

Frequenzgeregelter Drehstromantriebe

1 Grundlagen drehzahlvariabler Antriebe

Drehzahlvariable Antriebe (Abb. 1-1) mit Frequenzumrichtern sind nicht nur in der Industrie, sondern auch in der Gebäudetechnik weit verbreitet. Mit modernen Frequenzumrichtern können nahezu alle Antriebsaufgaben durchgeführt werden, wofür früher geregelte Gleichstromantriebe erforderlich waren.

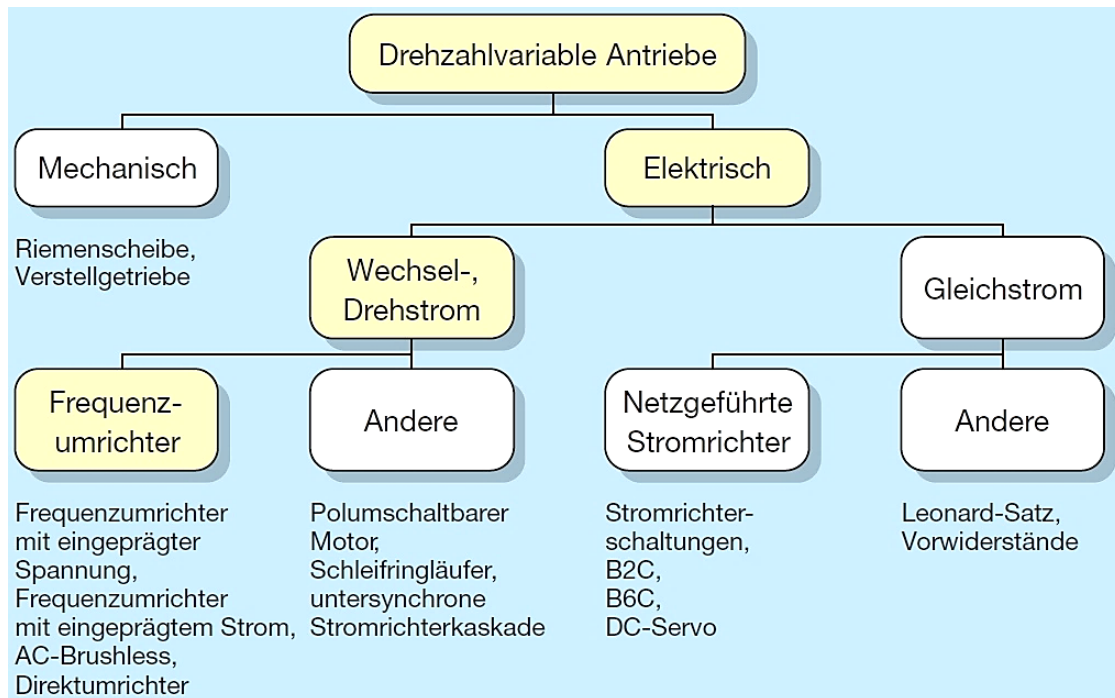


Abb. 1-1
Drehzahlvariable Antriebe¹

1.1 Direktumrichter

Direktumrichter wandeln die Netzspannung ohne Zwischenkreis in die benötigte Ausgangsspannung um. Sie kommen normalerweise nur in Hochleistungsanwendungen im Megawatt-Bereich zum Einsatz. So werden z.B. Tiegelöfen in Eisengiessereien mit Direktumrichtern im Mittelfrequenzbereich betrieben. Der Strom in der Induktionsspule eines Tiegels kann mehrere tausend Ampere betragen. Als elektronische Ventile werden wassergekühlte GTO-Thyristoren eingesetzt. Auf der Netzseite ist meist ein Transformator vorgesehen, der die Hochspannung (16 kV) in Niederspannung umwandelt.

1.2 Zwischenkreisumrichter

Zwischenkreisumrichter (Abb. 1-2) gehören zu den häufigsten Ausführungsformen. Wir unterscheiden *Spannungszwischenkreisumrichter* (U-Umrichter) mit Kondensatoren im Zwischenkreis und *Stromzwischenkreisumrichter* (I-Umrichter) mit Induktivitäten und eingepprägtem Strom. Kondensatoren als auch Spulen dienen als Energiespeicher.

¹ Die Bibliothek der Technik – Frequenzumrichter (Verlag Moderne Industrie).

1.2.1 Stromzwischenkreisumrichter

Stromzwischenkreisumrichter (Current Source Inverter) werden bei mittleren und grösseren Leistungen eingesetzt. Sie lassen sich gliedern in:

- Stromzwischenkreisumrichter mit selbstgeführtem Wechselrichter
- Stromzwischenkreisumrichter mit maschinengeführtem Wechselrichter

Für unsere Betrachtungen spielen I-Umrichter so gut wie keine Rolle.

1.2.2 Spannungszwischenkreisumrichter

Spannungszwischenkreisumrichter lassen sich einteilen in:

- Spannungszwischenkreisumrichter mit variabler Zwischenkreisspannung
- Spannungszwischenkreisumrichter mit konstanter Zwischenkreisspannung

► U-Umrichter mit variabler Zwischenkreisspannung bestehen aus einem netzgeführten Stromrichter und zwei DC-Stufen. Es gibt auch noch andere Schaltungsvarianten. Der Stromrichter liefert eine konstante Spannung für den ersten Zwischenkreis. Ein Gleichstromsteller erzeugt daraus eine veränderliche Spannung für den zweiten Zwischenkreis. Der maschinenseitige Wechselrichter generiert schliesslich eine frequenzvariable blockförmige Ausgangsspannung. Die Bedeutung solcher Umrichter ist nur noch gering.

► U-Umrichter mit fester Zwischenkreisspannung (Abb. 1-3) besitzen einen ungesteuerten Eingangsstromrichter für die konstante Zwischenkreisspannung. Der Zwischenkreis wird auch als «DC-Bus» bezeichnet. Der maschinenseitige Wechselrichter erzeugt daraus eine Spannung mit variabler Frequenz. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, die Hüllkurve der pulsweitenmodulierten Ausgangsspannung durch unterschiedliche Pulsbreiten und Pulspausen der Sinusform anzunähern.



Abb. 1-2

Frequenzumrichter Sinamics V20

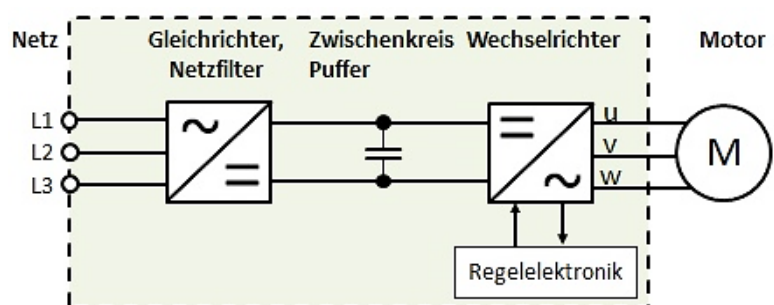


Abb. 1-3

Prinzipschema eines Frequenzumrichters mit Spannungszwischenkreis

Wir befassen uns anschliessend mit U-Umrichtern mit konstanter Zwischenkreisspannung zum Betrieb dreiphasiger Asynchron- und Synchronmotoren.

