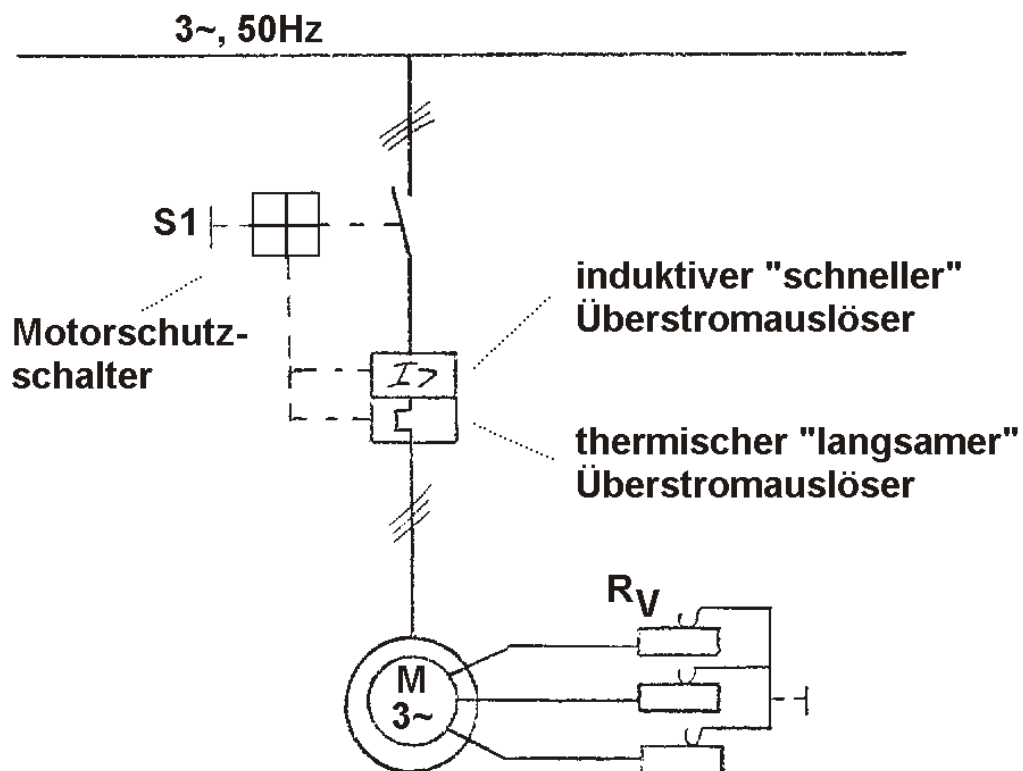


Bild 3.7 Anlaßwiderstände im Läuferkreis

Die Änderung der Stellwiderstände R_V bewirkt eine Schlupfänderung. Der neue Schlupf s^* ist (R_2 Widerstände der Läuferwicklung):

$$s^* = s \left(1 + \frac{R_V}{R_2} \right) \quad \text{und} \quad n^* = n_1 (1 - s^*)$$

Mit steigendem Widerstand R_V erhöht sich der Schlupf und die Momentenkennlinie verschiebt sich.

In Bild 3.8 ist eine in fünf Stufen verlaufende Widerstandsänderung mit verschiedenen R_V aufgezeigt ($R_I=10$, $R_{II}=5$, $R_{III}=2,5$, $R_{IV}=1$, $R_V=0$). Unter Beibehaltung des Kippmoments und des Punktes der synchronen Drehzahl verschiebt sich das Momentenkennlinie nach links. Der Stromverlauf wird dabei gesenkt.

Dieses Verfahren ist einfach aufgebaut und wird zur Anfahr-Strombegrenzung von großen Maschinen bei gleichzeitiger Beibehaltung des hohen Moments beim Anfahren eingesetzt. Nachteilig sind jedoch die hohen Stromwärmeverluste in den Stellwiderständen und die Verschleißteile (Schleifringe, Bürsten).

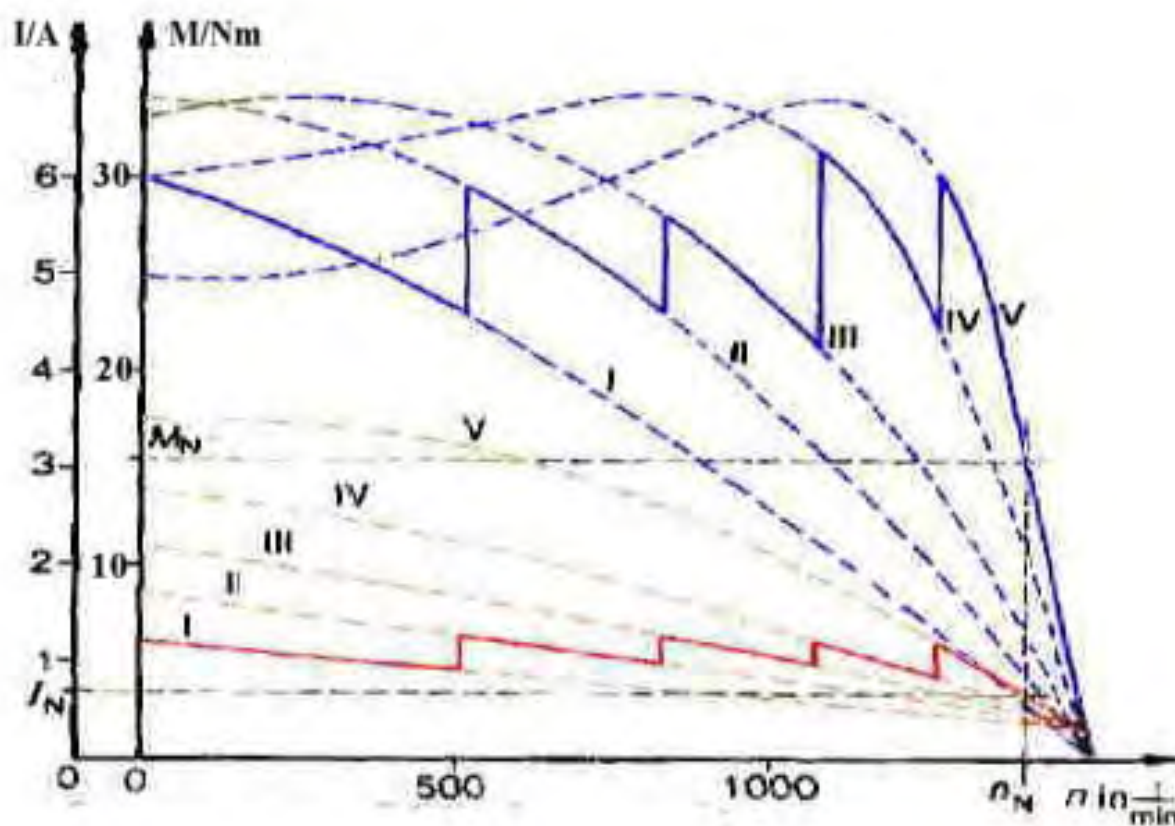


Bild 3.8 Anlaufwiderstände im Läuferkreis, Momenten- und Stromverlauf

3.4.2 Anlassen von Motoren mit Käfigläufer

Direkt-Anlauf:

Das direkte Einschalten von Motoren kleiner Leistung (bis ca. 2kW) ist die einfachste Anlaßmethode und wird in diesem Leistungsbereich häufig angewandt.

Es ist lediglich sicherzustellen, dass der Strom im Augenblick des Einschaltens (ca. 4...10 I_N) vom Netz problemlos verkräftet wird.

Stern-Dreieck-Anlauf:

Bei schwachen DS-Netzen und mit Rücksicht auf die einschlägigen Bestimmungen der EVU's muß der Anlaufstrom eines Asynchronmotors begrenzt werden. Dies kann durch die Stern-Dreieck-Schaltung geschehen. In Bild 3.9 ist die automatische Stern-Dreieck-Schützschaltung mit Wirkschalt- und Stromlaufplan dargestellt.

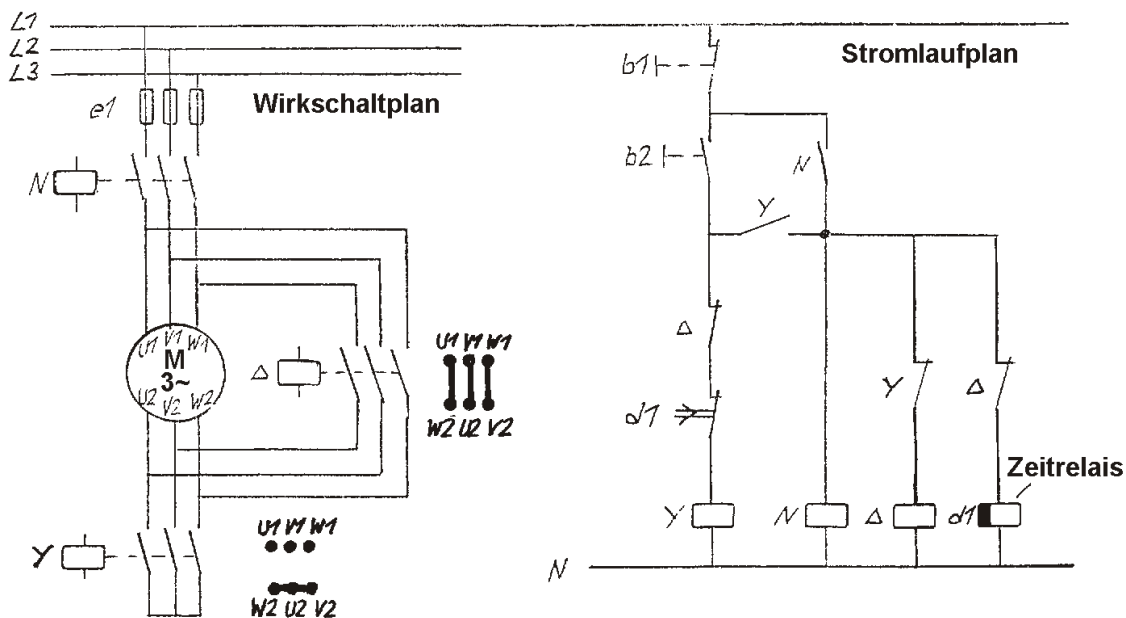


Bild 3.9 Stern-Dreieck-Anlauf

Mit dem Taster b2 wird der Motor zunächst eine begrenzte Zeit (am Zeitrelais d1 eingestellt) in Stern-Schaltung angefahren. Danach geht die Schützschaltung automatisch auf die Dreieck-Schaltung über.

Diese Anfahr-Methode ist einfach im Aufbau und sehr verbreitet. Es ergibt sich folgender Momenten- und Stromverlauf (Bild 3.10).

Bild 3.10 Moment und Strom beim Stern-Dreieckanlauf

Es zeigt sich, dass der Strom beim Anfahren auf $1/3$ begrenzt wird, denn es gilt:

$$I_Y = \frac{1}{3} I \quad \text{sowie} \quad M_Y = \frac{1}{3} M$$

Anwendungen

Dahlander-Schaltung (elektrisches Getriebe):

Die Dahlanderschaltung wird auch als elektrisches Getriebe bezeichnet. Durch stufenweises Umschalten der Polzahl der Ständerwicklung kann die Drehzahl der Maschine gesteuert werden. Dies läßt sich aus

$$n = n_1 (1 - s) = \frac{60 f_1}{p} (1 - s)$$

sofort ersehen. Das Umschalten der Ständerwicklung geschieht mit einer Schütz-Schaltung. In Bild 3.11 ist ein Beispiel für eine dreistufige Drehzahl-Abstufung gezeigt. Dazu in Bild 3.13 die zugehörige Schütz-Schaltung. Da die Belastungs-Charakteristik des Motors dabei nicht verändert wird, sind die Belastungs-Kennlinien jeweils stufig parallelverschoben, wie in Bild 3.12 gezeigt.

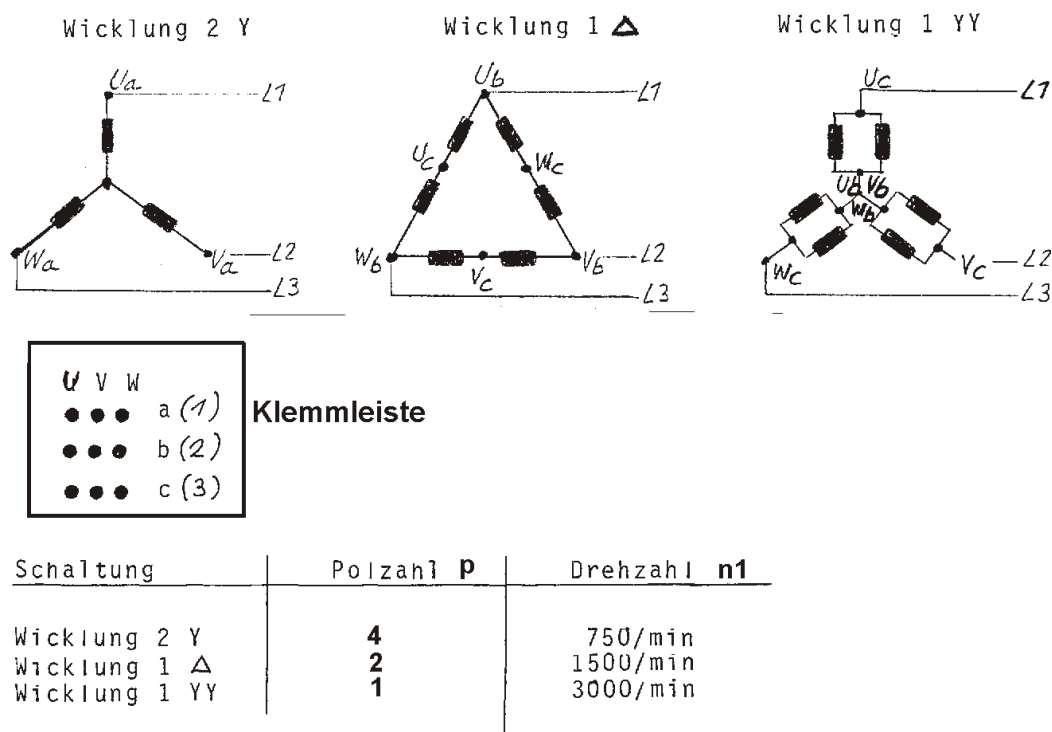
Anwendungen

Bild 3.11 Beispiel einer dreistufigen Polumschaltung

Bild 3.12 Belastungs-Kennlinien

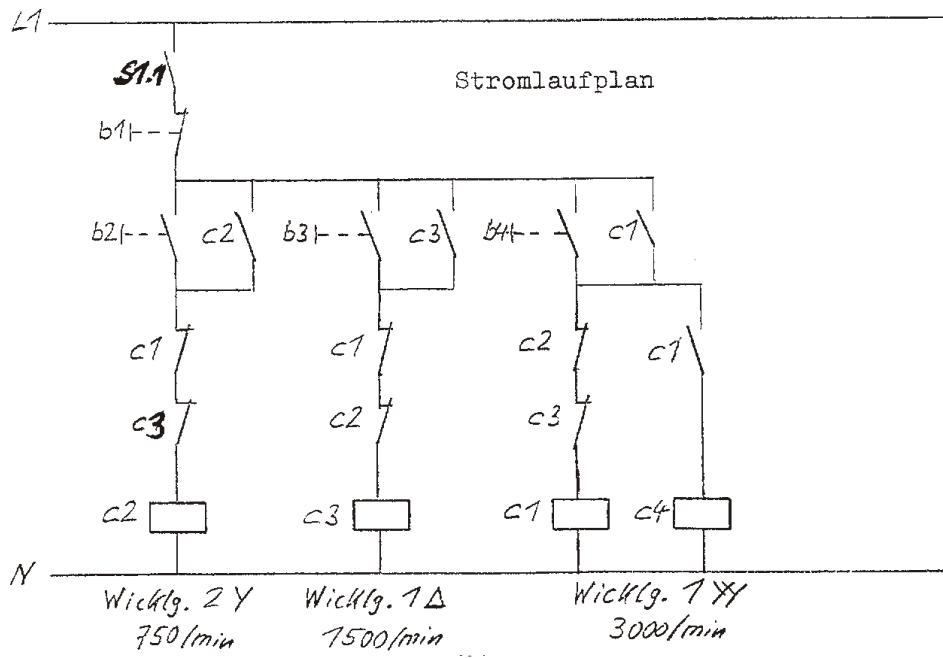
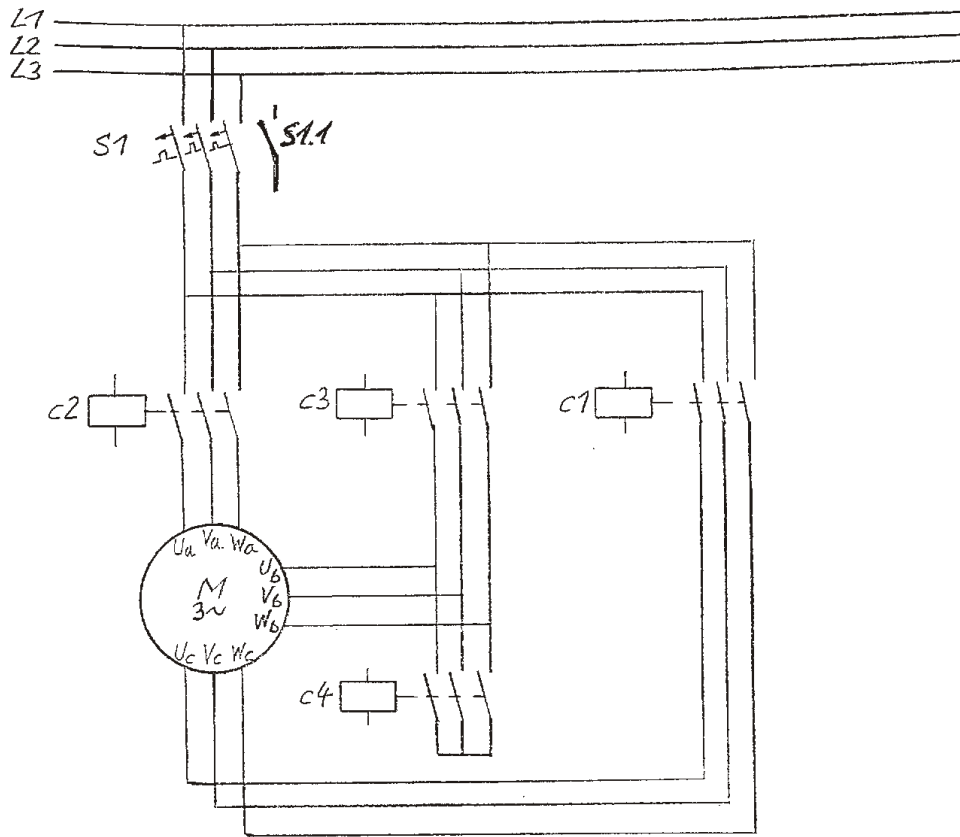


Bild 3.13 Dahlander-Schützschaltung

Betrieb an zwei Phasen:

Jeder serienmäßige DS-Motor kann auch an zwei Phasen bzw. am Wechselstromnetz betrieben werden, wenn man zu einem Wicklungsstrang einen Kondensator parallel schaltet (Bild 3.14).

Der Motor läuft an, weil die dritte, eigentlich um 120° versetzte Phasenspannung nun durch eine um ca. 90° versetzte mit Hilfe des Kondensators ersetzt wird. Die Kapazität des Kondensators für verschiedene Motorleistungen ist ebenfalls aus Bild 3.14 zu entnehmen. Der Motor läuft allerdings nur mit verminderter Nennleistung ($0,7 P_N$).