2 Wirkungsweise eines Frequenzumrichters

Die ersten Frequenzumrichter waren nur für einfache Drehzahlsteuerungen geeignet. Mit der Zeit nahm die Komplexität der Funktionen zu, so dass heute eine Vielzahl von Anforderungen erfüllbar ist (Abb. 2-1). Lediglich für hochdynamische Achsantriebe werden speziell dafür konstruierte Servoregler verwendet. Einige Hersteller wie Siemens oder Beckhoff bieten Gesamtpakete für den CNC-Sektor an.

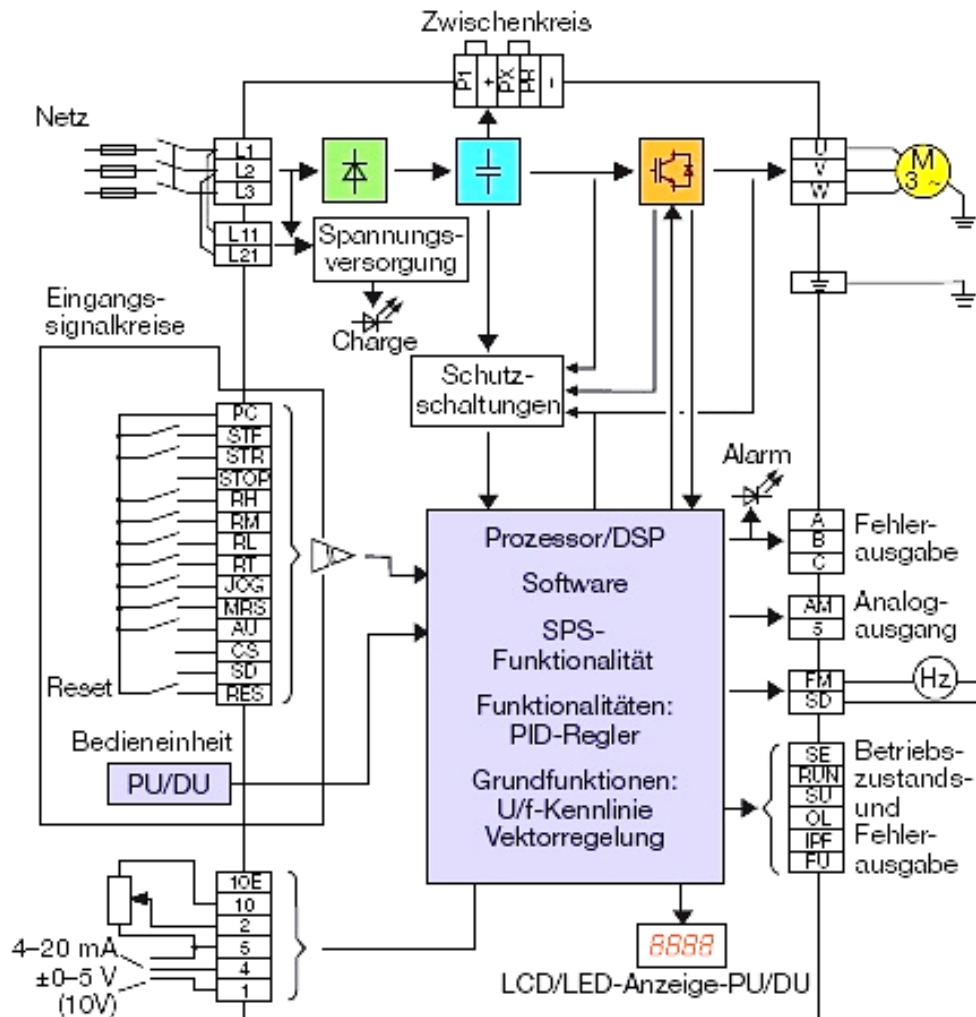


Abb. 2-1
Digitaler Frequenzumrichter²

Ausser der einfacheren U/f-Kennliniensteuerung kann bei gewissen Modellen auf Vektorregelung umgeschaltet werden. Damit sind auch dynamische Drehzahlregelungen beherrschbar. Zur Berechnung der Pulsmuster enthalten moderne Frequenzumrichter digitale Signalprozessoren. Bei einigen Ausführungen sind SPS-Modalitäten bereits integriert, wodurch die übergeordnete Steuerung von antriebspezifischen Routinen entlastet wird. Dazu kommen Busanbindungen und Bedienerschnittstellen. Ein PID-Regler ermöglicht dem Anwender die Bewältigung anspruchsvoller Regelungsaufgaben. Regeleinrichtungen mit einer kaskadenförmigen Reglerstruktur bestehen prinzipiell aus einem Lageregler, einem Drehzahlregler und einem

² Bibliothek des Technikers – Frequenzumrichter (Verlag Moderne Industrie).

Stromregler (Abb. 2-2). Frequenzumrichter mit einer digitalen Zustandsregelung erfordern aufwendige Regelalgorithmen.

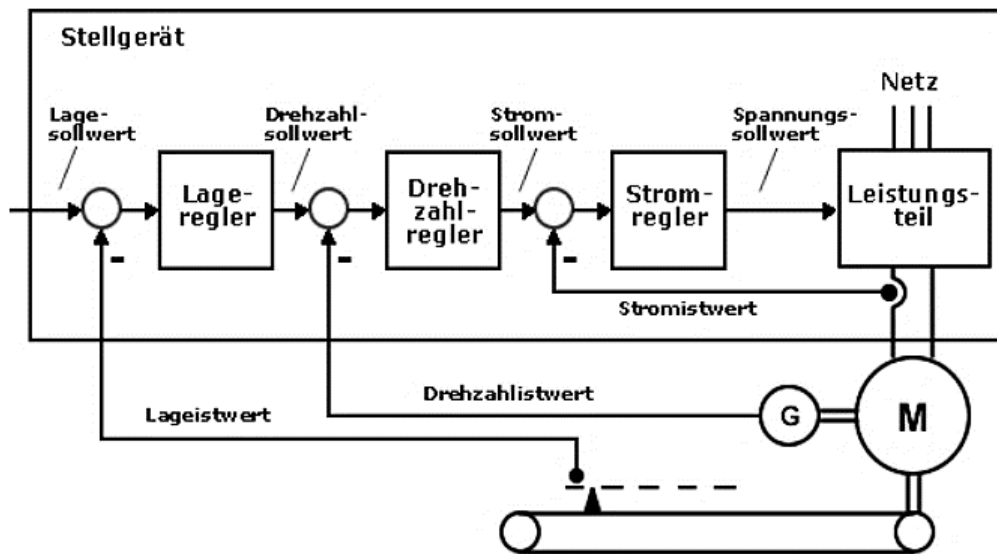


Abb. 2-2

Kaskadierte Reglerstruktur eines elektrischen Antriebes³

Ein vielfach angewandtes Verfahren zur Berechnung der Pulsmuster bedient sich der *Raumzeigermodulation* dreiphasiger elektrischer oder magnetischer Grössen.⁴ Prinzipiell lassen sich drei linear abhängige Grössen durch zwei linear unabhängige Grössen darstellen. Letztere können auch als Real- und Imaginärteil einer komplexen Grösse verstanden werden. Die rechnerische Behandlung eines Problems vereinfacht sich dadurch erheblich.

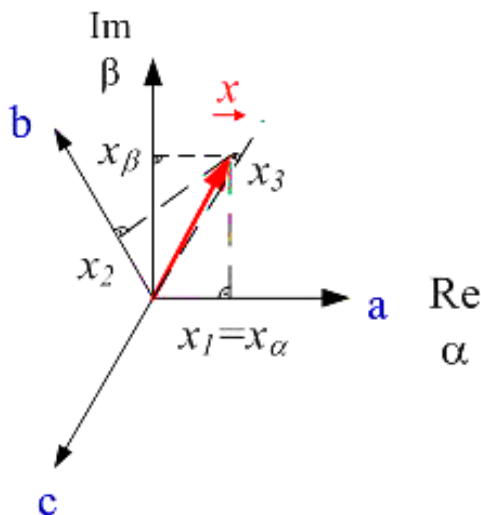


Abb. 2-3a

Raumzeiger in ruhenden Koordinaten

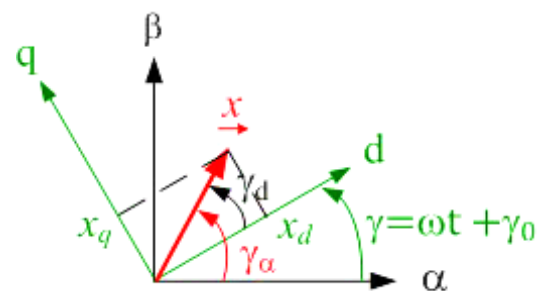


Abb. 2-3b

Raumzeiger in rotierenden Koordinaten

³ Bildquelle: <http://www.servotechnik.de>

⁴ Zur mathematischen Beschreibung von Drehstromsystemen entwickelte K.P. Kovács (1959) die Raumzeigertheorie. Diese wird auch für die Modellierung der Regelung von Drehfeldmaschinen angewandt. Unabhängig von Kovács entwickelte Jaroslav Stepina eine umfassende Beschreibung der elektromagnetischen Vorgänge in rotierenden elektrischen Maschinen. Stepina gilt für einige als der eigentliche "Vater der Raumzeigertheorie".

Im Kontext werden die symmetrischen Phasenströme I_u , I_v , I_w auf ein orthogonales Koordinatensystem mit den Koordinaten α , β abgebildet. Dieses Verfahren eignet sich insbesondere dann, wenn ein Nullsystem existiert (die Summe der Polleiterströme ist zu jedem Zeitpunkt Null). Das zweiphasige Orthogonalsystem lässt sich als komplexe Zahl interpretieren, welche als *Raumzeiger* bezeichnet wird. Realteil und Imaginärteil der komplexen Zahl entsprechen den Komponenten der als Zeiger dargestellten Grösse in der komplexen Ebene.

$$\tilde{x}(t) = x_\alpha(t) + jx_\beta(t)$$

Raumzeiger können in einem ruhenden (statorfesten) Koordinatensystem mit den Koordinaten α , β (Abb. 2-3a) oder in einem rotierenden (rotorfesten) Koordinatensystem mit den Koordinaten d , q (Abb. 2-3b) dargestellt werden. Die d,q -Koordinaten rotieren synchron mit dem Rotor der angetriebenen Maschine (Winkelgeschwindigkeit und Phasenlage stimmen überein). Im ersten Fall spricht der Elektrotechniker von *Clarke-Transformation*, im zweiten Fall von *Park-Transformation*. In vielen Anwendungsfällen lässt sich der Rechenaufwand reduzieren, wenn die Raumzeiger in rotierenden Koordinatensystemen dargestellt werden.⁵

2.1 Grundfunktionen

Die Netzwechselspannung (400/230 V) wird durch einen Brückengleichrichter (B6) in Gleichspannung umgewandelt, die in einem Zwischenkreis gespeichert wird. Weil die Kommutierung durch das Netz vorgegeben ist, spricht man von einem netzgeführten Gleichrichter.

Um Netzurückwirkungen zu reduzieren, wird bei Low-Cost-Frequenzumrichter der Zwischenkreis mit kleineren Kondensatoren als sonst üblich ausgestattet. Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass Störungen im höheren Frequenzspektrum zunehmen. Zu beachten ist auch, dass Netzeinbrüche und Spannungsschwankungen weniger gut aufgefangen werden. Eine andere Möglichkeit zur Reduktion von Netzurückwirkungen besteht im Einbau einer Gleichstromdrossel im Zwischenkreis.

Die Erzeugung der Ausgangsspannung mit variabler Frequenz (typisch 0.1 Hz bis 100 Hz) erfolgt durch Leistungshalbleiter (Transistoren, Thyristoren, IGBT's). Bei Frequenzumrichtern mit "schlankem Zwischenkreis" erreicht die Ausgangsspannung aufgrund der geringeren Glättung nur noch 90 % der Netzspannung. Als Folge davon nimmt ein Drehstrommotor bei Nennlast einen höheren Strom auf, was zu einer zusätzlichen Erwärmung beiträgt. Für dynamische Anwendungen sind Low-Cost-Geräte nicht geeignet.

Weil der Motorstrom bei Frequenzumrichtern, die nach dem Prinzip der *Pulsweitenmodulation* (PWM) arbeiten kein Sinusstrom ist (Abb. 2-4), sind Oberwellen (sog. Harmonische) unvermeidbar. Ein alternatives Modulationsverfahren wird als *Pulsamplitudenmodulation* (PAM) bezeichnet (Abb. 2-5). Wir befassen uns im Rahmen dieses Artikels nur mit PWM-Umrichtern.

Der Motorstrom besteht aus der Grundschiwingung, welche das eigentliche Drehfeld erzeugt, sowie höheren Frequenzanteilen, die durch die Taktfrequenz und die geschalteten Spannungspulse entstehen und sich der Grundschiwingung überlagern. Man bezeichnet diese höheren Frequenzanteile als "taktfrequenten Rippelstrom". Dieser Rippelstrom führt zu einer Zunahme der Betriebstemperatur des Motors durch Streuverluste. Der Einsatz geeigneter Motorfilter reduziert den unerwünschten Oberwellenanteil des Rippelstromes und erhöht dadurch die Lebenserwartung der Motoren.

Bei Sinusumrichtern entfallen die obigen Nachteile, was sich allerdings im Preis bemerkbar

⁵ J. Teigelkötter: Energieeffiziente elektrische Antriebe (Springer Vieweg).

macht. Sinusumrichter – Nomen est omen – liefern am Ausgang eine sinusförmige Spannung, so dass externe Filter entbehrlich sind und Motorkabel ohne Schirm verwendet werden können.