Anwendungen

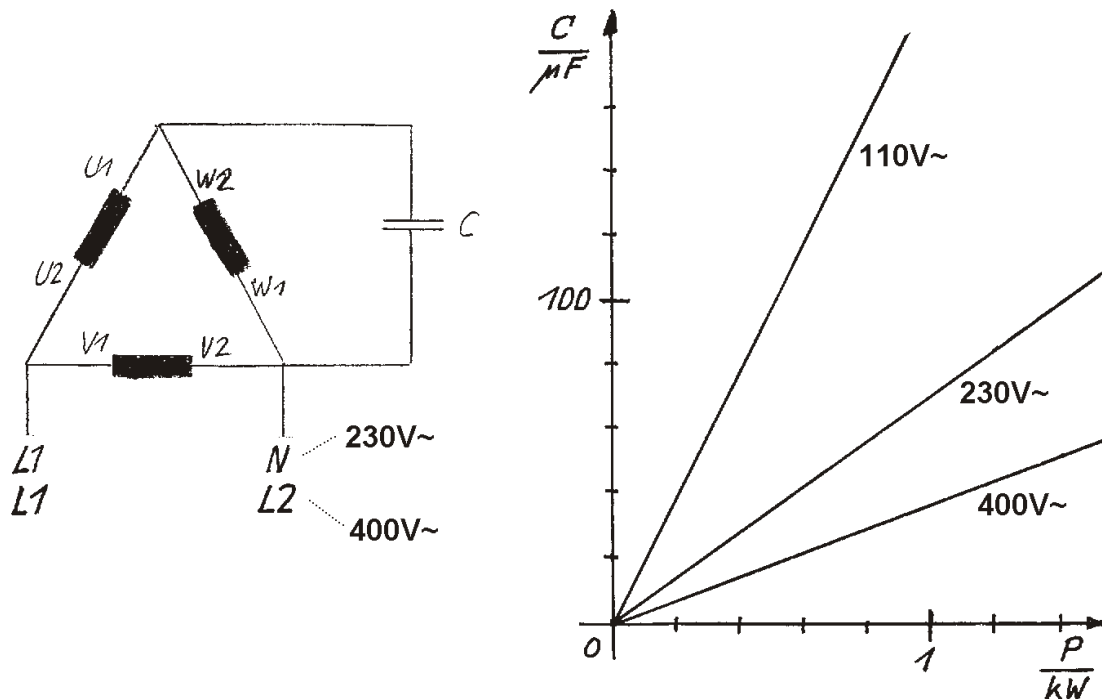


Bild 3.14 Anlauf eines Asynchronmotors mit Hilfsphase

Bremsmotoren:

Bei einem Bremsmotor ist der konische Verschiebeläufer fest mit einer Reibungsbremse verbunden (Bild 3.15). Mit der Ständerwicklung wird auf diese Weise sowohl der Motor in Drehung versetzt als auch das Bremsen ausgelöst. Beim Einschalten werden der Läufer und die Bremscheibe gegen die Bremsfeder gedrückt. Die dazu erforderliche Axialkraft entsteht zusammen mit dem Motordrehmoment durch die elektromagnetische Wirkung der konischen Ständerwicklung. Abschalten des Motors oder Stromausfall führen so zur automatischen und sicheren Bremsung. Im Stillstand ist der Motor daher auch gebremst.

Anwendungen

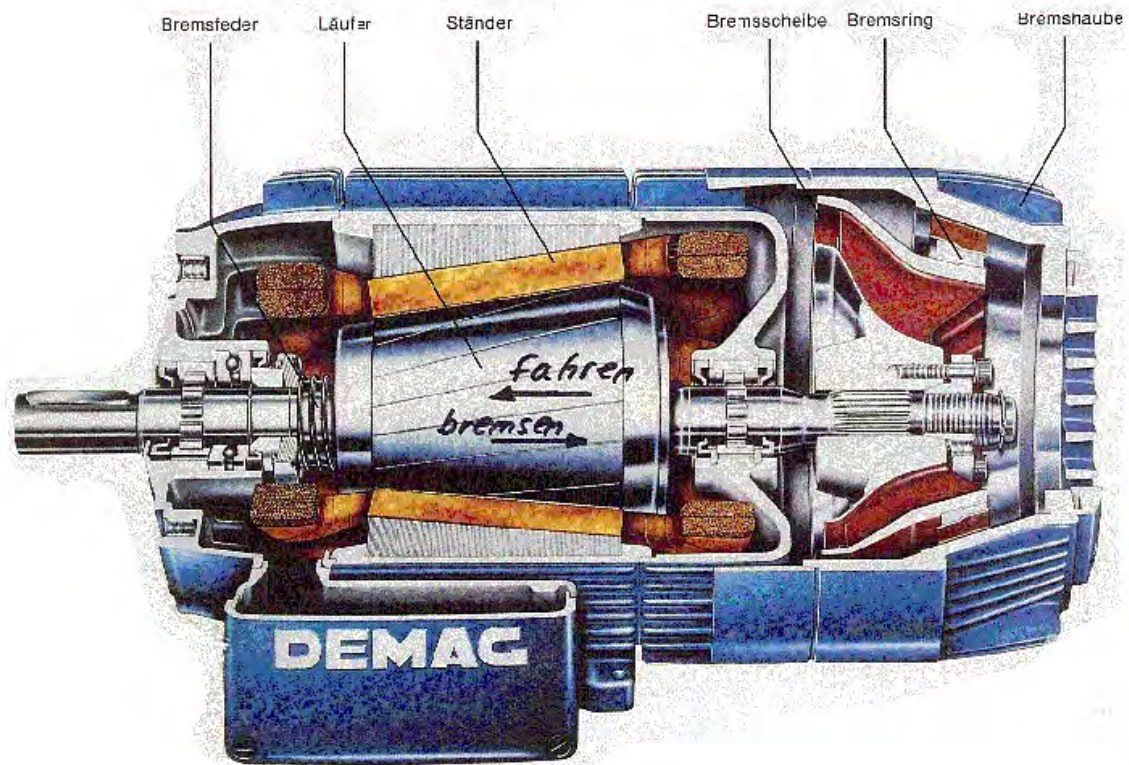


Bild 3.15 Bremsmotor

3.5 Stromrichtergespeiste DS-Motoren

Ein Drehstrommotor wird in Verbindung mit einem Stromrichter zu einem drehzahlvariablen Stromrichter-Antrieb.

Aus der Vielzahl der industriell eingesetzten Stromrichter-Schaltungen sind in diesem Abschnitt die z.Zt. wichtigsten aufgeführt.

Drehstrom-Steller für Käfigläufermotoren:

Beim DS-Steller wird die Ständerspannung des Motors zur Drehzahlsteuerung benutzt.

Dazu befinden sich in jeder Phase der Zuleitung zwei antiparallelgeschaltete Thyristoren bzw. Triacs, die über eine Steuerelektronik von einem Potentiometer aus gezündet werden können (Bild 3.16).

Die Funktionsweise ist praktisch die eines "Dimmers" für drei Phasen.

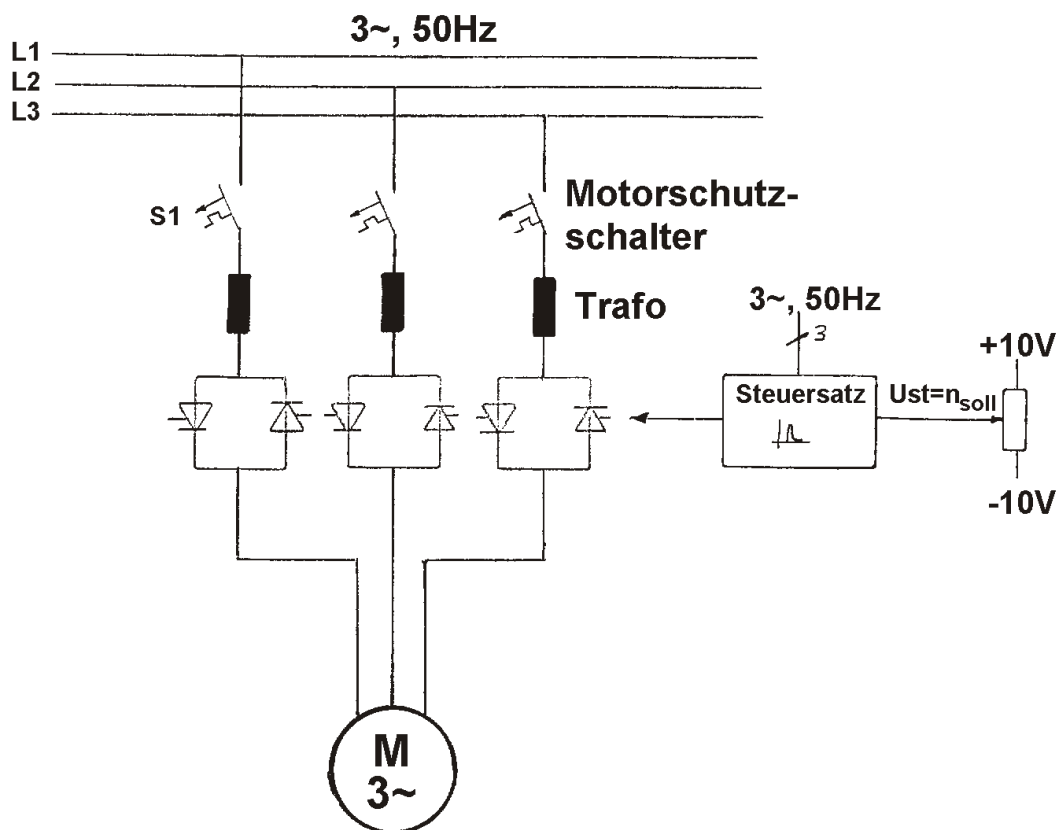


Bild 3.16 Drehstromsteller für Asynchronmotor

Die Wirkung einer veränderten Ständerspannung auf die Drehzahl läßt sich wie folgt erklären: Die induzierte Ständerspannung E_1 und die induzierte Läuferspannung E_2 sind:

$$E_1 = C_{M1} \frac{f_1}{p} \quad \text{und} \quad E_2 = C_{M2} \frac{f_2}{p}$$

Mit dem Zusammenhang $f_2 = s f_1$ (Fischer: Elektr. Maschinen S.178) folgt für E_2 :

$$E_2 = C_{M2} \frac{s f_1}{p}$$

Teilt man beide induzierten Spannungen durcheinander ergibt sich:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{C_{M2}}{C_{M1}} s = \frac{C_{M2}}{C_{M1}} \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Nach n umgestellt ergibt sich schließlich die Drehzahl zu:

$$n = n_1 \left(1 - \frac{C_K}{E_1} \right) = n_1 \left(1 - \frac{C_K}{E_{d1} \cos} \right)$$

Darin sind $E_1 = E_{d1} \cos$ und $C_K = \frac{E_2 C_{M1}}{C_{M2}}$.

Die Belastungskennlinien des Asynchronmotors mit DS-Steller sind in Bild 3.17 dargestellt.

Mit verkleinerter Ständerspannung E_1 nimmt die Neigung der Kennlinie zu, d.h. die Drehzahl gibt bei Belastung stärker nach. Außerdem kann nicht mehr das maximal mögliche Kippmoment übertragen werden.

Ein weiterer Nachteil ist die sehr hohe Läuferverlustleistung P_{V2} , die im Stillstand ihr Maximum erreichen.

$$P_{V2} = P_L \left(1 - \frac{n}{n_1}\right)$$

Dann wird nämlich die gesamte, über den Luftspalt in den Läufer übertragene Leistung P_L in Wärme umgesetzt.

Anwendungen

Direktumrichter für Synchron- und Asynchronmotoren:

Für Motoren großer Leistung wird bei kleiner Drehzahlen häufig der Direktumrichter eingesetzt (Bild 3.18).

Er besteht aus sechs vollgesteuerten DS-Brückenschaltungen, wie sie bereits gezeigt wurden. Bei Synchronmotoren kommt für den Läuferkreis noch eine DS-Brückenschaltung hinzu.

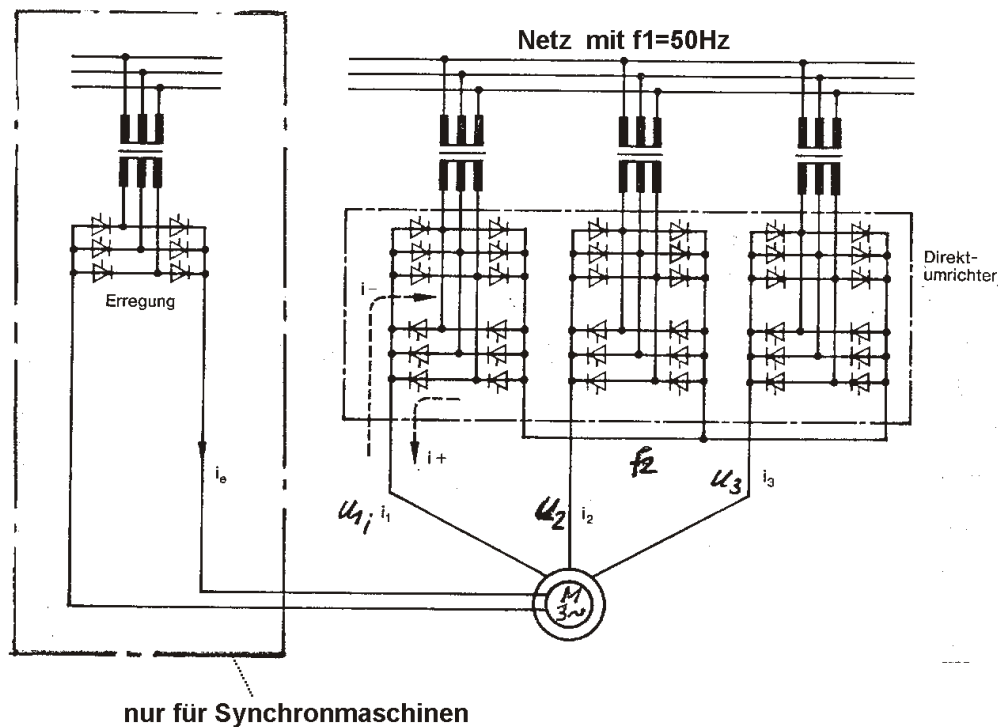


Bild 3.18 Direktumrichter

Mit diesem Stromrichter läßt sich ein neues synthetisches Netz für den Motor aufbauen, dessen Spannung und Frequenz variabel sind. Dazu ist in Bild 3.19 ein Beispiel für $f_2 = f_1/4$ angegeben.

Der Stellbereich der Frequenz ist jedoch eingeschränkt. Es gilt:

$$f_2 = [0 \dots 0,5 f_1]$$

Die Belastungskennlinien bei Frequenz-Steuerung sind parallel verschoben, ohne ihre Nebenschluß-Charakteristik zu verändern (Bild 3.20).

Wegen der bereits bekannten Gleichung

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

verhält sich eine Frequenzänderung proportional der Drehzahländerung.

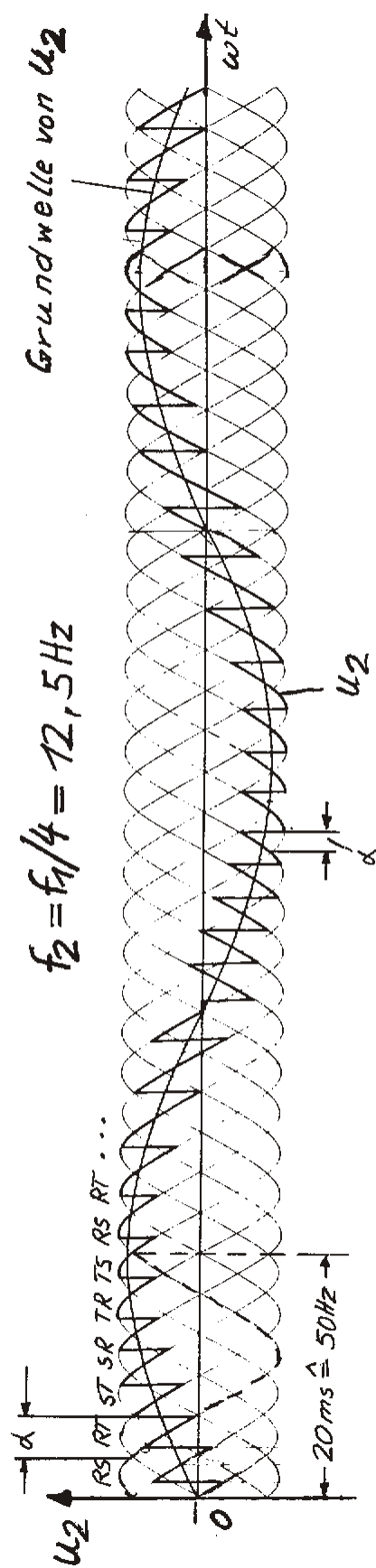


Bild 3.19 Frequenzsteuerung mit Direktumrichter

Bild 3.20 Belastungskennlinien bei Frequenzsteuerung

Auf diese Weise können die Belastungskennlinien in allen vier Quadranten kontinuierlich parallelverschoben werden. Dabei bleibt das maximal übertragbare Kippmoment M_k erhalten.

Anwendungen

Untersynchrone Stromrichter-kaskade:

Bei Motoren großer Leistung (10kW...25MW), die nur motorisch betrieben werden, ist der Aufwand an Elektronik gering, wenn man einen Schleifringläufermotor an eine untersynchrone Stromrichter-kaskade anschließt (Bild 3.21).

Der Zusammenhang zwischen der Drehzahl und dem Steuerwinkel ist bei Meyer: El. Antriebstechnik Band 1, S. 105 - 107 hergeleitet. Dort ist angegeben:

$$n = n_1 \left(1 + 0,74 \frac{U_{d2} \cos}{U_{20}} \right)$$

U_{d2} : Maximalwert der Zwischenkreis-Gleichspannung
 U_{20} : Läuferstillstands-Wechselspannung

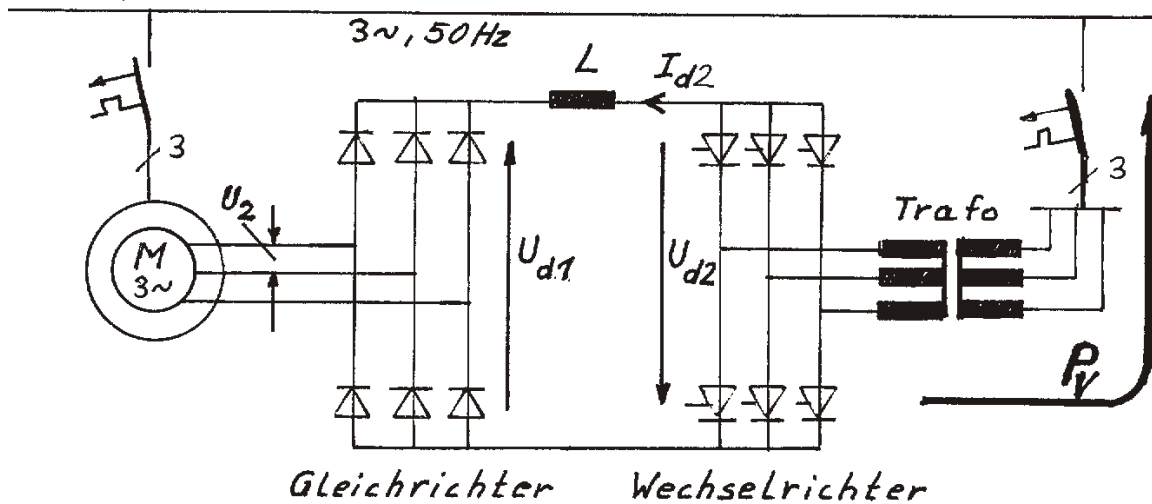


Bild 3.21 Untersynchrone Stromrichtererkaskade

Man kann sich die untersynchrone Stromrichtererkaskade vereinfacht auch als drei elektronisch gesteuerte Widerstände R_V vorstellen, ähnlich dem in Abschnitt 3.4.1 gezeigten Widerstandssteller.