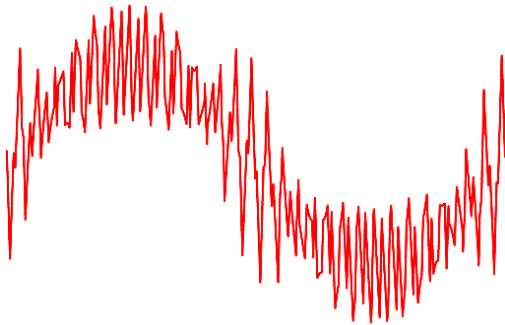


Abb. 2-4

Stromverlauf beim PWM-Verfahren

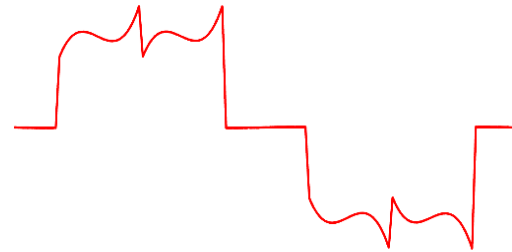


Abb. 2-5

Stromverlauf beim PAM-Verfahren

Bekanntlich nimmt der Oberwellengehalt eines zeitperiodischen Signals mit der Steilheit der Anstiegsflanken zu. Rechteckförmige Impulse bspw. setzen sich aus einer unendlichen Summe von sinusförmigen Schwingungen mit ungeradzahligem Vielfachen der Grundfrequenz zusammen. Alle Frequenzumrichter erzeugen aufgrund ihrer Wirkungsweise ein starkes Oberwellenspektrum.

2.2 Erweiterte Funktionen

Um Motoren schnell abzubremsen, werden *Bremschopper* eingesetzt. Überschreitet die Zwischenkreisspannung einen bestimmten Schwellwert, so schaltet der Chopper einen ohmschen Widerstand auf den DC-Bus. Der generatorisch anfallende Leistungsüberschuss wird im Bremswiderstand vernichtet. Physikalisch gesehen wird die elektrische Energie in Wärme umgewandelt.

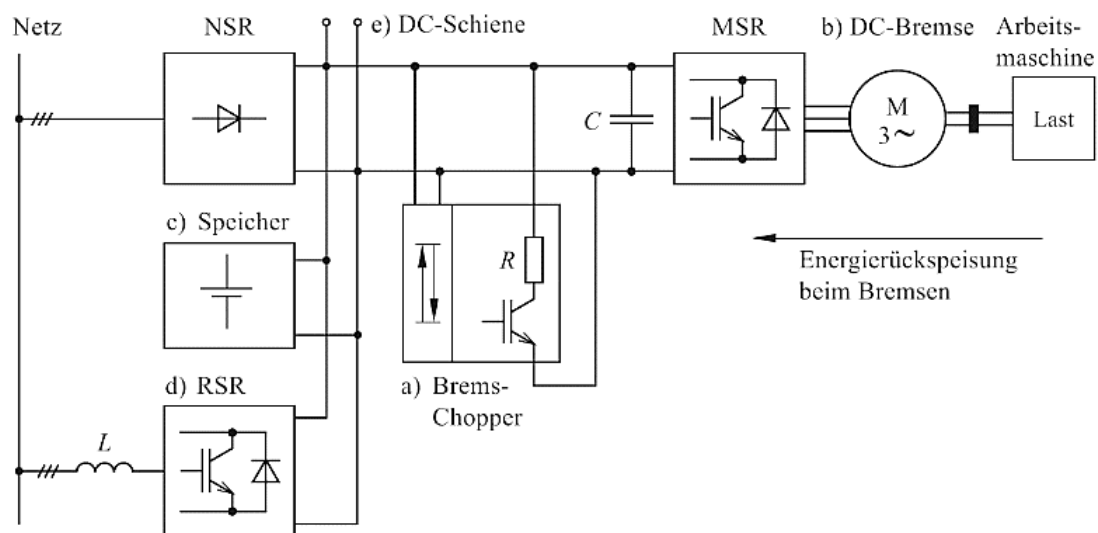


Abb. 2-6

Frequenzumrichter für den Vier-Quadranten-Betrieb⁶

NSR = Netzstromrichter
MSR = Maschinenstromrichter
RSR = Rückspeisestromrichter

⁶ G. Flegel, K. Birnstiel, W. Nerreter: Elektotechnik für Maschinenbau und Mechatronik (Hanser).

Frequenzumrichter im Vierquadrantenbetrieb (Abb. 2-6) beschleunigen und bremsen Antriebe kontrolliert in beiden Drehrichtungen. Beim Bremsen kann die freigesetzte Energie über einen Wechselrichter ins Netz eingespeisen werden. Der Elektrofachmann spricht von Rekuperation.

Lange Zeit konnten Werkzeugspindeln für NC-Maschinen⁷, die in vier Quadranten betrieben wurden, nur mit reversierbaren Gleichstrommotoren angetrieben werden. Anfänglich wurden Einrichtungen, bei denen es auf eine hohe Regelgenauigkeit ankam, mit Ward-Leonard-Umformern realisiert. Später kamen Thyristorsteller und schliesslich Frequenzumrichter zum Einsatz. In vergleichbarem Sinne war die Antriebsregelung für Papiermaschinen (mit einer Regelgenauigkeit im Promillebereich) nur mit synchronisierten Gleichstromantrieben möglich. Heute ist der erforderliche Gleichlauf auch mit frequenzgeregelten Drehstrommotoren möglich. In der Papierindustrie beliebt sind die Frequenzumrichter von Reliance (inzwischen zum Rockwell-Konzern gehörend).

3 Antriebstechnologien

3.1 Drehzahlregelung

Abhängig von den Anforderungen existieren unterschiedliche Regelungsarten für Frequenzumrichter.

Für den Betrieb von Asynchronmotoren bieten sich folgende Verfahren an:

- U/f-Kennliniensteuerung (Variable-frequency drive)
- Flussvektorregelung (Flux Vector Control)
- Sensorlose Vektorregelung (Sensorless Vector Control)

3.1.1 U/f-Kennliniensteuerung

Frequenzumrichter mit U/f-Kennliniensteuerung verändern Amplitude und Frequenz der Ausgangsspannung. Bis zur sog. *Eckfrequenz* verläuft die Veränderung proportional, danach kann nur noch die Frequenz erhöht werden. Der Umrichter arbeitet dann im Feldschwächebetrieb (Abb. 3-1).

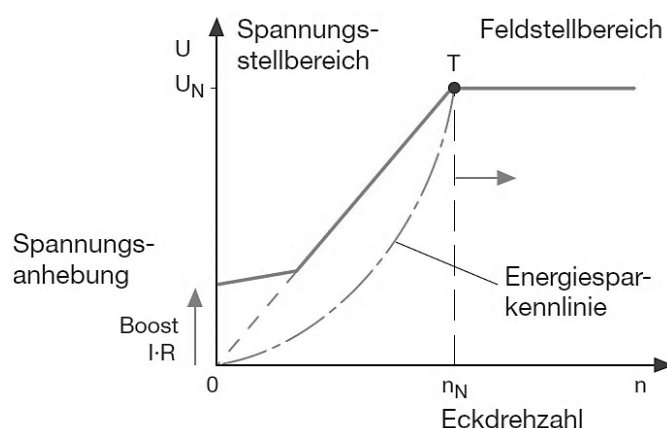


Abb. 3-1
U/f-Kennlinie⁸

⁷ NC = Numerical Control, programmgesteuerte Werkzeugmaschine. In den 1980er Jahren abgelöst durch CNC-Maschinen mit integriertem Rechner und Programmspeicher.

⁸ Frequenzumrichter - Die Bibliothek der Technik, Bd. 36 (Verlag Moderne Industrie).

Als problematisch erweist sich zuweilen das geringe Drehmoment beim Anfahren des Antriebes; damit der Motor nicht blockiert, muss das Antriebsmoment grösser als das Losbrechmoment sein. Aus diesem Grunde wird beim Hochfahren ein "Spannungsboost" erzeugt. Nach Erreichen der maximalen Spannung ist eine Drehzahlerhöhung nur noch im Feldschwächebetrieb möglich. Muss auch bei niedrigen Drehzahlen ein hohes Moment geliefert werden, gelangt diese Methode an ihre Grenzen.

Für weichere Übergänge beim Hochfahren des Antriebes sorgt die S-Rampe (Abb. 3-2). Dieses Rampenprofil ist z.B. bei Aufzügen aus nachvollziehbaren Gründen erwünscht.

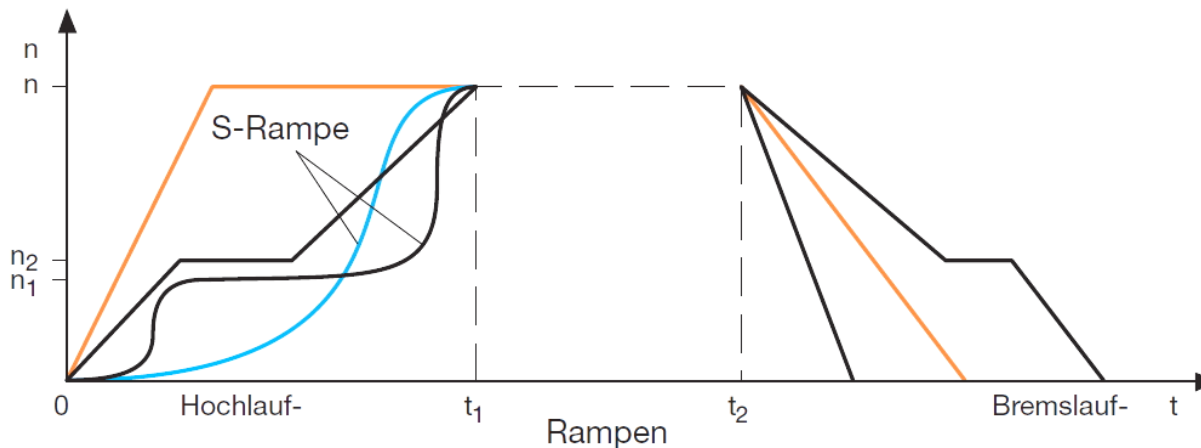


Abb. 3-2
Hochlauf- und Bremsrampen⁹

Eine Besonderheit ist der Umrichterbetrieb mit 87 Hz. Wird ein Drehstrommotor für 400 V Δ mit einer Spannung von 230 V und einer Frequenz von 50 Hz betrieben, so lässt sich die Drehzahl bei unverminderter Leistung steigern, wenn der Motor mit seiner Nennspannung von 400 V $= \sqrt{3} \cdot 230$ V und einer dazu proportionalen Frequenz von 87 Hz $= \sqrt{3} \cdot 50$ Hz betrieben wird.

Für bestimmte Anwendungen kann der Umrichter an die Last angepasst werden. Prinzipiell gibt es drei unterschiedliche Lastkurven: Solche mit konstantem, mit linearem und mit quadratischem Lastmoment (Abb. 3-3).

- a) Typische Anwendungen mit konstantem Lastmoment sind Krane, Aufzüge und Förderer. Das Lastmoment verändert sich über den gesamten Drehzahlbereich nur geringfügig. Die Leistung nimmt proportional mit der Drehzahl zu. Es muss berücksichtigt werden, dass das Anfahrmoment grösser als das Losbrechmoment sein muss. Ist dies nicht der Fall, bleibt der Antrieb stehen.
- b) Anwendungen mit linearem Lastmoment finden sich bei Papiermaschinen und Kalandern, wenn eine geschwindigkeitsproportionale Reibung vorhanden ist.
- c) Typische Anwendungen mit einer nichtlinearen Kennlinie sind Lüfter und Pumpen. Das Lastmoment nimmt quadratisch mit der Drehzahl zu. Die Leistung steigt proportional zur dritten Potenz der Drehzahl.
- d) Es gibt auch Antriebe mit fallender Lastkennlinie. Das ist bei Wickelmaschinen der Fall, aber auch bei Plandrehmaschinen, wo Schnittkraft und Schnittgeschwindigkeit für ein optimales Ergebnis konstante, vom Werkstoff abhängige Werte haben sollen.

⁹ Ebenda.

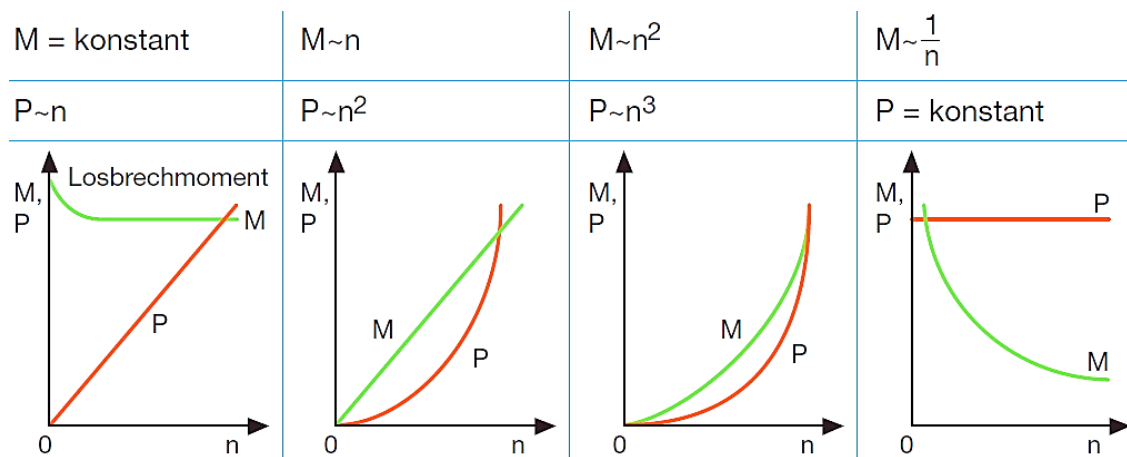


Abb. 3-3

Lastmoment-Kennlinien¹⁰

Für drehzahlgenaue Anwendungen ist eine Drehzahlrückführung sinnvoll, ansonsten wird darauf verzichtet (Abb. 3-4).