Ein direkter Vergleich ist möglich, da man $R_V \sim U_{d2}/I_{d2}$ setzen kann.

Aus der Gleichung für die Drehzahl ergibt sich, dass mit steigendem Steuerwinkel (er kann zwischen $90 \dots 150^\circ$ eingestellt werden) die Drehzahl abnimmt. Damit ergeben sich folgende, kontinuierlich verschiebbare, parallelverschobene Belastungskennlinien (Bild 3.22).

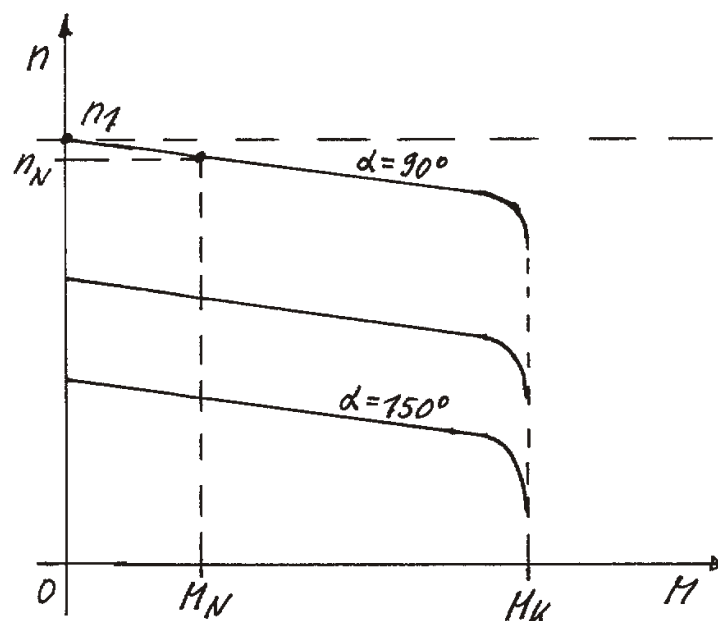


Bild 3.22 Belastungskennlinien für untersynchronen Betrieb

Hauptvorteil der untersynchronen Stromrichtererkaskade ist vor allem die **Rückführung der Verlustleistung P_v ins Netz** und nicht wie bei einem Widerstandssteller in Wärme. Der Gesamtwirkungsgrad solcher Antriebe ist daher sehr hoch.

Anwendungen

Frequenzumrichter mit PBM:

Die Frequenzumrichter sind Stromrichter mit einem Gleichstromzwischenkreis.

Die aus dem Drehstrom-Netz entnommene Spannung wird zunächst mit einer DS-Brückenschaltung gleichgerichtet und durch Kondensatoren geglättet. Anschließend wird die Zwischenkreisspannung U_{ZK} in eine Drehspannung mit steuerbarer Amplitude und Frequenz umgesetzt.

Hier lassen sich z.Zt. drei Verfahren angeben, die sich durch den Aufbau des Gleichstromzwischenkreises und die Art der Spannungsnachbildung unterscheiden.

- Frequenzumrichter mit konstanter Zwischenkreisspannung und Pulsbreitenmodulation (PBM), der hier beschrieben wird
- Frequenzumrichter mit variabler Zwischenkreisspannung und Puls-Amplitudenmodulation (PAM)
- Frequenzumrichter mit eingepprägtem Zwischenkreisstrom

Beim Frequenzumrichter mit PBM kann die motorseitige, synthetische Drehspannung durch die Wahl der Pulsbreite und Pulspause beeinflusst werden (Bild 3.23).

Die Grundwelle der Spannung sowie die Frequenz, welche sich aus den Pulsblöcken ergeben, lassen sich fast beliebig schnell verstellen. Daher ist der Frequenzumrichter für hochdynamische Antriebe besonders geeignet.

Die Belastungs-Kennlinien für Frequenzsteuerung (Bild 3.24) sind mit denen des Direktumrichters vergleichbar. Auch hier sind bei gleichbleibender Belastungs-Charakteristik die Kennlinien kontinuierlich parallelverschoben.

Allerdings ist der Frequenz-Stellbereich wegen der völlig synthetischen Spannung beim Frequenzumrichter wesentlich größer. Für Umrichter mit Thyristoren liegt er bei $f_2 = 0 \dots 1 \text{ kHz}$ und bei Umrichtern mit Transistoren im Bereich von $f_2 = 0 \dots > 5 \text{ kHz}$.

Anwendungen

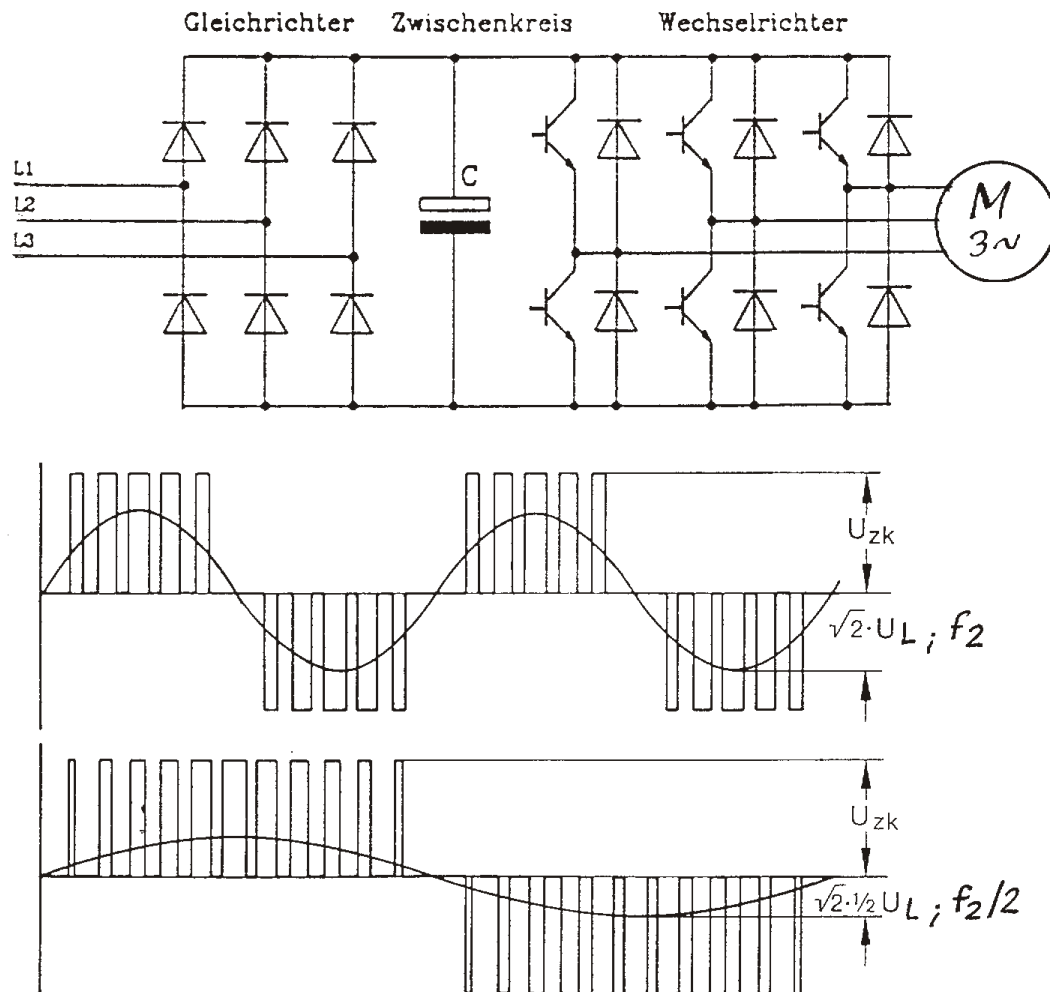


Bild 3.23 Frequenzumrichter mit PBM

Bild 3.24 Belastungskennlinien für Frequenzsteuerung

3.6 Die DS-Stromrichterantriebe im Vergleich

Aus der Vielzahl der Stromrichterantriebe sind hier die vier markantesten im Vergleich dargestellt. Die zugehörigen Anwendungen wurden bereits in Abschnitt 3.5 besprochen.

Drehstromsteller:

Für Asynchronmotoren mit Käfigläufer.
Nur Spannungssteuerung. Dabei nachgebende Belastungs-Charakteristik.
Hohe Verlustleistung im Stillstand.
Problemlos für jeden Anfahrvorgang nutzbar.
Unempfindlich gegen Netzschwankungen.
Gegenstrombremsung durch Phasentausch im Ständer möglich.
Ausgangsfrequenz $f_2 = f_1$.
Leistungsbereich 0,2 - 50 kW.
Drehzahlstellbereich ca. 1/20.

Direktumrichter:

Für Asynchronmotoren und Synchronmotoren.
Ausgangsspannung stückweise aus der Netzspannung nachgebildet.
U- und f-Steuerung. Bei f-Steuerung bleibende Belastungs-Charakteristik.
4-Quadrantenbetrieb bis Kippmoment möglich.
Hoher Kostenaufwand der Elektronik.
Ausgangsfrequenz $f_2 = 0 - 0,5f_1$.
Leistungsbereich 400kW - 10MW.
Drehzahlstellbereich ca. 1/20.

Untersynchrone Stromrichter-kaskade:

Für Asynchronmotoren mit Schleifringläufer.
Rückspeisung der Schlupf- bzw. Verlustleistung in's Netz.
Bei variablem Steuerwinkel bleibende Belastungs-Charakteristik.
1-Quadrantenbetrieb untersynchron (motorisch) möglich.
Leistungsbereich 10kW - >25MW.
Drehzahlstellbereich ca. 1/2.

Frequenzumrichter mit PBM:

Für Asynchronmotoren und Synchronmotoren, Servomotoren.
Ausgangsspannung mit Oberschwingungen behaftet (EMV-Problematik).
U- und f-Steuerung. Bei f-Steuerung bleibende Belastungs-Charakteristik.
Hohe Stelldynamik von Spannung und Frequenz..
4-Quadrantenbetrieb bis Kippmoment möglich.
Ausgangsfrequenz $f_2 = 0 - 3\text{kHz}$.
Leistungsbereich 0,5kW - 4MW.
Drehzahlstellbereich ca. 1/100.

3.7 GS-Antriebe und DS-Antriebe im Vergleich

Nachteile der DS-Antriebe sind folgerichtig Vorteile für die GS-Antriebe.

Vorteile der DS-Antriebe

Nachteile der DS-Antriebe

.

4. Sonderbauformen- und Kleinantriebe

Wie alle elektrischen Maschinen, die eine rotatorische oder translatorische Bewegung erzeugen, müssen auch die zahlreichen Spielarten der Klein- und Sondermaschinen das Induktionsgesetz erfüllen.

4.1 Formelsammlung für Kleinmotoren

Die angegebenen Formeln basieren auf **Datenblättern der Firmen Faulhaber und maxon motors**, sie gelten im Wesentlichen für Gleichstromkleinmotoren. Die Drehmomentkonstante k_M für kleine DC-Motoren lautet:

$$k_M = \frac{U \cdot I_0 \cdot R_A}{2 \cdot n_0}$$

Die **Einheit von k_M ist $\text{Nm/A} = \text{Ws/A} = \text{Vs}$, wenn n_0 in s^{-1} eingesetzt wird.** Damit lassen sich Reibungsmoment M_R und Haltemoment M_H im Stillstand angeben.

$$M_R = k_M \cdot I_0$$

$$M_H = M_i + M_R = k_M \cdot (I_H + I_0) \quad \text{mit} \quad I_H = \frac{U}{R_A}$$

Darin ist I_0 der Leerlaufstrom, I_H der Haltestrom bei Stillstand und M_i das ideelle Haltemoment. Die ideelle Leerlaufdrehzahl n_i sowie die Betriebsdrehzahl n_B im jeweiligen Arbeitspunkt des Motors (bei gegebener Leerlaufdrehzahl n_0) lauten:

$$n_i = n_0 \frac{U}{U - I_0 R_A} \quad \text{und} \quad n_B = n_i \left(1 - \frac{I_B}{I_H}\right)$$

Die abgegebene Motorleistung P_{2B} im Betriebspunkt des Motors errechnet sich mit Hilfe Betriebsmomentes M_B und der Winkelgeschwindigkeit ω_B zu:

$$P_{2B} = M_B \cdot \omega_B \quad \text{mit} \quad \omega_B = \frac{2\pi}{30} n_B$$

Man erhält die **Leistung in W, wenn M_B in Nm und die Betriebsdrehzahl n_B in der Einheit min^{-1} eingesetzt werden.**

4.2 Servomotor

Servomotoren sind heute fast ausschließlich Sonderbauformen der Synchronmaschine mit Permanentmagneterregung (Brushless AC-Drives).

Das Leistungsspektrum der Servomotoren reicht von 0,1 - 20kW. Vorteile gegenüber klassischen Drehstrommotoren sind:

- Drehzahlstellbereich von 1200 - 10000/min,
- hohes Beschleunigungsvermögen, da Läufer geringes Trägheitsmoment,
- kurzzeitige Überlastbarkeit möglich,
- kaum Wärme- und Magnetisierungsverluste im Läufer,
- keine Lüfter erforderlich.

Aufbau und Wirkungsweise:

Die Ständerwicklung ist eine Drehstromwicklung ähnlich der eines Asynchronmotors. Die Wicklungsstränge sind jedoch verdreht (verdreht), damit der Motor auch bei niedrigen Drehzahlen nicht "zahnt" (ruckt).

Die Ansteuerung erfolgt entweder mit Drehstrom oder mit rechteckförmigen 120° versetzten Gleichstrompulsen.

Der Läufer ist mit zahlreichen Permanentmagneten bestückt (Bild 4.1) und braucht daher kein Läuferblechpaket, sondern nur eine Haltekonstruktion. Die Permanentmagnete werden aufgeklebt und mit einer Kunststoffbandage festgehalten. Als Magnetwerkstoff wird häufig SmCo Samarium-Kobalt oder NdFeB (Neodym-Eisen-Bor) eingesetzt. Damit wird dem Läufer ein hohes Drehmoment verliehen. Er läuft dann mit dem Ständerfeld synchron ($n=n_1$).

Die häufig auftretende Forderung nach einem geringen Läuferträgheitsmoment bedingt eine längliche Bauweise des Motors, da das Trägheitsmoment bekanntlich in der vierten Potenz mit dem Durchmesser steigt.

So erhält man einen hochdynamischen Motor mit Hochlauf- und Bremszeiten im ms-Bereich.

Der Motor wird meist mit einem Positionssensor (oder auch Tachodynamo) und einer Magnetbremse ausgestattet (Bild 4.2)

Servomotoren können kurzzeitig das Dauerdrehmoment stark überschreiten, wie die Belastungs-Grenzkennlinien zeigen (Bild 4.3).

Die Ansteuerung erfolgt üblicherweise über Frequenzumrichter.



Ständerwicklung mit Läufer im Schnitt

3D-Darstellung des Läufers mit Permanentmagneten

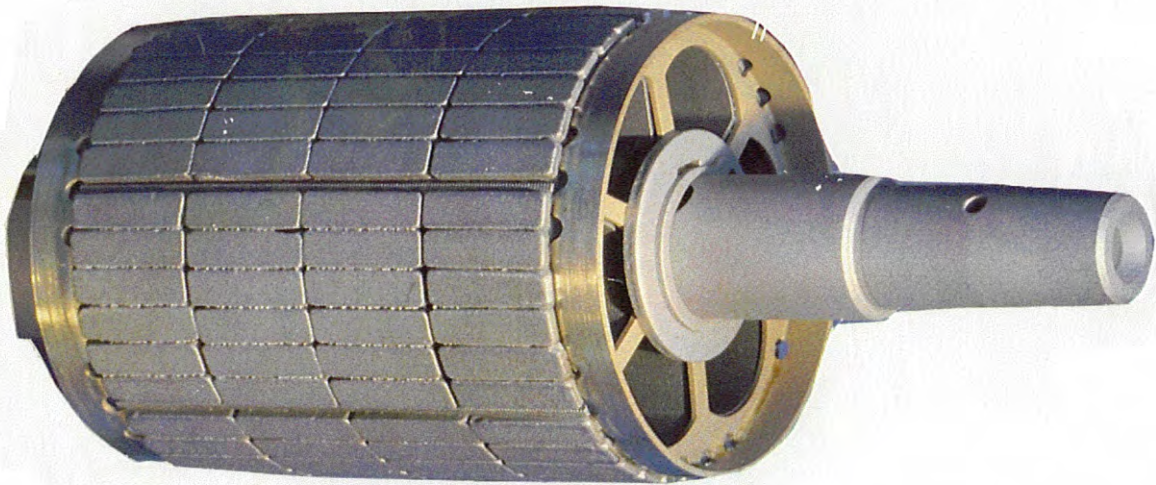


Bild 4.1 Servomotor, Langläufer

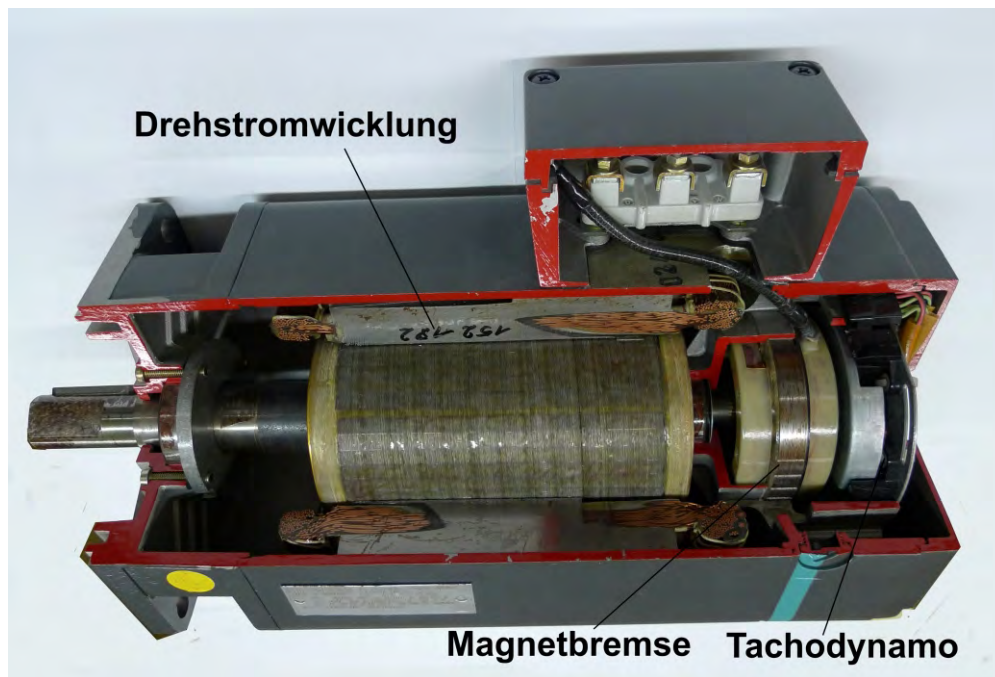


Bild 4.2 Servomotor im Schnitt

Bild 4.3 Belastungskennlinien des Servomotors

Anwendungen

4.3 Torquemotor

Der Torquemotor (Drehmomentmotor) ist ein Antrieb für hohe Drehmomente bis über 7000Nm bei kleinen Drehzahlen. Er kommt ganz ohne mechanische Übertragungselemente (Kupplung, Getriebe usw.) aus.

Aufbau und Wirkungsweise:

Dieser Motor ist im Grunde ein Servomotor in Kurzbauweise mit demzufolge großem Durchmesser (Bild 4.4).