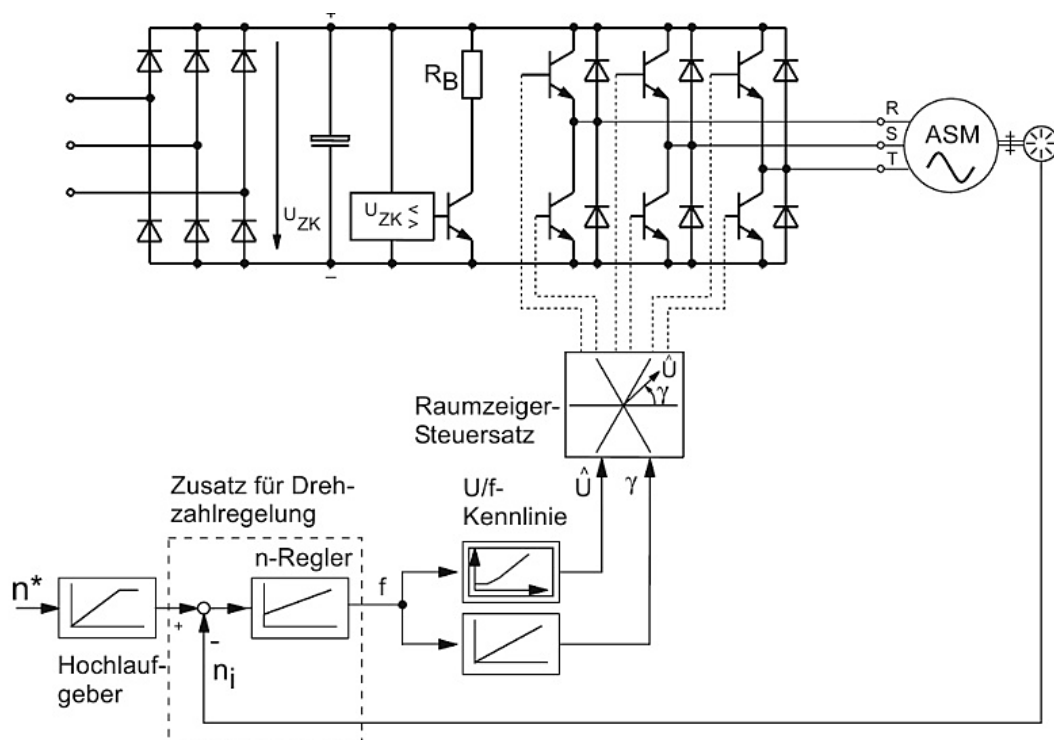


Abb. 3-4

Umrichter mit U/f-Kennliniensteuerung¹¹

3.1.2 Vektorregelung

a) Bei der *Spannungsvektorregelung* (Voltage Vector Control) werden Amplitude und Frequenz des Spannungsvektors in Abhängigkeit von Schlupf und Laststrom gesteuert. Die

¹⁰ Ebenda.

¹¹ H-J. Gevatter, U. Grünhaupt: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion (Springer VDI).

Vorteile dieser Methode äussern sich in einer unverminderten Ausgangsspannung und einem sinusförmigen Strom.

b) Die *Feldorientierte Regelung* (Abb. 3-5) – auch als *Flussvektorregelung* bezeichnet – ist dort von Vorteil, wo hohe Drehmomentschwankungen vorkommen oder wo ein hohes Anzugsmoment benötigt wird. Solches ist zum Beispiel bei Hubwerken, Pressen und Wickelmaschinen der Fall. Für eine hohe Drehzahlkonstanz über den gesamten Bereich und ein schnelles Ausregeln von Drehzahlschwankungen wird ein Geber benötigt.

Die Flussvektorregelung ermöglicht den Betrieb an der Stromgrenze, weite Drehzahlstellbereiche und hohe Drehzahlgenauigkeiten. Selbst eine Momentenregelung bei Drehzahl Null (z.B. für Spindelantriebe) ist möglich.

Weil sich das Drehmoment einer elektrischen Antriebsmaschine proportional zu Strom und Fluss verhält, wird ein schnelles Anregelverhalten dadurch erzielt, dass der Fluss konstant gehalten und lediglich der Strom verändert wird. Dazu wird der Ständerstrom nach einem mathematischen Modell in eine strombildende und eine flussbildende Komponente zerlegt, welche getrennt geregelt werden.

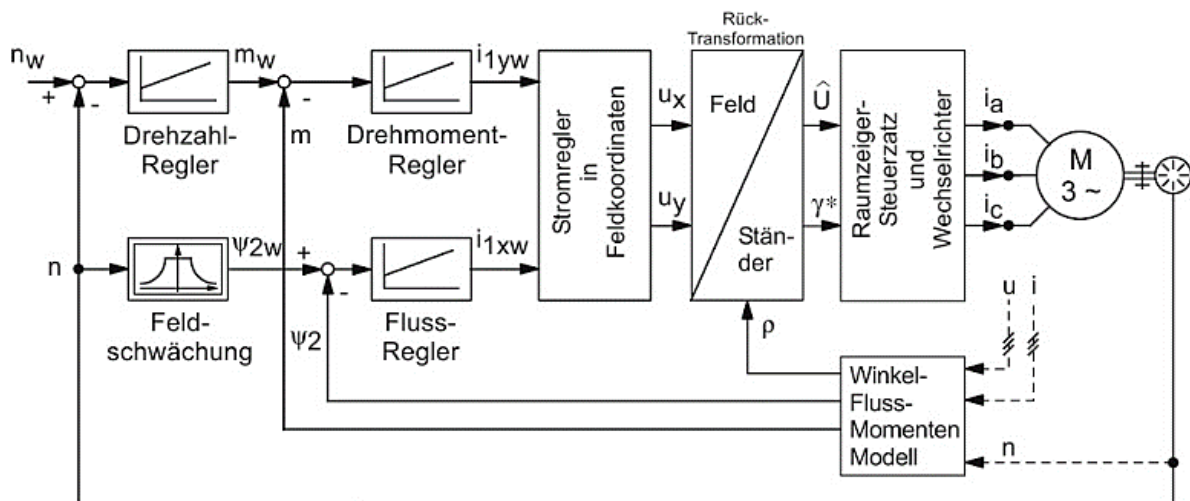


Abb. 3-5

Feldorientierte Regelung eines Asynchronmotors¹²

► Sind Anregelzeiten von 100 ms unproblematisch, kann auf einen geschlossenen Regelkreis verzichtet werden (Abb. 3-6). Mit der *Sensorlosen Vektorregelung* lassen sich auch anspruchsvolle Antriebsaufgaben auf einfache Weise realisieren.

Frequenzumrichter für geberlose Anwendungen erfordern einen hohen Rechenaufwand. Mit moderner Mikrocomputertechnik lassen sich solche Vorgaben realisieren. Aufgrund der Bewältigung immer komplexerer Regelalgorithmen und gleichzeitigem Verzicht auf eine periphere Istwerterfassung sind geberlose Vektorantriebe am Zunehmen.

Die Beschreibung moderner Regelkonzepte in der Antriebstechnik übersteigt den Rahmen dieses Artikels und muss in der Fachliteratur nachgelesen werden.

¹² Ebenda.