Die Drehstromwicklung des feststehenden Ständers überträgt das Drehmoment direkt auf den ringförmigen Läufer, der mit Dauermagneten bestückt ist. So entsteht eine Synchronmaschine von hoher Dynamik, hoher Präzision (Drehzahlkonstanz, Positioniergenauigkeit) und flacher Bauweise (Bild 4.5).

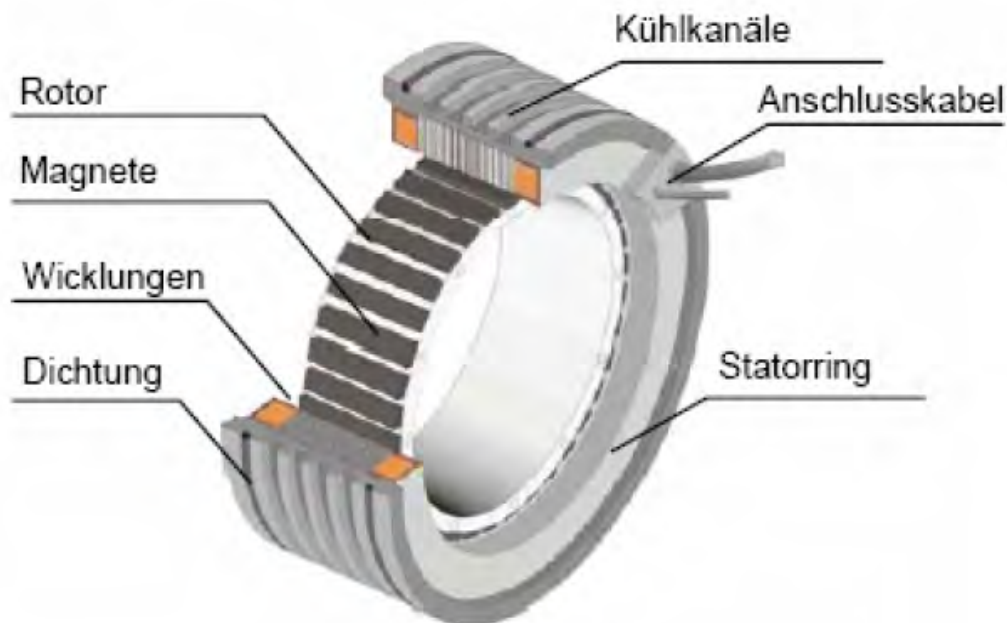


Bild 4.4 Aufbau des Torquemotors

Die Hohlwellenausführung des Siemens-Motors zeigt ein besonders geringes Massenträgheitsmoment und vereinfacht die Montage auch in komplexen Antriebskonzepten.

Durch den größeren Durchmesser entwickeln Hochleistungs-Torquemotoren eine erhöhte Wärmeentwicklung. Sie werden daher häufig mit ringförmigen Kühlkanälen für Wasserkühlung versehen.

Anwendungen

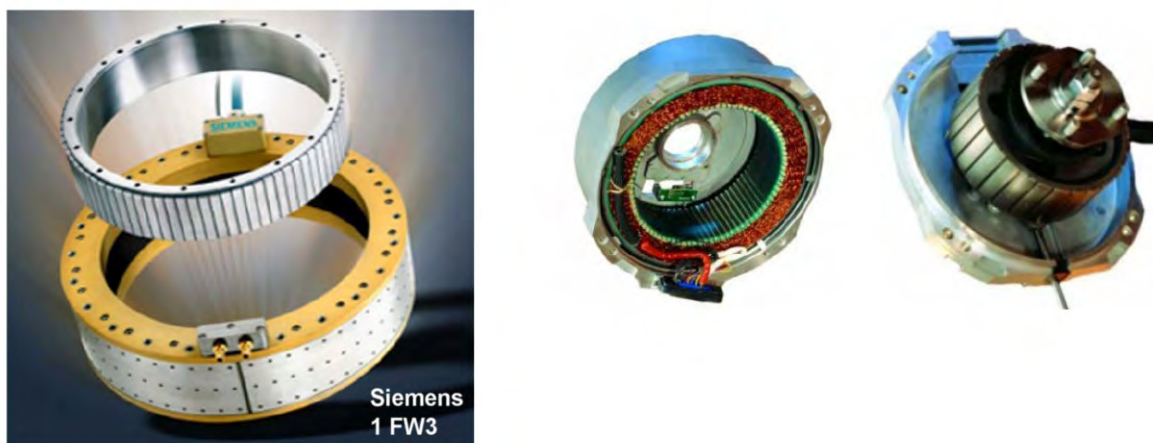


Bild 4.5 Zwei Varianten des Torquemotors

4.4 Reluktanzmotoren

Diese Antriebe sind auf vielen Anwendungsgebieten im Vormarsch und in zahlreichen Bauvarianten erhältlich /11/ und /12/.

Aufbau und Wirkungsweise Drehfeld-Reluktanzmotor:

Der magnetische Widerstand (Reluktanz) des Läufers (Rotors) ändert sich bei diesen Motoren entlang des Umfangs entsprechend der Polzahl. Der Drehfeld-Reluktanzmotor hat einen bewickelten mehrphasigen Ständer wie eine Asynchronmaschine. Der Läufer ist aber nicht voll zylindrisch, sondern weist ausgeprägte Pole auf, die mit Nuten versehen sind, in denen sich die Kurzschlusswicklung befindet (wie Käfigläufer, Bild 4.6).

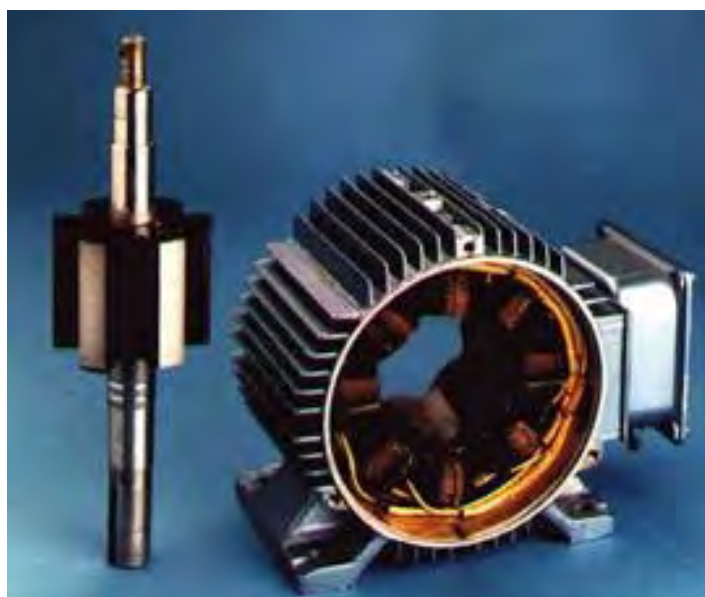


Bild 4.6 Drehfeld-Reluktanzmotor

Er läuft dann wie ein Asynchronmotor an bis in die Nähe der asynchronen Gleichgewichtsdrehzahl. Danach überwiegt der Reluktanzeffekt, und der Läufer dreht sich synchron mit dem Drehfeld. Dieser Effekt beruht darauf, dass die Feldlinien bestrebt sind, den Weg des geringsten magnetischen Widerstandes zu nehmen. Anders ausgedrückt: Der Läufer stellt sich immer in die Stellung des niedrigsten Energiegehaltes (der höchsten Induktivität). Solange nicht das maximal mögliche Lastmoment überschritten wird, läuft der Rotor synchron mit dem Ständerfeld. D.h. der Momentenverlauf geht vom asynchronen in den synchronen Betrieb über (Bild 4.7).

Bild 4.7 Momentenkennlinie des Reluktanzmotors

So lässt sich auf einfache und preisgünstige Weise ein mit der Ständerfrequenz f_1 synchron laufender Drehstrommotor bauen, der äußerst robust ist. Drehfeld-Reluktanzmotoren weisen als Nachteile gegenüber Synchronmotoren und Asynchronmotoren einen geringeren Wirkungsgrad, eine geringere Kraftdichte und einen hohen Blindleistungsbedarf auf.

Aufbau und Wirkungsweise Geschalteter Reluktanzmotor:

Ein Reluktanzmotor mit einer unterschiedlichen Anzahl ausgeprägter Zähne an Läufer und Ständer. Die Ständerzähne sind mit Spulen bewickelt, die abwechselnd ein- und ausgeschaltet werden. Die Zähne mit den bestromten Wicklungen ziehen jeweils die nächstgelegenen Zähne des Läufers wie ein Elektromagnet an und werden abgeschaltet, wenn die Zähne des Läufers den sie anziehenden Ständerzähnen gegenüberstehen. In dieser Position wird die nächste Phase auf anderen Ständerzähnen eingeschaltet, die andere Läuferzähne anzieht. Im allgemeinen hat ein geschalteter Reluktanzmotor drei oder mehr Phasen. Um im richtigen Zeitpunkt umzuschalten, wird der Motor mit einem Rotorlagegeber versehen und braucht eine Ansteuerelektronik (Bild 4.8).

Anwendungen für Reluktanzmotoren (geschalteter RM im Vormarsch)

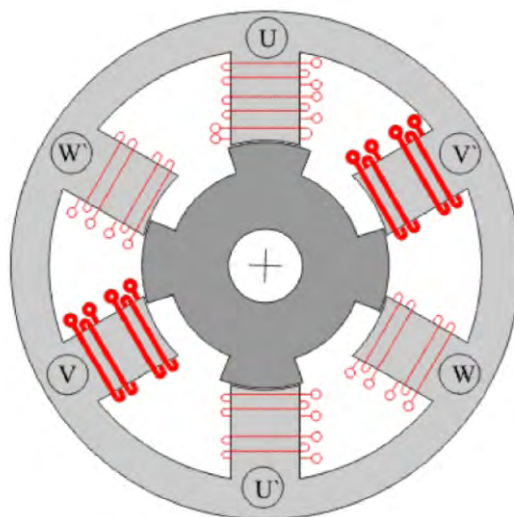


Bild 4.8 Geschalteter Reluktanzmotor

4.5 Scheibenläufermotoren

Die Scheibenläufermotoren haben im Gegensatz zu anderen Motoren keinen zylindrischen, sondern einen axialen Luftspalt. Sie können als Gleichstrom- oder Drehstrommotor hergestellt werden.

Das Leistungsspektrum solcher Motoren reicht von 6W - 10kW bei Drehzahlen bis 10000/min.

Aufbau u. Wirkungsweise Scheibenläufer mit Kommutator:

Auf die Läuferplatte ist die Ankerwicklung quasi wie auf einer Leiterplatte aufgedruckt. Dabei liegt der Kommutator dicht an der Welle.

Das homogene Ständerfeld wird mit Permanentmagneten aufgebaut, die beidseitig auf die Läuferplatte einwirken (Bild 4.9).

Die erhebliche Massenreduktion der rotierenden Teile führt zu einer hohen Dynamik mit Hochlauf- und Bremszeiten im ms-Bereich. Die kleinen Anschlußspannungen von 10V...50V erlauben die direkte Ansteuerung über Standard-Transistoren bzw. Operationsverstärkerschaltungen für Aufgaben der Steuer- und Regeltechnik..

Die Bauweise und damit auch die Belastungskennlinie dieses Motors sind qualitativ gleich der des fremderregten GS-Motors.

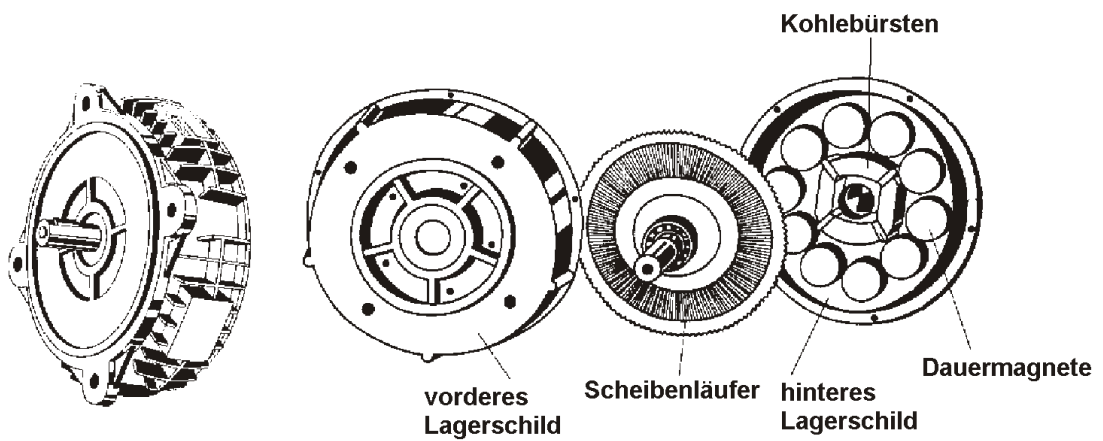
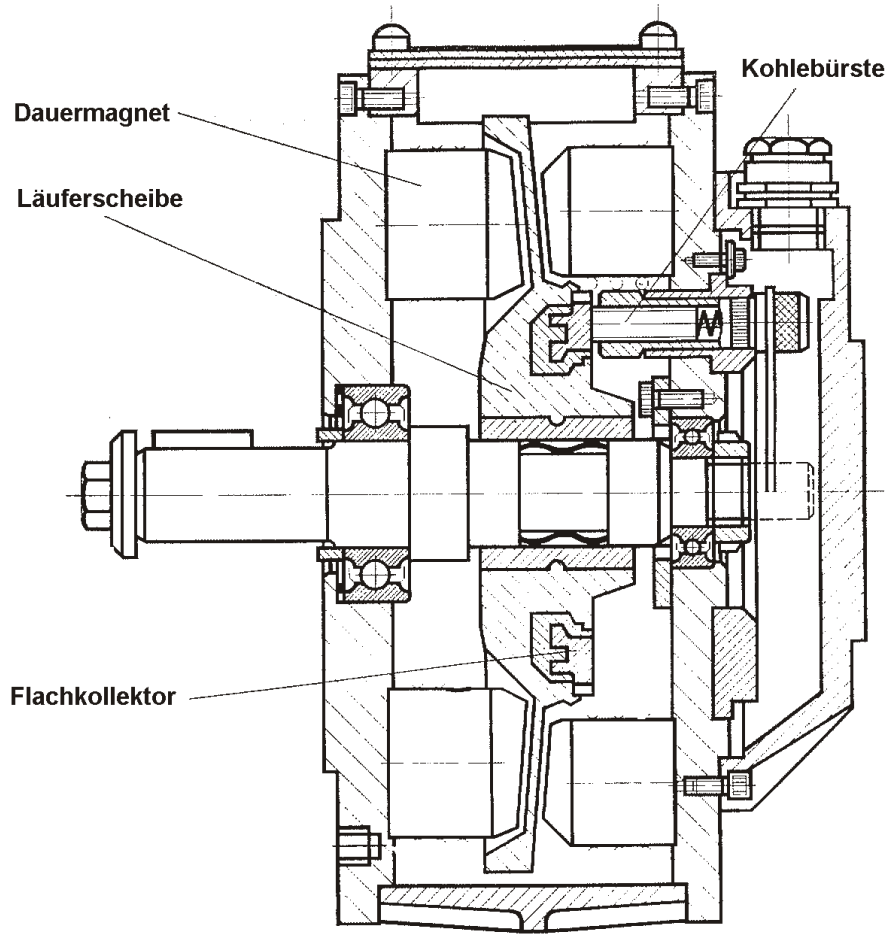


Bild 1.71
Scheibenläufermotor

Bild 4.9 Scheibenläufermotor mit Kommutator

Aufbau u. Wirkungsweise Bürstenloser Scheibenläufer:

In Bild 4.10 ist eine für Audio- und Videogeräte eingesetzte Version als Direktantrieb in Einscheibenläuferausführung für niedrige Drehzahlen dargestellt.

Auf einer Leiterplatte sind die Spulen und die Schaltung für die elektronische Kommutierung (bürstenloser Antrieb) angebracht. Der Läufer besteht aus einer Ferritmagnetrotorscheibe mit Eisenrückschluss.

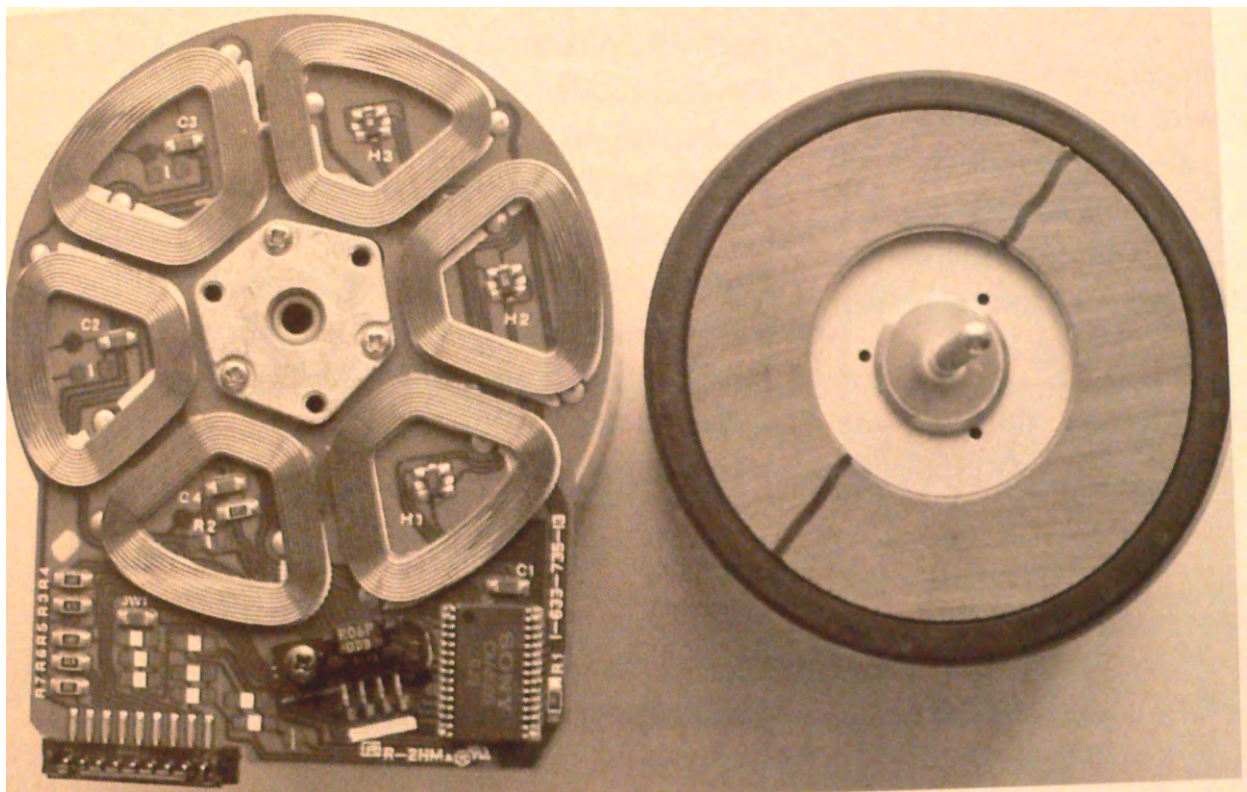
Anwendungen Scheibenläufermotoren

Bild 4.10 Scheibenläufermotor mit elektronischer Kommutierung

4.6 Glockenankermotoren

Eine gute Marktübersicht mit Konstruktionskatalog verschiedener Kleinmotoren findet sich in /9/, /10/ und /11/. Weiterführend sollten Sie die Vorlesung *Aktorik* besuchen.

Aufbau und Wirkungsweise:

In Bild 4.11 ist ein Glockenankermotor mit eisenlosem Läufer dargestellt, der eine selbsttragende Wicklung hat. Er ist wie eine Glocke über den feststehenden Permanentmagneten aus AlNiCo bzw. Seltenerdmetallen gestülpt, welcher das konstante Erregerfeld erzeugt. Die Edelstahlkohlebürsten, die sich stirnseitig in Höhe der Welle befinden, erzeugen ein geringeres Bürstenfeuer als Kupferbürsten und weisen einen geringeren Abrieb auf.

In unserem Verständnis stellt diese Bauform quasi einen fremderregten GS-Motor dar. Die Belastungskennlinie hat demzufolge Nebenschluß-Charakteristik, sie ist allerdings stärker geneigt.

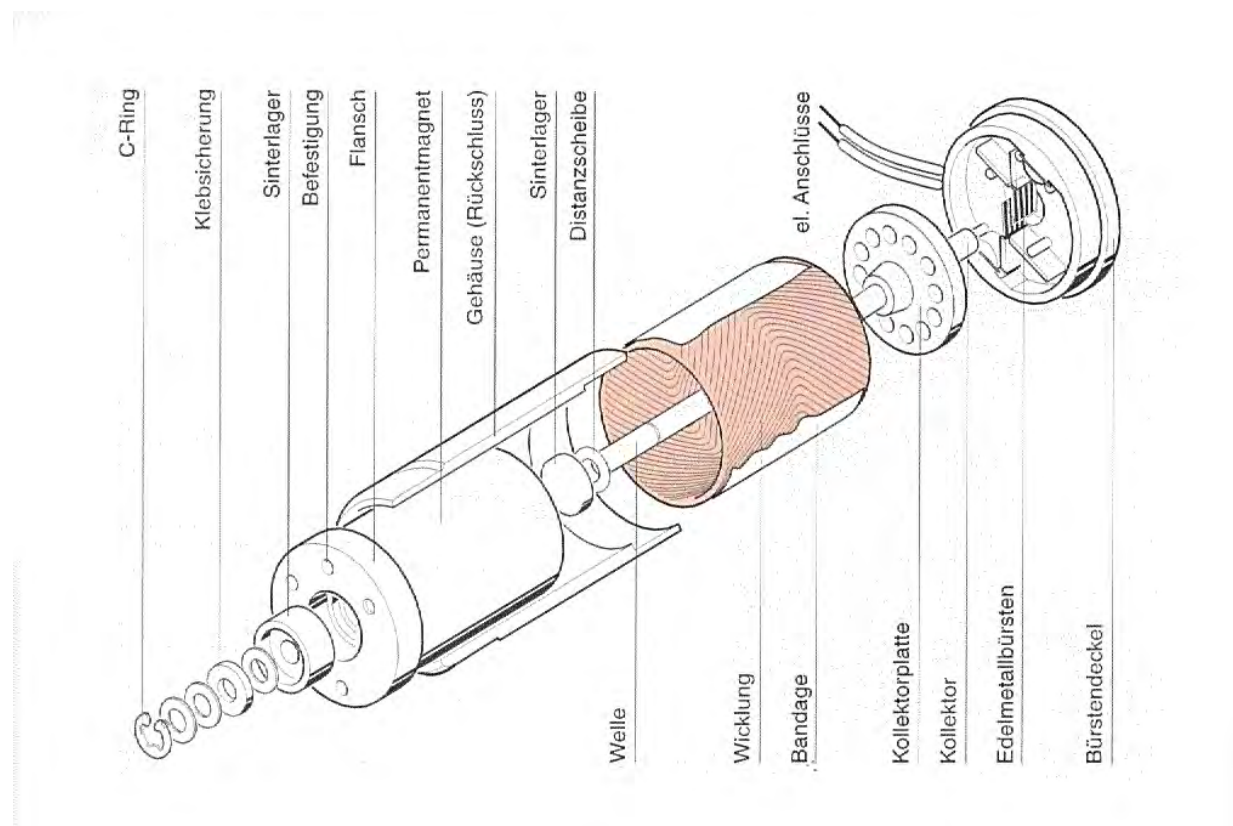


Bild 4.11 Glockenankermotor mit stirnseitigen Bürsten

Eine andere Motorvariante mit Getriebe, Rotorkollektor und Winkelschrittmotor (Encoder) für Positionieraufgaben ist in Bild 4.12 dargestellt. Wegen der sehr geringen Masse der rotierenden Teile liegen die Brems- und Hochlaufzeiten der Glockenankermotoren im ms-Bereich. Es sind Drehzahlen von 4000/min bis zu 20000/min realisierbar.

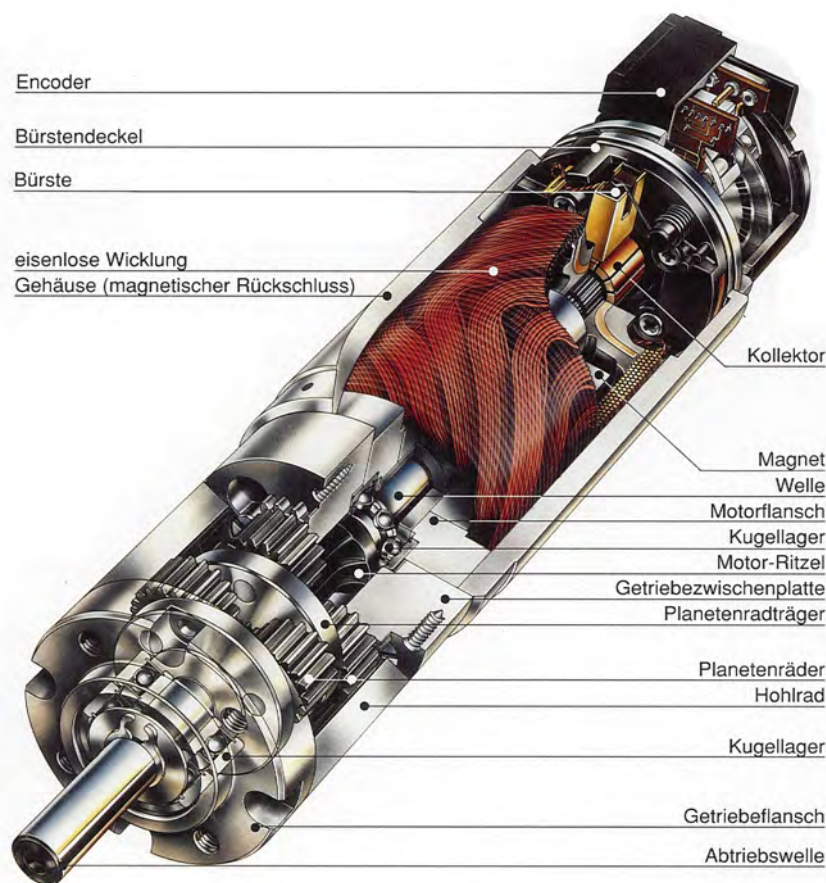


Bild 4.12 Glockenankermotor mit Anbauten

Eine Zunahme der Einschaltzeit und Belastung führen zur Erwärmung der Wicklung. Dabei nimmt der Wicklungswiderstand zu und die magnetische Kraftwirkung ab. Die Folge ist eine kleineres Haltemoment und eine stärkere Neigung der Belastungskennlinie.

Anwendungen

4.7 Spaltnotor

Der Spaltnotor zeichnet sich durch seinen einfachen, robusten und kostengünstigen Aufbau aus. Außerdem verfügt er über ein hohes Anlaufmoment. Er ist ein Wechselstrommotor mit Kurzschlußläufer, der an 230V Wechselspannung angeschlossen wird.

Aufbau und Wirkungsweise:

Er besteht aus zwei Hauptpolen, die von einer Netzwicklung mit Wechselstrom erregt werden. Davon abgespalten sind zwei Spaltpole, die jeweils einen Kurzschlußring (Kupferring) tragen (Bild 4.13 und Bild 4.14).

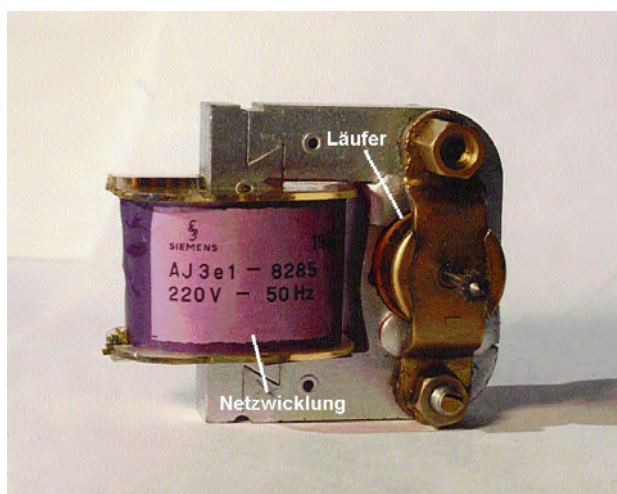


Bild 4.13 Spaltnotor

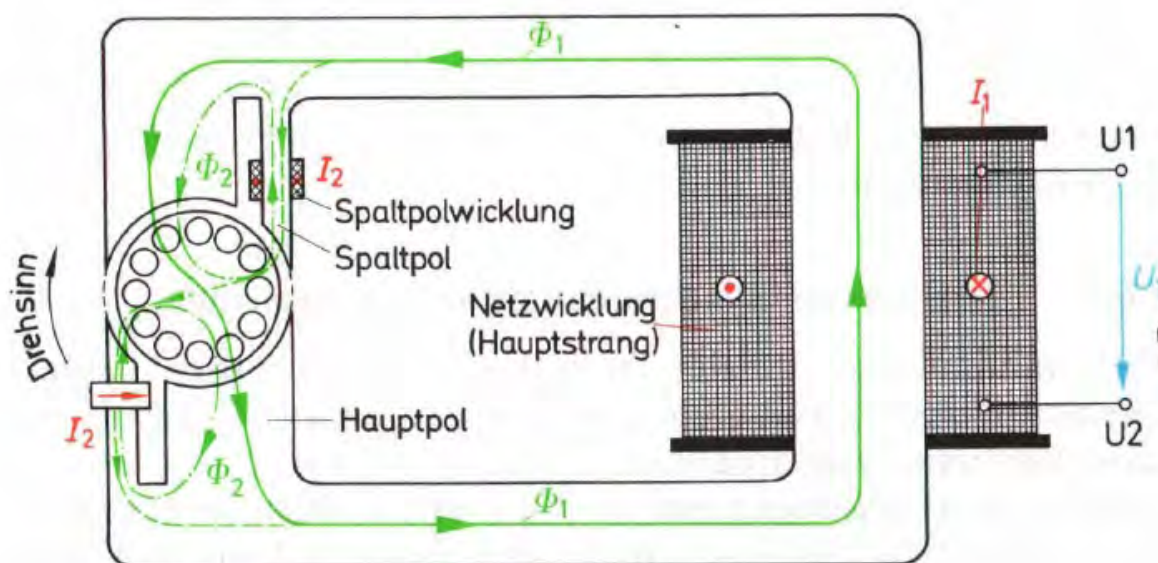


Bild 4.14 Strom- und Magnetfluß des Spaltnotors

Der durch die Netzwicklung fließende Strom I_1 baut den Wechselfluß Φ_1 auf. Dieses Magnetfeld durchsetzt Haupt- und Spaltpole. In der Kurzschlußwicklung wird zusätzlich der Strom I_2 induziert. Dieser hat ein Feld Φ_2 zur Folge. In den Hauptpolen erhält man somit eine Feldlinienverdichtung, während das Feld der Spaltpole durch Φ_2 geschwächt wird. Auf diese Weise entsteht ein zweipoliges Drehfeld, welches vom Haupt- zum jeweiligen Spaltpol wandert und den Kurzschlußläufer in Drehung versetzt. Es ist bei dieser Bauweise allerdings nur eine Drehrichtung möglich.

Das Feld hat Ähnlichkeit mit dem eines Asynchronmotors der nur an zwei Phasen angeschlossen ist. Daher ist die Momenten- und Belastungskennlinie vergleichbar mit der des Asynchronmotors (Bild 4.15).

Bild 4.15 Momentenverlauf beim Spaltpolmotor

Die Leistungsbandbreite dieser Motoren reicht von 1 - 300W. Die Nennmomente sind 0,5Ncm - 100Ncm bei Drehzahlen um 2500/min.

Die niedrigen Fertigungskosten und seine wartungsfreie langlebige Bauweise machen ihn für viele Anwendungen besonders geeignet.

Der Wirkungsgrad von nur 25% fällt wegen der geringen Energiekosten in diesem Leistungsbereich nicht besonders ins Gewicht. Bild 4.16 zeigt ein Anwendungsbeispiel.



Bild 4.16 Spaltpolmotor für Querstromlüfter

Anwendungen

4.8 Vorschub- und Positionierantriebe

Vorschubantriebe werden heute mit Verfahrgeschwindigkeiten von 50m/s und mehr gebaut. Die wichtigsten Forderungen an diese Antriebe sind:

- Übertragung großer Momente (Schnittkräfte, Reibkräfte, Zugkräfte)
- Hohe Drehzahlsteifigkeit (konstante Drehzahl unabhängig vom Lastmoment)
- Spielfreiheit und Ruckfreiheit
- Hohe Positioniergenauigkeit (0,1 m linear, 0,1° rotatorisch)
- Geringe Geräuscentwicklung

Bestandteile von Vorschubantrieben

- Motor
- Getriebe
- Messsystem
- Übertragungselemente (Führung, Riemen, Kugelgewindespindel, etc.)
- Lageregelung



Beispiel Fräsmaschine

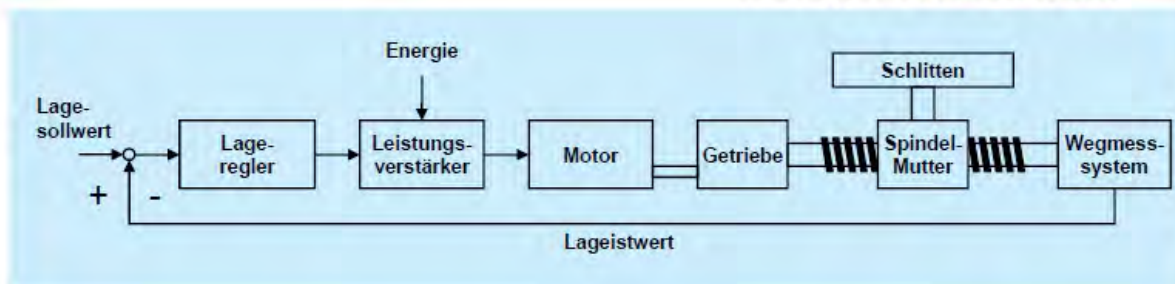


Bild 4.17 Bestandteile von Vorschubantrieben

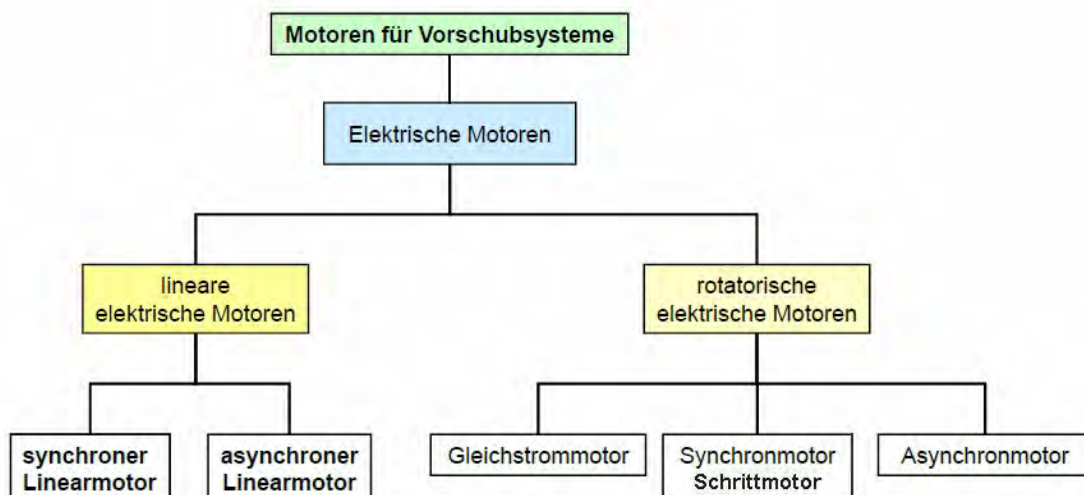


Bild 4.18 Motorvarianten für Vorschubantriebe

4.8.1 Schrittmotor

Schrittmotoren sind größtenteils Sonderbauformen der Synchronmaschine, bei denen eine definierte Folge von Winkelschritten durch die Ansteuerung mit Stromimpulsen erzeugt wird. Sie sind damit besonders für Positionieraufgaben geeignet. Die Schrittweite beträgt ohne Zusatzelektronik $0,1^\circ - 25^\circ$.

Bei einer Positionieraufgabe ist normalerweise ein Regelkreis (einschließlich Winkelschrittgeber für die Wegerfassung) erforderlich, um einen Motor in eine gewünschte Position zu bringen. Ein Schrittmotor dagegen bleibt bei Vorgabe der definierten Winkelschritte entsprechend seiner hohen Positioniergenauigkeit an der gewünschten Position stehen (ohne Regelung).

Aufbau und Wirkungsweise:

Der hier beschriebene Schrittmotor ist ein Klauenpolschrittmotor, der wegen seines günstigen Preis-Leistungs-Verhältnisses in sehr hohen Stückzahlen produziert wird. Sein Läufer besteht aus hintereinanderliegenden und gegeneinander versetzten Permanentmagneten mit abwechselnd ausgebildeten Nord- und Südpolen (Bild 4.19). Als Magnetmaterial wird NdFeB (Neodym-Eisen-Bor), SmCo (Samarium-Kobalt) oder Material basierend auf Selten-Erden-Kobalt eingesetzt.

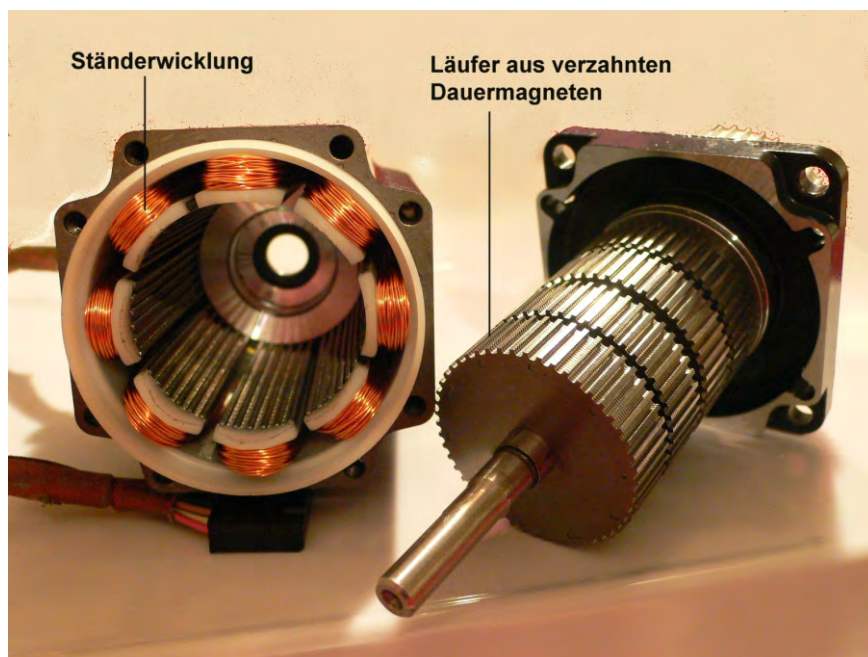


Bild 4.19 Klauenpolschrittmotor

Der Ständer besteht aus gabel- bzw. klauenförmig angeordneten Wicklungssträngen. Diese werden mit Transistor-Schaltern aus einer Ansteuer-elektronik impulsförmig angesteuert, so dass sich der Läufer nach dem Ständerfeld ausrichtet. Bild 4.20 zeigt die Ansteuerung mit zwei Klauen für eine volle Linksdrehung.