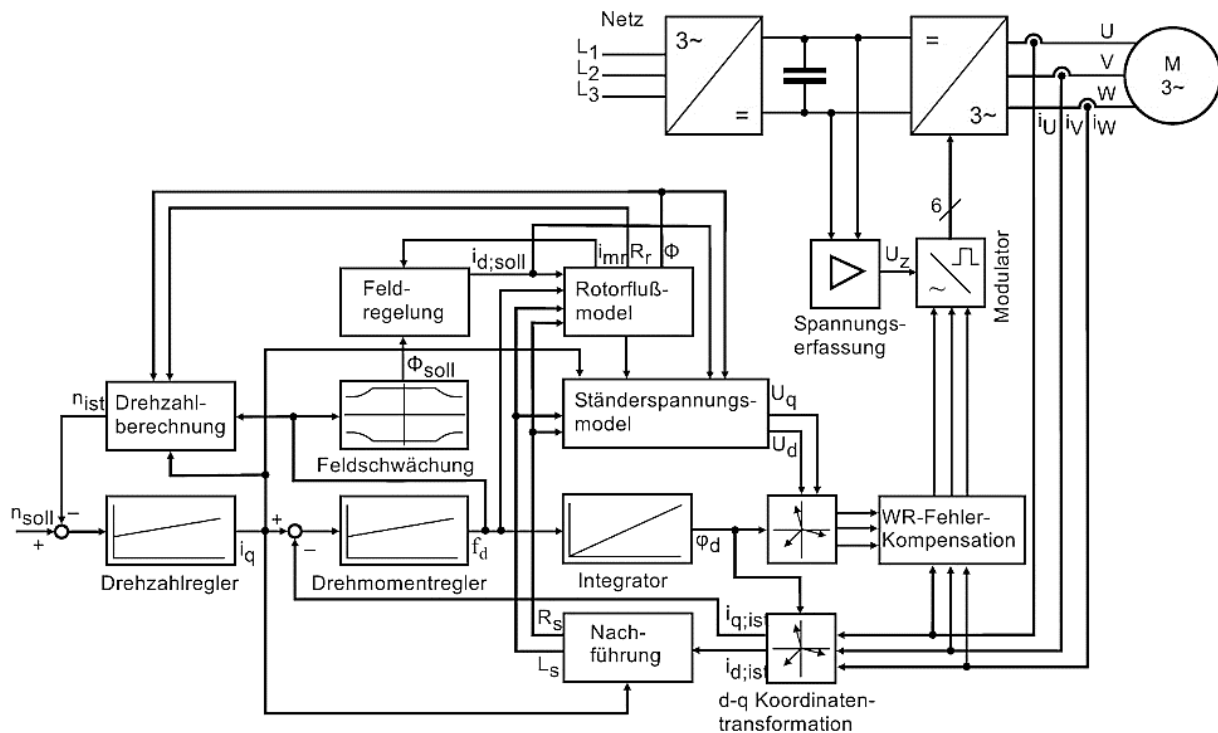


Abb. 3-6

Sensorlose Regelung eines Asynchronmotors¹³

3.2 Leistungshalbleiter

Fortschrittliche Antriebskonzepte wären ohne den Beitrag der Leistungselektronik nicht möglich. Für Frequenzumrichter kommen prinzipiell drei unterschiedliche Bauelemente in Betracht, nämlich Leistungstransistoren, Thyristoren und IGBT-Bausteine (Abb. 3-7).

1) Bei den Leistungstransistoren finden wir zwei Grundtypen:

Bipolare Transistoren (BJT¹⁴) und Unipolare Transistoren (FET¹⁵).

1a) Bei den bipolaren Transistoren ist es der Darlington-Transistor, der als Leistungstristor Verwendung findet.

1b) Bei den unipolaren Transistoren hat sich der Power-MOSFET durchgesetzt. Im Unterschied zum anfänglichen Feldeffekttransistor besitzt der MOSFET ein isoliertes Gate; damit ist eine leistungslose Steuerung wie bei der Elektronenröhre möglich. Eine Weiterentwicklung des MOSFET ist der VMOS-FET mit V-förmiger Gatezone. Damit vergleichbar ist der von Siemens entwickelte SIPMOS.

2) Der 1957 entwickelte Thyristor (SCR¹⁶) ermöglichte der Antriebstechnik einen weiteren Durchbruch, indem mit diesem auf Siliziumbasis gefertigten Bauelement erstmals ein steuerbares Halbleiterventil eingesetzt werden konnte. Aufgrund seiner Vorteile hat der Thyristor das Thyatron (eine mit Gas gefüllte Elektronenröhre) abgelöst.

Mit dem über das Gate abschaltbaren GTO-Thyristor eröffneten sich zahlreiche Anwendungs-

¹³ E. Kiel: Antriebslösungen - Mechatronik für Produktion und Logistik (Springer).

¹⁴ BJT = Bipolar Junction Transistor.

¹⁵ FET = Field Effect Transistor.

¹⁶ SCR = Silicon Control Rectifier.

möglichkeiten. Mit dem IGCT – einer Weiterentwicklung des GTO-Thyristors – konnten Umrichter im Megawatt-Bereich realisiert werden. Moderne Traktionsantriebe in den Zugwagen von Bahnen wären ohne solche Halbleiterbauelemente undenkbar.

3) Der in Frequenzumrichtern häufig vorkommende IGBT vereinigt die Eigenschaften eines bipolaren Transistors mit denjenigen eines MOSFET und besitzt demzufolge ein isoliertes Gate. Für kleine bis mittlere Leistungen hat er den Thyristor weitgehend verdrängt.

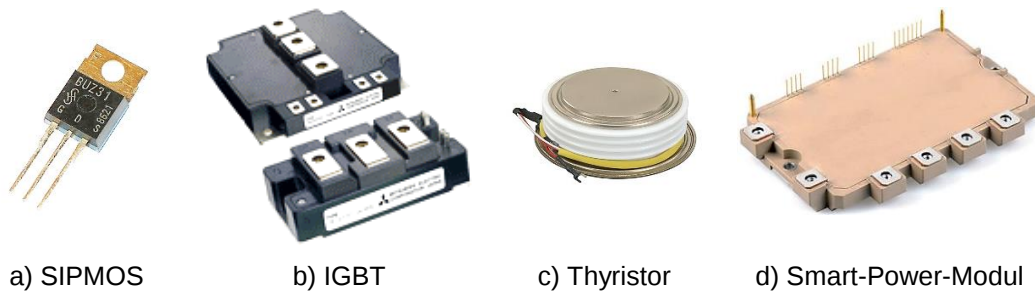


Abb. 3-7
Leistungshalbleiter

Zunehmends finden Smart-Power-Elemente Verwendung, bei denen die "Intelligenz" zusammen mit der Leistungselektronik in einen Baustein integriert wurde. Diese Technologie ermöglicht die Herstellung kompakter Applikationen in der Energietechnik, Gebäudeautomation und Antriebstechnik.

3.3 Drehfeldmotoren

Ungeachtet der Entwicklung spezieller Motoren kommt dem Drehfeldmotor eine grosse Bedeutung zu. Weit verbreitet sind dreiphasige Asynchronmotoren, die wartungsarm, robust und für unzählige Anwendungen geeignet sind. Werden Drehfeldmotoren über einen Frequenzumrichter betrieben, kann auf Motorschutzschalter verzichtet werden, wenn Thermistoren oder Kaltleiter verwendet werden. Massgebend für die richtige Parametrierung des Frequenzumrichters ist das am Motor angebrachte Leistungsschild (Abb. 3-8).