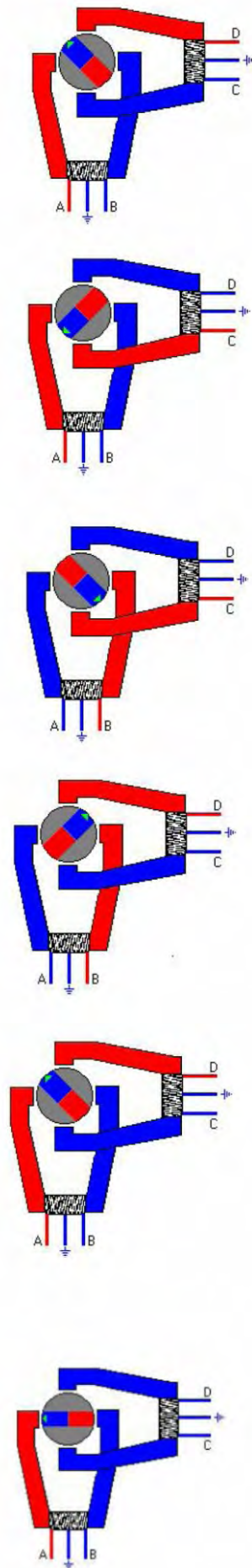


Bild 4.20 Bewegungsphasen einer vollen Linksdrehung

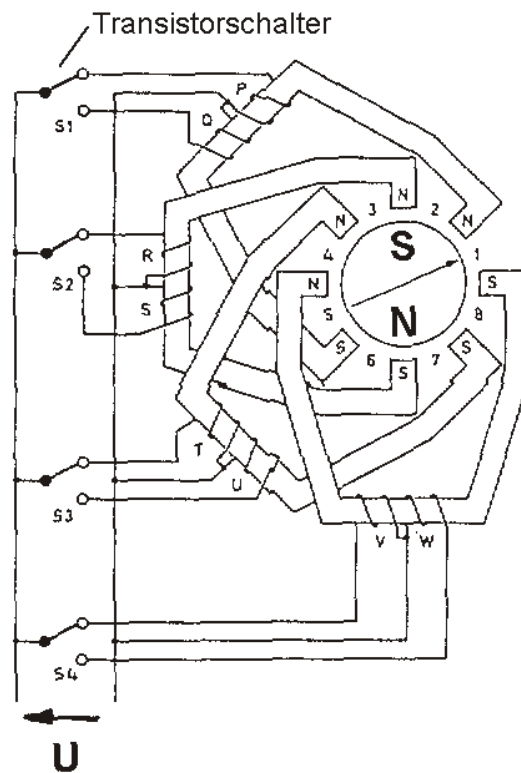


Bild 4.21 Vierpoliger Schrittmotor

Die Zahl der Winkelschritte/Umdr. läßt sich auf folgende Weise vergrößern:

Bild 4.22 Belastungskennlinien

Die Belastungskennlinien sind in Bild 4.22 dargestellt. Sie hängen sehr stark von der Ansteuerung ab. Für den *gewöhnlichen* dynamischen Betrieb gilt die Grenzfrequenz f_A , bis zu der der Schrittmotor einer Schrittvorgabe folgt.

Wegen der kleinen übertragbaren Drehmomente, sie liegen im Ncm-Bereich, ist es angebracht, mittels Getriebe (Harmonic-Drive) das Drehmoment auf der Prozeßseite anzuheben. Dazu braucht man dann aber eine hohe Motordrehzahl. Aus diesem Grunde werden die Motoren für Drehzahlen bis 16000/min gebaut.

Anwendungen

4.8.2 Linearmotoren

In Bild 4.23 sind verschiedene Linearmotortypen und deren Funktionsprinzip dargestellt.

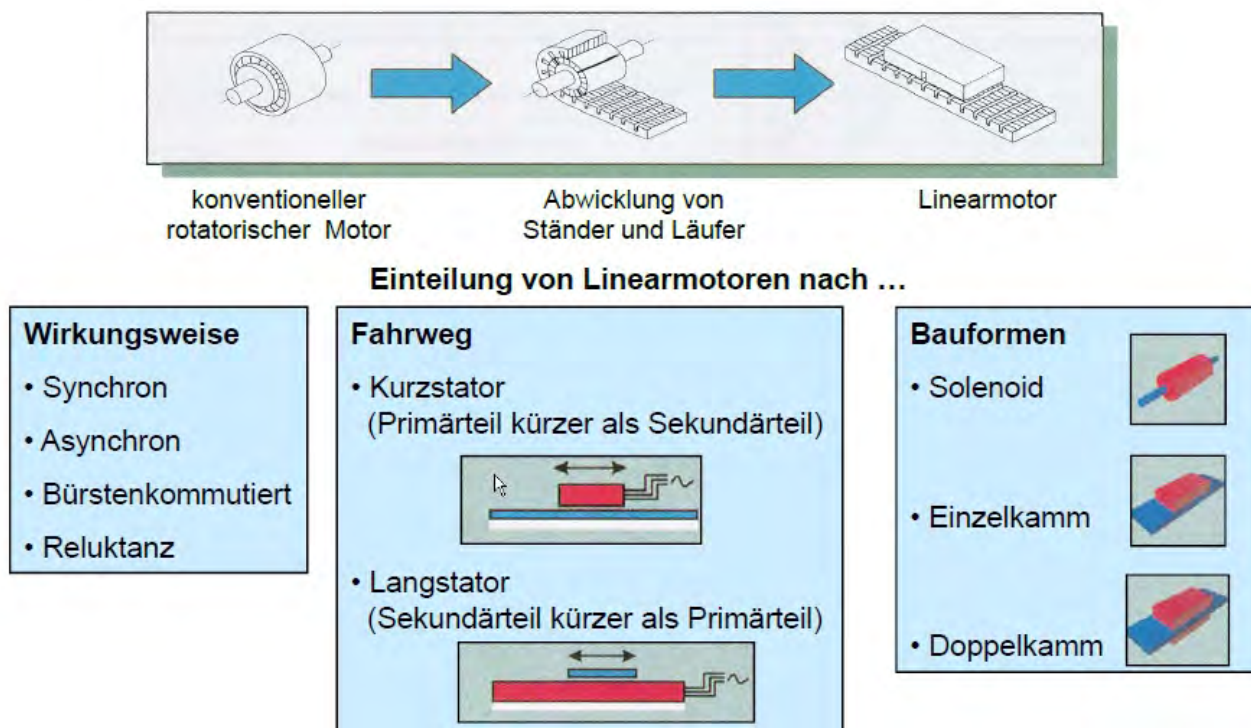


Bild 4.23 Einteilung Linearmotortypen

Entscheidende Vorteile von Linearmotoren gegenüber rotatorischen Motoren sind.

Aufbau und Wirkungsweise Drehstrom-Linearmotoren:

Aus den zahlreichen Varianten von Linearmotoren werden hier zunächst zwei typische herausgegriffen und ihr Aufbau dargestellt (Bild 4.24).

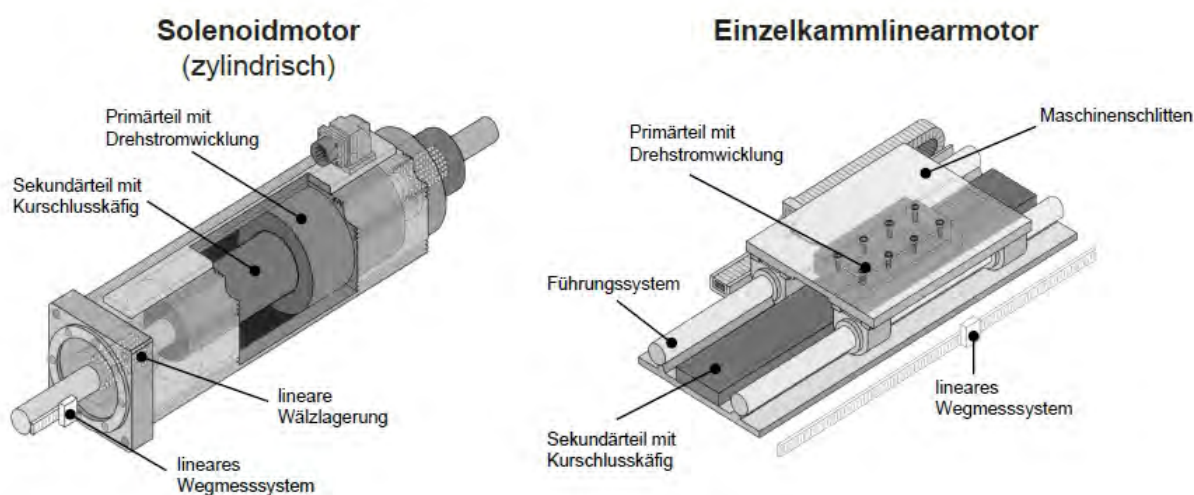


Bild 4.24 Zylindrischer und Einzelkamm-Linearmotor

Sowohl beim zylindrischen Linearmotor (Solenoidmotor) als auch beim Einzelkammer-Linearmotor besteht der bewegliche Teil aus einem Kurzschlußläufer oder in synchroner Bauweise aus Permanentmagneten (Bild 4.25). Im Ständer befindet sich die Drehstromwicklung, durch welche ein Wanderfeld erzeugt wird, dem der Läufer in linearer Bewegung folgt.

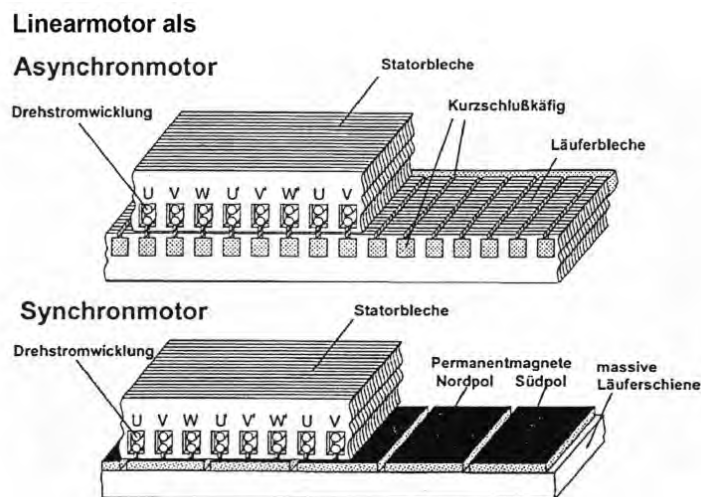
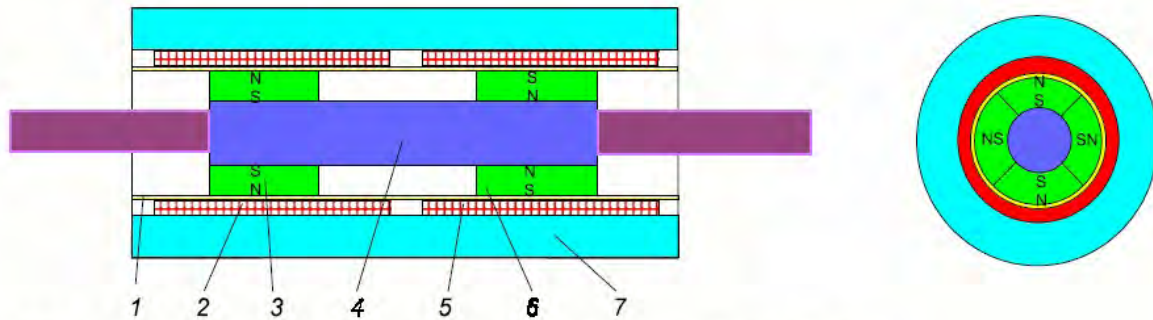


Bild 4.25 Linearmotor asynchrone und synchrone Bauweise

Aufbau und Wirkungsweise Gleichstrom-Linearmotor:

Eine weitere Motorvariante ist der Gleichstrom-Linearmotor (Bild 4.26).



1 Lagerhülse, 2 und 5 Antriebsspulen, 3 und 6 Permanentmagneten,
4 Eisenkern (Welle), 7 Eisenrückschluß

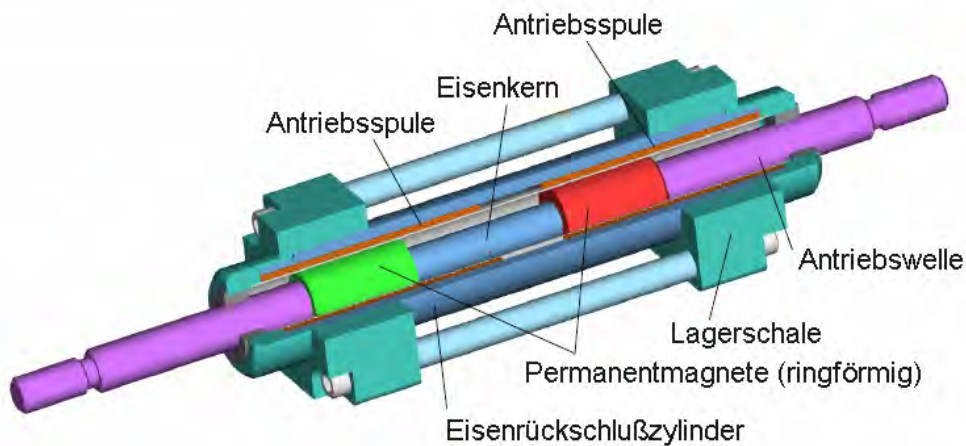


Bild 4.26 GS-Linearmotor

Die lineare Bewegung wird durch nacheinander folgende Ansteuerung der Antriebsspulen erreicht, denen der Permanentmagnetläufer folgt. Neuere Bauformen enthalten zusätzlich ein Positionserfassungssystem für die Lageregelung.

Für einen Linearmotor sind die Kraft und Bewegungsgeschwindigkeit wichtige Kenngrößen. Der typische Verlauf ist in Bild 4.27 dargestellt.

Bild 4.27 F-v-Kennlinie

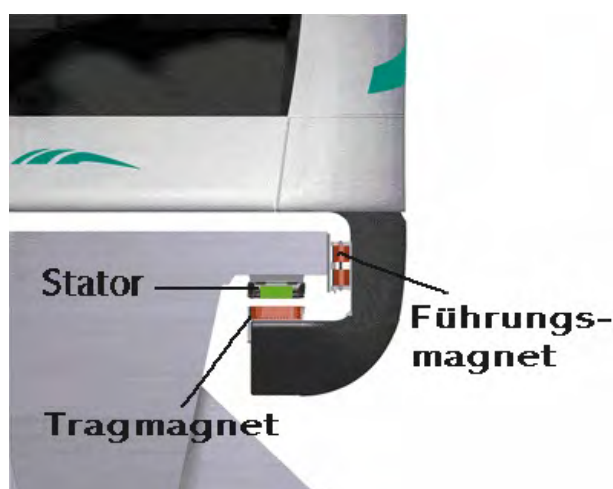
Anwendungen

Aufbau und Wirkungsweise des Transrapid-Lineararmotors:

Von den zahlreichen Varianten der Drehstromlinearmotoren für Positionieraufgaben soll hier ein herausragender Großantrieb für den Personen- und Frachtverkehr besprochen werden, der des Transrapid.

Trag- und Führsystem

Das berührungsfreie Trag- und Führsystem des Transrapids arbeitet nach dem Prinzip des elektromagnetischen Schwebens (Bild 4.28). Es beruht auf den anziehenden Kräften zwischen den im Fahrzeug angeordneten einzeln elektronisch geregelten Elektromagneten (Tragmagnet) und den ferromagnetischen Reaktionsschienen (Stator), die beidseitig unterhalb des Fahrweges installiert sind. Dabei ziehen die Tragmagnete das Fahrzeug von unten an den Fahrweg heran, die Führungsmagnete halten es seitlich in der Spur.



Die Trag- und Führungsmagnete sind beidseitig über die gesamte Fahrzeuglänge angeordnet. Ein komplexes Regelsystem stellt sicher, dass der **Abstand vom Tragmagnet zum Stator konstant 10mm beträgt**. Jeder einzelne Magnet arbeitet weitgehend unabhängig vom Nachbarmagnet; er hat eine unabhängige Energieversorgung mit eigenem Stellglied, Regler und Sensoren.

Die Energieversorgung des Magnetsystems und der übrigen elektrischen Verbraucher des Fahrzeugs erfolgt aus Bordbatterien. Diese werden während der Fahrt des Fahrzeugs über Lineargeneratoren, die in den Tragmagneten integriert sind, geladen.

Der Drehstromlinearmotor

Das Antriebssystem der Magnetschwebebahn Transrapid ist **stationär in den Fahrweg integriert**. Die Funktion dieses **Langstatorlinearmotors** lässt sich aus der Wirkungsweise eines rotierenden Elektromotors ableiten, dessen Stator aufgeschnitten und gestreckt wird. So erzeugt er kein magnetisches Dreh-, sondern ein Wanderfeld, von dem das Fahrzeug durch seine Tragmagnete synchron und berührungsfrei mitgezogen wird. Das Wanderfeld wird jeweils nur auf den Streckenabschnitt geschaltet, über den sich der Transrapid bewegen soll. Die Geschwindigkeit des Fahrzeuges hängt von der angewandten Frequenz ab. Die Frequenzen variieren von 0 und 300Hz, was einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 0 - 550 km/h entspricht.

Anwendungen Transrapid

5. Betriebsarten elektrischer Maschinen

Die Dimensionierung elektrischer Maschinen nach der Leistung bei gegebener Betriebsart erfordert für Hersteller und Anwender gleichermaßen gültige Vorschriften. In VDE 0530 Teil 1 sind dazu acht Betriebsarten festgelegt. Außerdem sind dort auch die Isolierstoffklassen für die höchstzulässige Dauertemperatur der Maschinen angegeben.

5.1 Die vier wichtigsten Betriebsarten S1, S2, S3, S5

Die im Folgenden benutzten Zeitkonstanten haben die Bezeichnungen:
 T_A : Abkühlzeitkonstante, T_E : Erwärmungszeitkonstante
 t_B : Betriebszeit, t_{St} : Stillstandzeit, $t_r = t_B/t_{St}$: Einschaltdauer

Beispiele für die Größenordnung von T_E

T_E /min	Bauform
10 - 30	kleine, geschlossene Maschine
50 - 70	durchzugbelüftete Maschine
80 - 120	oberflächengekühlte Maschine

Dauerbetrieb S1:

In dieser Betriebsart erreicht die Maschine bei konstanter Belastung den thermischen Beharrungszustand. Er gilt als erreicht, wenn die Temperaturänderung/Stunde nicht mehr als 2K beträgt (Bild 5.1). Diese Betriebsart findet man z.B. bei Lüftern und Papiermaschinen. Dabei gilt:

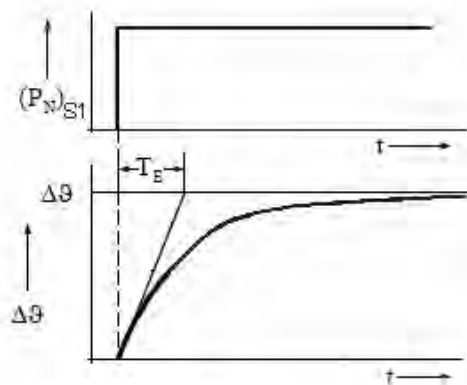


Bild 5.1 Leistungs- und Temperaturverlauf bei Dauerbetrieb

Kurzzeitbetrieb S2:

Er bedeutet, dass die Maschine bei konstanter Belastung nicht den thermischen Beharrungszustand erreicht (Bild 5.2). Die nachfolgende Pause besteht solange, bis die Maschinentemperatur nicht mehr als 2K über der Temperatur des Kühlmediums liegt. Die zulässige Höchsttemperatur der Maschine wird also nicht erreicht. Daher kann die Maschine kurzzeitig überlastet werden. Anwendungsbeispiele für ein solches Verhalten sind Werkzeugmaschinen, Walz- und Wickelantriebe. Bei Maschinen mit Nebenschlußverhalten (Asynchron-, Nebenschluß- und fremderr. Motor) gilt dann:

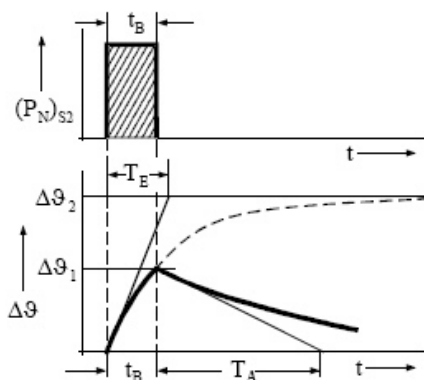
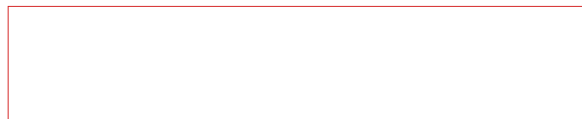


Bild 5.2 Leistungs- und Temperaturverlauf bei Kurzzeitbetrieb

Periodischer Aussetzbetrieb ohne Einfluß des Anlaufens S3:

Er ist eine Folge gleichartiger Schaltspiele bei konstanter Belastung. Der Erwärmungseinfluß des Anlaufstromes ist gering und wird vernachlässigt (Bild 5.3). Der thermische Beharrungszustand wird nicht erreicht. Diese Betriebsart findet sich beispielsweise bei Verpackungsmaschinen, Schreibmaschinen u.a. Es gilt dann für die zulässige Leistung:

$$P_{\text{zul}} = P_N \sqrt{1 + \frac{T_E}{T_A} \frac{1 - t_r}{t_r} \left(1 - \frac{t_B}{T_E}\right)} \quad 2 \quad M_k \quad n_k$$

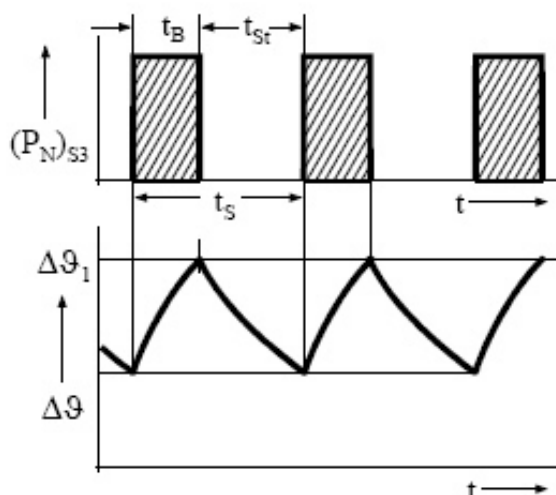


Bild 5.3 Periodischer Aussetzbetrieb

Periodischer Aussetzbetrieb mit Einfluß des Anlaufens und elektrischer Bremsung S5:

Das Lastspiel entspricht dem der Betriebsart S3, nur wird die zusätzliche Erwärmung durch den Anlauf und bei elektrischer Bremsung berücksichtigt. Dadurch verlängert sich t_s bzw. verkleinert sich t_r (Bild 5.4).

$$P_{zul} = P_N \sqrt{1 + \frac{T_E}{T_A} \frac{1 - t_r}{t_r} \left(1 - \frac{t_B}{T_E}\right)} \quad 2 \quad M_k \quad n_k$$

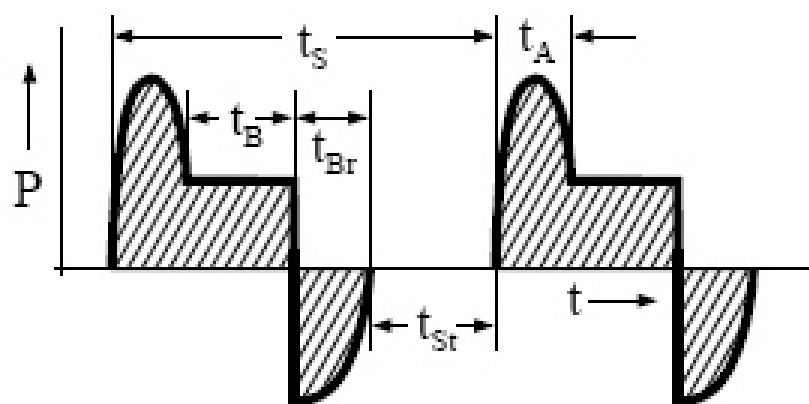


Bild 5.4 Leistungsverlauf bei Betriebsart S5

6. Personen- und Motorschutz, EMV

6.1 IP-Schutzarten und Aufstellungsarten

Die Aufstellungsart umlaufender elektrischer Maschinen ist in IEC 34 Teil 7 genormt. Eine Auswahl daraus zeigt Tabelle 6.1.

Auf die Bauform einer elektrischen Maschine hat der Schutz von Personen vor Berührung spannungsführender und rotierender Teile einen wesentlichen Einfluß bezüglich der Konstruktion und Kosten. Hinzu kommt der Schutz vor Eindringen von Festkörpern oder Wasser.

Die IP-Schutzarten umlaufender elektrischer Maschinen sind in DIN IEC 34 Teil 5 genormt bzw. in VDE 0530 Teil 5 festgelegt. Ein Auszug aus diesen Normen zeigt die Aufstellung in Tabelle 6.2.

- Die erste Kennziffer gibt den Grad des Berührungs- und Fremdkörperschutzes an,
- die zweite Kennziffer den Grad des Schutzes vor Eindringen von Wasser.

6.2 Motorschutz für Niederspannungs-DS-Motoren

Bei allen großen Motorherstellern werden eine Vielzahl von Motoren lagermäßig geführt.

Die folgenden Tabellen zeigen für eine bestimmte Motor-Typenreihe, welcher Motorschutz und Kabelquerschnitt bei einer gewählten Leistung und Anlaufzeit erforderlich sind (Tabelle 6.3 und 6.4).

Es handelt sich um einen Auszug aus dem ABB-Handbuch für Elektromotoren. Alle Werte sind Anhaltswerte. Neben den Schmelzsicherungen sind als Überlastschutz thermische Auslöser vorzusehen.

6.3 EMV

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) ist die Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung in ihrer elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren, ohne die Umgebung unzulässig zu beeinflussen (VDE 0870).

Typische EMV-Probleme treten beim Einsatz von Frequenzumrichtern auf, da sind hochfrequente Netzbelastungen, Spannungsspitzen, Fehlanpassungen des Umrichtersystems. Daher sind die einschlägigen EMV-Normen bereits bei der Planung zu berücksichtigen und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen (Filterung, Galvanische Trennelemente, Geschirmte Kabelsysteme). Die wichtigsten, auf die EU abgestimmten Normen sind in Tabelle 6.5 dargestellt.

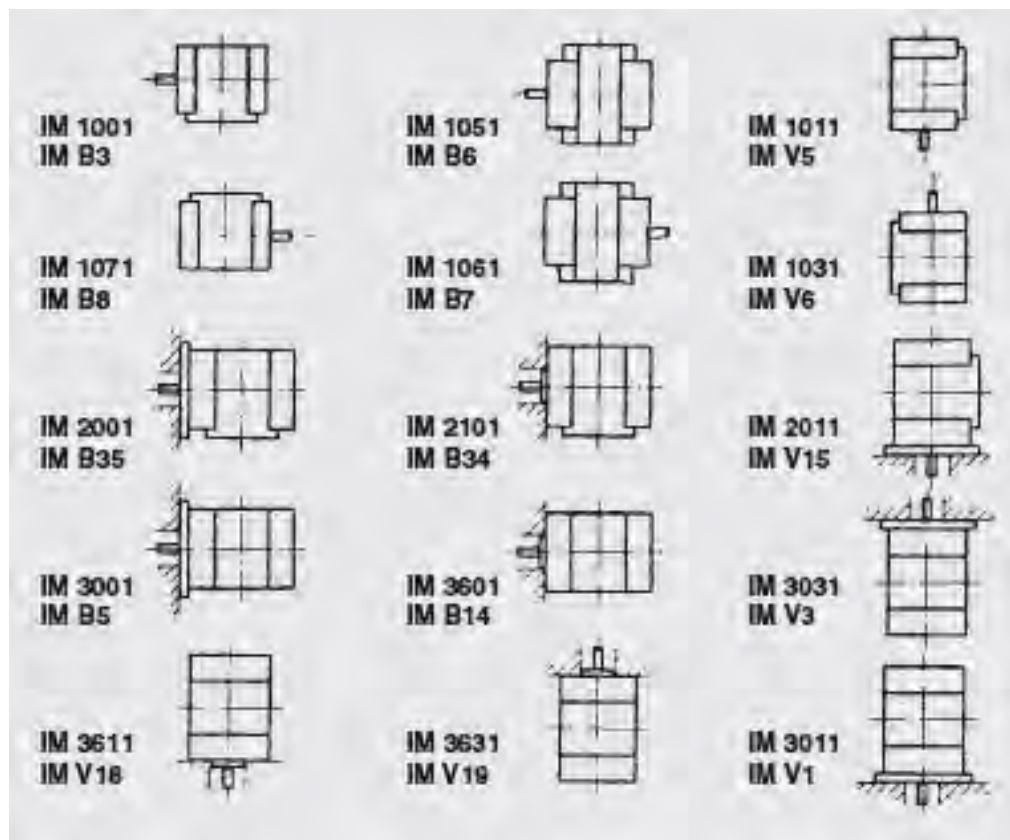


Tabelle 6.1 Aufstellungsarten umlaufender elektrischer Maschinen

1. Kennziffer	Berührungs- und Fremdkörperschutz Schutzzumfang	2. Kennziffer	Wasserschutz Schutzzumfang
0	Kein Berührungsschutz hinsichtlich unter Spannung stehender oder sich bewegender Teile	0	Kein Wasserschutz
		1	Schutz gegen senkrecht fallendes Tropfwasser
1	Schutz gegen zufällige großflächige Berührung mit der Hand, Fremdkörper $\varnothing > 50$ mm	2	Schutz gegen Tropfwasser aus senkrechter oder schräger Richtung bis 15° zur Senkrechten
2	Schutz gegen Berührung mit den Fingern, Fremdkörper $\varnothing > 12$ mm	3	Schutz gegen Sprühwasser aus beliebiger Richtung bis 60° zur Senkrechten
3	Schutz gegen Berührung mit Werkzeugen, Fremdkörper $\varnothing > 2,5$ mm	4	Schutz gegen Spritzwasser aus allen Richtungen
4	Schutz gegen Berührung mit Werkzeugen, Fremdkörper $\varnothing > 1$ mm	5	Schutz gegen Strahlwasser aus allen Richtungen
5	Vollständiger Schutz gegen Berühren mit Hilfsmitteln jeglicher Art, Staubschutz im Inneren	6	Schutz bei Überflutung
		7	Schutz beim Eintauchen, festgelegte Druck und Zeitbedingungen
6	Staubdichte Maschine	8	Schutz beim Untertauchen (dauernd)

Tabelle 6.2 IP-Schutzarten elektrischer Maschinen

Motorleistung P kW	Käfigläufer Direkteinschaltung ¹⁾		Stern-Dreieck-Schaltung ²⁾		Schleifringläufer ²⁾	
	Sicherung max. ³⁾ A	Zuleitung NYY mm ² Cu	Sicherung max. ³⁾ A	Zuleitung NYY mm ² Cu	Sicherung max. ³⁾ A	Zuleitung NYY mm ² Cu
0,12	4	1,5	—	—	—	—
0,18	4	1,5	—	—	—	—
0,25	6	1,5	—	—	—	—
0,37	6	1,5	—	—	—	—
0,55	10	1,5	—	—	—	—
0,75	10	1,5	—	—	—	—
1,1	16	1,5	—	—	—	—
1,5	20	1,5	—	—	—	—
2,2	25	1,5	16	1,5	—	—
3	35	2,5	20	1,5	—	—
4	50	4	25	1,5	—	—
5,5	63	6	35	2,5	—	—
7,5	80	10	50	4	50	4
11	100	16	63	6	80	10
15	125	25	100	16	100	16
18,5	160	35	125	25	125	25
22	160	35	125	25	125	25
30	224	70	160	35	160	35
37	224	95	160	35	200	50
45	224	120	224	70	224	70
55	—	—	250	70	355	120
75	—	—	300	95	500	240
90	—	—	355	120	500	240
110	—	—	500	240	600	300
132	—	—	600	300	600	300

¹⁾ Anlaufzeit ≤ 5 s, Anlaufstrom $\leq 6 \times I_N$, max. 3 Schaltungen/h.
²⁾ Anlaufzeit ≤ 15 s, Anlaufstrom $\leq 2 \times I_N$, max. 10 Schaltungen/h.
³⁾ Der Höchstwert der Sicherung ist durch den verwendeten Auslöser und den verwendeten Leiterquerschnitt begrenzt.

230 V

Tabelle 6.3 Dimensionierung des Motorschutzes für 230V

Motorleistung P kW	Käfigläufer Direkteinschaltung 1) Sicherung max. 3) A		Stern-Dreieck-Schaltung 2) Sicherung max. 3) A		Schleifringläufer 2) Sicherung max. 3) A	
	Zuleitung NYY mm ² Cu	Zuleitung NYY mm ² Cu	Zuleitung NYY mm ² Cu	Zuleitung NYY mm ² Cu	Zuleitung NYY mm ² Cu	Zuleitung NYY mm ² Cu
0,12	2	1,5	—	—	—	—
0,18	2	1,5	—	—	—	—
0,25	4	1,5	—	—	—	—
0,37	4	1,5	—	—	—	—
0,55	6	1,5	—	—	—	—
0,75	6	1,5	—	—	—	—
1,1	10	1,5	—	—	—	—
1,5	10	1,5	—	—	—	—
2,2	16	1,5	—	—	—	—
3	20	1,5	—	—	—	—
4	25	1,5	16	1,5	—	—
5,5	35	2,5	20	1,5	—	—
7,5	50	4	25	1,5	50	4
11	63	6	35	2,5	50	4
15	80	10	50	4	63	6
18,5	100	16	63	6	80	10
22	125	25	80	10	100	16
30	125	25	100	16	100	16
37	160	35	125	25	125	25
45	224	70	125	25	200	50
55	224	70	160	35	200	50
75	224	70	200	50	224	70
90	355	120	224	70	250	70
110	425	150	250	70	300	95
132	500	240	300	95	300	95

400 V

0,12	2	1,5	—	—	—	—
0,18	2	1,5	—	—	—	—
0,25	2	1,5	—	—	—	—
0,37	4	1,5	—	—	—	—
0,55	4	1,5	—	—	—	—
0,75	6	1,5	—	—	—	—
1,1	6	1,5	—	—	—	—
1,5	10	1,5	—	—	—	—
2,2	10	1,5	—	—	—	—
3	16	1,5	—	—	—	—
4	20	1,5	—	—	—	—
5,5	25	1,5	16	1,5	—	—
7,5	35	2,5	20	1,5	35	2,5
11	50	4	25	1,5	50	4
15	63	6	35	2,5	63	6
18,5	80	10	50	4	63	6
22	100	16	63	6	80	10
30	125	25	80	10	100	16
37	125	25	100	16	125	25
45	160	35	125	16	125	25
55	224	70	125	25	160	35
75	224	70	160	35	200	50
90	224	70	200	50	224	70
110	224	70	200	50	224	70
132	355	120	224	70	250	70

500 V

1) Anlaufzeit ≤ 5 s, Anlaufstrom $\leq 6 \times I_N$, max. 3 Schaltungen/h.
2) Anlaufzeit ≤ 15 s, Anlaufstrom $\leq 2 \times I_N$, max. 10 Schaltungen/h.
3) Der Höchstwert der Sicherung ist durch den verwendeten Auslöser und den verwendeten Leiterquerschnitt begrenzt

Tabelle 6.4 Dimensionierung des Motorschutzes für 400V und 500V

EN 50065-1 : 01.91 DIN EN 50065 Teil 1 : 07.93	Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3kHz bis 148,5kHz. Teil 1 : Allgemeine Anforderungen, Frequenzbänder und elektromagnetische Verträglichkeit
EN 50065-1 A1 : 12.92 DIN EN 50065-1 : 1992	Änderung A1 zu EN 50065-1: Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3kHz bis 148,5kHz.; Teil 1 : Allgemeine Anforderungen, Frequenzbänder und elektromagnetische Verträglichkeit
EN 50065-1 A2 : 1995 DIN EN 50065-2 : 1995	Änderung A2 zu EN 50065-1: Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3kHz bis 148,5kHz.; Teil 1 : Allgemeine Anforderungen, Frequenzbänder und elektromagnetische Verträglichkeit
EN 50065-1 A3 : 1996 DIN EN 50065-3 : 1996	Änderung A3 zu EN 50065-1: Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3kHz bis 148,5kHz.; Teil 1 : Allgemeine Anforderungen, Frequenzbänder und elektromagnetische Verträglichkeit
EN 50083-2 : 09.95 DIN EN 50083-2 : 04.96	Kabelverteilsysteme für Fernseh-, Ton- und interaktive Multimedia-Signale Teil 2: Elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten
EN 50083-2 A1 : 1997 DIN EN 50083-2 A1 : 1997	Änderung A1 zu EN 50083-2: Kabelverteilsysteme für Fernseh-, Ton- und interaktive Multimedia-Signale Teil 2: Elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten
EN 50090-2-2 : 11.96 DIN EN 50090-2 : 1997	Elektrische Systemtechnik für Heim und Gebäude (ESHG) - Teil 2-2 : Systemübersicht - Allgemeine technische Anforderungen
EN 50091-2 : 1995 DIN EN 50091-2 : 1995	Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV); Teil 2: EMV Anforderungen
EN 50199 : 12.95 DIN EN 50199 : 1996	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Produktnorm für Lichtbogenschweißeinrichtungen
EN 55014 : 1993 DIN EN 55014 : 1993	Funk-Entstörung von elektrischen Betriebsmitteln und Anlagen; Grenzwerte und Meßverfahren für Funkstörungen von Geräten mit elektromotorischem Antrieb und Elektrowärmegeräten für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke, Elektrowerkzeugen und ähnlichen Elektrogeräten (CISPR 14:1993)
EN 55104 : 1995 DIN EN 55104 : 1995	Elektromagnetische Verträglichkeit - Störfestigkeitsanforderungen für Haushaltgeräte, Werkzeuge und ähnliche Geräte - Produktfamilien-Norm

Tabelle 6.5 EMV-Richtlinien (Ausschnitt)

6.4 Massenträgheitsmomente der Antriebstechnik

Zur Berechnung des Beschleunigungsmomentes M_A von Antrieben ist das gesamte auf die Motorwelle bezogene Massenträgheitsmoment der beteiligten baulichen Komponenten erforderlich. Sind dabei Getriebe im Einsatz, geht die Getriebeübersetzung quadratisch in die Berechnung ein (siehe auch **Praktische Regeltechnik, Springer-Verlag, S.307-310**). Beispiel Riementrieb:

$$M_A = 2 \quad J_{\text{ges bez}} \quad \frac{n_{\text{Mot}}}{T_H} \quad (\text{siehe Seite 15})$$

mit

$$J_{\text{ges bez}} = J_{\text{Mot}} + J_{\text{MotwelleRad}} + \frac{J_{\text{Last}} + J_{\text{LastRad}}}{i^2} + m_{\text{Riemen}} r^2$$

mit $i = \text{großer Rollendurchmesser} / \text{kleiner Rollendurchmesser}$

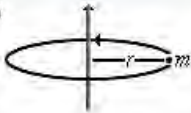
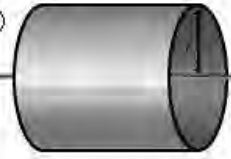

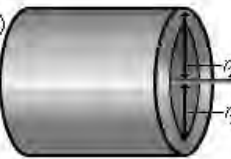
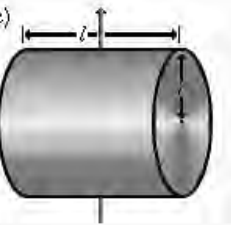
Abbildung	Beschreibung	Trägheitsmoment
a) 	Eine Punktmasse im Abstand r um eine Drehachse.	$J = m \cdot r^2$
b) 	Ein Zylindermantel, der um seine Symmetrieachse rotiert (z.B. für die Riemen von Riementrieben).	$J = m \cdot r^2$
c) 	Ein Vollzylinder, der um seine Symmetrieachse rotiert.	$J = \frac{1}{2} m \cdot r^2$
d) 	Ein Hohlzylinder, der um seine Körperachse rotiert. Schließt die vorgenannten Grenzfälle Zylindermantel und Vollzylinder mit ein (z.B. Abhaspel bei Walzwerken).	$J = \frac{1}{2} m \cdot (r_2^2 + r_1^2)$
e) 	Ein Vollzylinder, der um eine Achse rotiert, die senkrecht zur Symmetrieachse steht, und durch seinen Schwerpunkt geht.	$J = \frac{1}{4} m \cdot r^2 + \frac{1}{12} m \cdot l^2$

Tabelle 6.6 Typische Massenträgheitsmomente

7. Literaturhinweise

- [1] **Fachkunde Elektrotechnik.**
Europa-Lehrmittel-Verlag, Wuppertal.
- [2] Heumann, Stumpe.: Thyristoren, Eigenschaften und Anwendungen.
Teubner-Verlag, Stuttgart.
- [3] **Fischer: Elektrische Maschinen.**
Hanser-Verlag, München.
- [4] **Eckardt: Grundzüge der elektrischen Maschinen.**
Teubner-Verlag, Stuttgart.
- [5] Meyer: Elektrische Antriebstechnik Band 1 und 2.
Springer-Verlag, Heidelberg.
- [6] Kümmel: Elektrische Antriebetechnik, Theoretische Grundlagen und Aufgaben mit Lösungen (separates Buch).
Springer-Verlag, Heidelberg.
- [7] Schwarz, Zecha, Meyer: Industrierobotersteuerungen.
Hüthig-Verlag, Heidelberg.
- [8] Schönfeld, Habiger: Automatisierte Elektroantriebe.
Hüthig-Verlag, Heidelberg.
- [9] F&M (Feinwerktechnik und Meßtechnik),
92. Jahrgang, H.4, 1994, S.153-165.
- [10] Boy, Flachmann, Mai: Elektrische Maschinen und Steuerungstechnik.
Vogel-Verlag, Würzburg.
- [11] Rummich, E.: Elektirsche Schrittmotoren und -antriebe.
expert-Verlag, Renningen.
- [12] Stölting, H.-D., Kallenbach, E.: Handbuch Elektrische Kleinantriebe.
Hanser-Verlag, München.

8. Hersteller von Motoren, Getrieben, Steuerung

Von einigen der folgenden Firmen können Broschüren, Datenblätter und CD-ROMs im Raum C609 (Herrn Dipl.-Ing. Desch) ausgeliehen werden.

Alle Komponenten der Elektro-, Antriebs- und Steuerungstechnik

ABB - Mannheim, Dudenstr. 44 - 46, 68309 Mannheim
www.abb.de/automation bzw. www.abb-drives.de

Schrittmotoren, Klein- und Mikromotoren

Faulhaber, Postfach 1146, 71094 Schnaich
www.faulhaber.de

El. Antriebe und Steuerungskomponenten

Lenze GmbH, Postfach 101352, 31763 Hameln
www.lenze.com

Mittel- und Kleinantriebe

Lust-Antriebstechnik
Gewerbestr. 5-9, 35633 Lahnau-Waldgirmes
www.lust-tec.de

El. Kleinmotoren und Ansteuerelektronik

maxon motor gmbh, Wardeinstr. 3, 81825 München
www.maxonmotor.com

GS-Antriebe und Steuerelektronik

MATTKE GmbH, Leinenweberstr. 12, 79108 Freiburg
www.mattke.de

Getriebe, Servo- und Schrittmotoren

Harmonic Drive AG, Hoenberger Str. 14, 65555 Limburg
www.harmonicdrive.de

GS- und Wechselstrom-Kleinmotoren

Papst Motoren GmbH, Hermann-Papst-Str. 1, 78112 St. Georgen/Schwarzwald
www.papst.com

Antriebstechnik und Getriebe

SEW Eurodrive, Ernst-Blickle-Str. 42, 76646 Bruchsal
www.sew-eurodrive.de

Fachberatung Antriebstechnik

Siemens AG, Schwerinerstr. 1, 33605 Bielefeld
www.siemens.de

9. Übungsaufgaben Elektrische Antriebe

Übung 1

Für einen GS-Nebenschlußmotor sind das Nennmoment M_N , der magnetische Fluß Φ_{\max} und der Ankernennstrom I_{AN} zu berechnen.

geg.:

$$U_N = 850\text{V}$$

$$n_N = 390/\text{min}$$

$$P_N = 10\text{kW}$$

$$C_2 = 80$$

Übung 3

Ein fremderregter GS-Motor soll mit voller und halber Belastung an einer Maschine für die Papierverarbeitung betrieben werden (ohne Feldschwächung). Es soll die Vereinfachung erlaubt sein $I_{AN} R_A < U_q$.

geg.:

$$U_{AN} = 220\text{V}$$

$$R_A = 0,15$$

$$M_{L\text{voll}} = 72\text{ Nm}$$

$$n_o = 1450/\text{min}$$

ges.:

1. Es sind die zugehörigen Drehzahlen zu berechnen und mit dem Verlauf der Belastungs-Kennlinie zu vergleichen.
2. Tragen Sie einen stabilen Arbeitspunkt in die Belastungs-Kennlinie für die gegebene Arbeitsmaschine ein (siehe Abschnitt 1.4).

Übung 4

Für einen GS-Nebenschlußmotor, der als Vorschubantrieb einer Werkzeugmaschine arbeitet, sind die Hochlaufzeit T_H und die Ankerkreis-Zeitkonstante T_A zu ermitteln.

geg.:

$$U_q = 440\text{V}$$

$$I_{AN} = 30\text{A}$$

$$R_A = 0,2$$

$$L_A = 0,02 \text{ s}$$

$$M_L = 50 \text{ Nm}$$

$$n_L = n_N = n_o = 1300/\text{min} \text{ (kein Getriebe)}$$

$$J_{\text{ges}} = 0,35\text{kgm}^2 \text{ (bezogen auf die Motorwelle)}$$

Übung 5

Der Förderkorb einer Schachtförderanlage wird über ein Getriebe mit einem DS-Asynchronmotor betrieben.

Die Masse des Seiles beim Auf- und Abwickeln sei gegenüber der Masse der Seiltrommel vernachlässigbar, d.h. das Trägheitsmoment der Seiltrommel ist konstant.

Der Antrieb wird in allen vier Quadranten mit Hilfe eines Frequenzumrichters aus dem 400V-DS-Netz gesteuert.

geg.:

$$M_L = 1300 \text{ Nm}$$

$$i = 1,35$$

$$\eta_{\text{Getr}} = 0,85$$

$$D = 1,5 \text{ m}$$

$$v_L = 9,5 \text{ m/s}$$

$$T_H = 7 \text{ s}$$

$$dv_L/dt = v_L/T_H$$

$$J_{\text{ges}} = 100 \text{ kgm}^2 \quad (\text{bezogen auf die Motorwelle})$$

$$n_N = 180/\text{min} \quad (\text{für } p=16 \text{ ist dann } n_1 = 60f_1/p = 187,5 \text{ min}^{-1})$$

ges.:

1. Qualitativer Verlauf der Lastkennlinie des Schachtförderers (Abschnitt 1.4) und der Motor-Belastungskennlinie mit Angabe des Arbeitspunktes
2. Das Motormoment M_M einschließlich Anfahrbeschleunigung (siehe 1.3.1)
3. Die Motordrehzahl im Arbeitspunkt n_{Mot}
4. Die Motorleistung P_M im Arbeitspunkt und die zugehörige Nennleistung des passenden Normmotors (siehe Abschnitt 6.2)
5. Die Lastkennlinie sei nach rechts verschoben. Es ergeben sich zwei Schnittpunkte mit der Motorkennlinie. Welcher ist ein stabiler Arbeitspunkt?

Übung 6

Ein DS-Asynchronmotor soll für den Antrieb eines Werkstores eingesetzt werden. Die Übertragung der Bewegung erfolgt über Getriebe und Seilzug. Die Leistungsreserve des Motors soll 30% betragen. Das Tor schließt nach $t_B=10s$ Laufzeit.

geg.:

Reibungswiderstand des Tores (Zugkraft)

$$F_L = 650N$$

Masse des Tores und Seiles

$$m_{TS} = 1900kg$$

Massenträgheit von Getriebe+Rollen bezogen

$$J_{gesbez} = 0,025kgm^2$$

Geriebewirkungsgrad

$$\eta_G = 0,8$$

Getriebeuntersetzung

$$i = 15$$

Umlenkrollendurchmesser

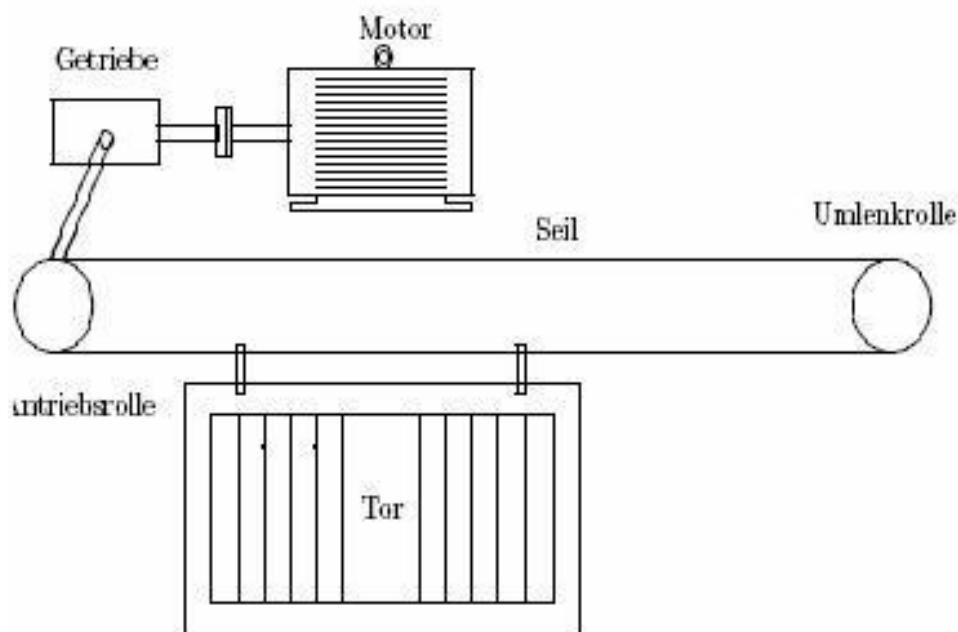
$$d = 0,203m$$

Verfahrgeschwindigkeit

$$v_T = 1m/s$$

Anfahrzeit (Hochlaufzeit)

$$T_H = 1s$$



ges.:

1. Last- und Motordrehzahl
2. Leistung eines passenden Normmotors an 400V Drehstrom
3. Zulässige Leistung bei Kurzzeitbetrieb ($T_E = 20s$, $P_k = 5kW$)
4. Schutzart für Schutz gegen Berührung und Spritzwasser

Übung 7

Ein Meßtisch zum Einrichten von Werkzeugen für eine CNC-Maschine soll mit einem Schrittmotor positioniert werden.

Für einen Winkelschritt ist eine Bewegungsauflösung von $l = 0,01\text{mm}$ gefordert. Der Meßtisch soll sich mit einer Verstellgeschwindigkeit von $v_T = 5\text{mm/s}$ bewegen.

geg.:

$$\alpha = 1,5^\circ \quad (\text{Schrittwinkel des Motors laut Datenblatt})$$

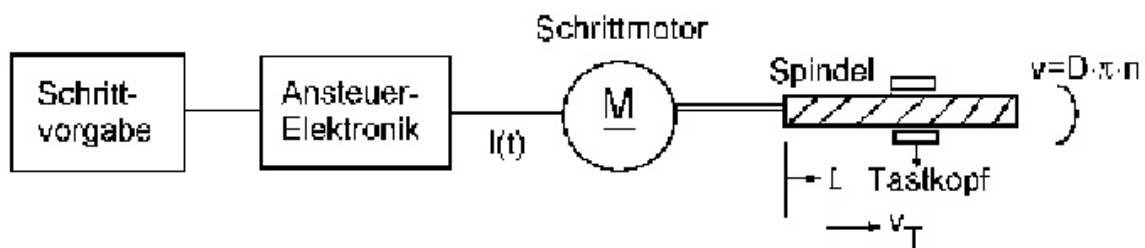
$$M_L = 0,15\text{Nm}$$

$$J_L + J_{\text{Mot}} = 19 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

$$T_H = 30\text{ms}$$

ges.:

1. Winkelschritte / Motorumdrehung p
2. Spindelsteigung
3. Maximale Betriebsfrequenz f_A
4. Motormoment M_M



Übung 8

Ein GS-Kleinmotor (DC-Motor genannt) für eine Etikettiermaschine wird im Dauerbetrieb mit dem Betriebsmoment $M_B=20\text{mNm}$ bei einem Betriebsstrom von $I_B=0,473\text{A}$ gefahren (siehe Seite 75).

Die Motordaten lauten:

geg.:

$U=24\text{V}$ (Anschlußgleichspannung)

$I_0=15,9\text{mA}$ (Leerlaufstrom)

$I_H=3,18\text{A}$ (Haltestrom im Stillstand, beim Haltemoment)

$R_A=7,55$ (Ankerspulenwiderstand)

$n_0=5210/\text{min}$ (Leerlaufdrehzahl)

ges.:

1. Drehmomentkonstante k_M
2. Reibungsmoment M_R und Haltemoment M_H
3. Ideelle Leerlaufdrehzahl n_i und Betriebsdrehzahl n_B
4. Abgegebene Leistung im Arbeitspunkt P_{2B}
5. Die errechneten Werte in die Belastungskennlinie eintragen

Übung 9

Für die rotatorische Kunststoffbeschichtung von CD-Rohlingen soll ein Riemenantrieb mit Bürstenlosem Gleichstrom-Kleinmotor von MAXON ausgelegt werden.

geg.:

$$U_{\text{Nenn}} = 48\text{V}$$

$$J_{\text{Mot}} = 0,0004\text{kgm}^2$$

$$J_1 = 0,00012\text{kgm}^2$$

$$J_L = 0,0036\text{kgm}^2$$

$$J_2 = 0,001\text{kgm}^2$$

$$d_1 = 0,0781\text{m}$$

$$d_2 = 0,15\text{m}$$

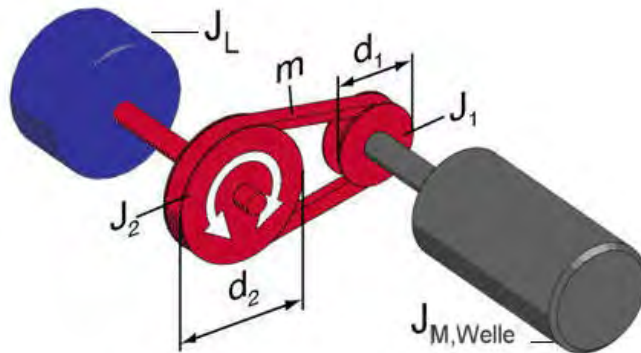
$$m_{\text{Riemen}} = 0,08\text{kg}$$

$$\mu_{\text{Riemen}} = 0,85$$

$$M_L = 0,54\text{Nm} \text{ Beharrungsmoment}$$

$$n_L = 16/\text{s} \text{ (960/min) Lastdrehzahl}$$

$$T_H = 4\text{s}$$



ges.:

1. Motordrehzahl

2. Motormoment

3. Motorleistung, gewählter Maxonmotor laut Datenblatt und laut Berechnung

10. Prüfungsfragen-Vorbereitung

1. Welche Kraft erfährt ein stromdurchflossener Leiter im homogenen Magnetfeld und wie lautet das Induktionsgesetz ?
2. Zeichnen und erläutern Sie die U_q - n -Kennlinie eines fremderregten GS-Motors.
3. Zeichnen Sie das el. Ersatzschaldbild eines fremderregten GS-Motors und leiten Sie die Ankerkreisgleichung ab.
4. Zeichnen und erläutern Sie die Belastungs-Kennlinie eines fremderregten GS-Motors.
5. Was heißt "stationärer Betrieb", was ist "Leerlauf" ?
6. Vergleichen Sie die Belastungs-Kennlinien von allen drei Standard-GS-Motoren miteinander.
7. Was versteht man unter 4-Quadranten-Betrieb ?
8. Wie wird ein fremderregter GS-Motor (einschl. Feldschwächung) hochgefahren ?
9. Nennen Sie Anlaß- und Steuer-Verfahren von GS-Antrieben.
10. Warum lassen sich der GS-NS- und GS-RS-Motor an Wechselspannung betreiben ?
11. Nennen und erläutern Sie Einsatzgebiete von GS-Motoren an Wechselspannung.
12. Nennen Sie Einsatzgebiete von Stromrichter gespeisten GS-Motoren ?
13. Vergleichen Sie den fremderr. GS- und -DS-Asynchronmotor bezüglich Aufbau und Funktion.
14. Vergleichen Sie den fremderr. GS- und DS-Asynchronmotor bei gleicher Leistung und qualitativ gleicher Belastungs-Charakteristik.
15. Zeichnen und erläutern Sie die M - n -Kennlinie eines DS-Asynchronmotors für Stern- und Dreieck-Schaltung.
16. Wie funktioniert ein Bremsmotor und wo wird er eingesetzt ?

17. Zeichnen und erläutern Sie die Belastungs-Kennlinie eines DS-Asynchronmotors.
18. Vergleichen Sie die Belastungs-Kennlinien des DS-Asynchronmotors bei Frequenz- und Polzahländerung.
19. Nennen Sie die Hauptanwendungsgebiete der DS-Motoren mit DS-Steller, Direktumrichter, und Frequenzumrichter.
20. Wo wird der Spaltemotor verwendet und welche Belastungs-Charakteristik hat er ?
21. Erklären Sie Aufbau, Funktion, Belastungskennlinie und Vorteile des Servomotors und geben Anwendungsgebiete an.
22. Wie funktioniert ein Scheibenläufermotor, welche Belastungs-Charakteristik hat er und wo wird er eingesetzt?
23. Wie funktioniert ein Schrittmotor, wie sieht die Belastungskennlinie aus und wo wird er eingesetzt ?
24. Wie läßt sich konstruktiv und schaltungstechnisch bei einem Schrittmotor die Schrittzahl/Umdrehung erhöhen ?
25. Wie ist ein Glockenankermotor aufgebaut, wie funktioniert er, welche Belastungskennlinie hat er und wo wird er eingesetzt ?
26. Was versteht man unter Kurzzeit- und Aussetz-Betrieb (Beispiel) ?
27. Sci finem fidus radicibus?

Ich wünsche Ihnen viel Glück.