ABB ASEA BROWN BOVERI		ASYNCHRONMASCHINE MACHINE ASYNCHRONE ASYNCHRONOUS MACHINE			
No. AW	818 174	1988	Typ	QW Gy 800 xa 4	
P	5000	kW	Duty	S1	cos φ 0,89
n	1480	1/min	f	50	Hz
U ₁	10000	V	I ₁	335	A
U ₂		V	I ₂		A
Mec.			El.	VDE-0530	Cl. F
Mikador Compact					

Folgende Informationen sind im abgebildeten Beispiel enthalten:

- Fussmotor B3
- Schutzart IP 54
- Isolationsklasse F
- Nenndrehzahl 1'480 min⁻¹
- Leistung 5'000 kW
- Nennspannung 10'000 V (Stern)
- Nennstrom 335 A
- Leistungsfaktor 0.89

Abb. 3-8

Leistungsschild eines dreiphasigen Asynchronmotors¹⁷

In Globo existiert eine grosse Variantenvielfalt von Motoren (Abb. 3-9). Ausser dem Asyn-

¹⁷ Bildquelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Drehstrom-Asynchronmaschine>

chronomotor werden vielfach Synchronmotoren verwendet, die für bestimmte Anwendungen geeigneter sind.

1) Bei der sensorlosen Vektorregelung werden oft *Permanentmagnet-Synchronmaschinen* (PMSM) und bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC) eingesetzt. Letztere sind auch unter der Bezeichnung *Electronically Commutated Motor* (ECM) bekannt.¹⁸ In der Gebäudeautomation werden EC-Motoren in Ventilatoren eingesetzt.

2) Beim LSPM¹⁹-Motor handelt es sich um eine Kombination von Asynchronmotor mit Käfigläufer und Permanentmagnet-Synchronmotor, bei dem die Magnete im Rotor unter den kurzgeschlossenen Läuferstäben platziert sind. Diese Motoren vereinigen die Vorzüge beider Typen. LSPM-Motoren kommen gewöhnlich in Lüftern und Pumpen zum Einsatz und sind im Leistungsbereich bis 10 kW verfügbar. Sie lassen sich auch in Anwendungen mit niedrigem Trägheitsmoment einsetzen.

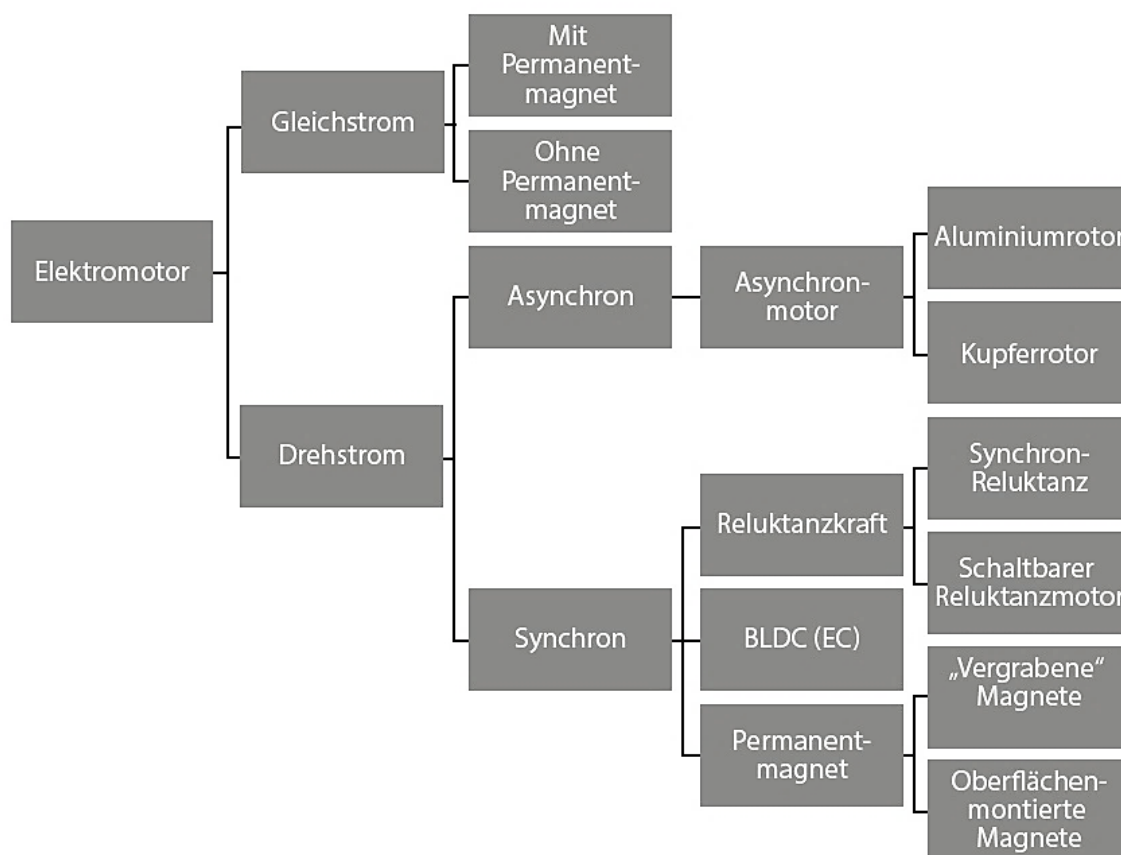


Abb. 3-9

Variantenvielfalt von Elektromotoren²⁰

3.3.1 Asynchronmotoren

Zu den verbreitetsten Dreiphasenmotoren gehören die Drehstrom-Asynchronmotoren. Es wird zwischen *Kurzschlussläufer* und *Schleifringläufer* unterschieden. Erstere sind funktstörfrei, preisgünstig und direkt an ein normiertes Verteilsystem anschliessbar.

► *Kurzschlussläufer* sind einfach im Aufbau und praktisch wartungsfrei. Sie werden für Leis-

¹⁸ PMSM = Permanent Synchron Motor; BLDC = Brushless DC.

¹⁹ LSPM = Line Start Permanent Motor.

²⁰ Bildquelle: Danfoss

tungen von 0,18 kW bis 710 kW gebaut. Der Stator besteht aus lamellierten Blechpaketen, in welche die Wicklung eingelassen ist. Auch der Rotor besteht aus dünn-schichtigen, isolierten Eisenblechen mit Nuten, in die stirnseitig kurzgeschlossene Aluminiumstäbe eingelegt sind (Abb. 3-10). Die Energieübertragung zwischen Stator und Rotor erfolgt durch magnetische Kopplung des umlaufenden Drehfeldes.

Kurzschlussläufer werden als *Einfachkäfigläufer*, *Doppelkäfigläufer* und *Strömverdrängungsläufer* konstruiert. Letztere werden als *Tiefnut-* und *Keilnutläufer* gebaut. Stromverdrängungsläufer besitzen bei erhöhtem Anzugsmoment einen kleineren Anzugsstrom, bei Nennlast aber einen geringeren Wirkungsgrad und schlechteren Leistungsfaktor als Rundstabläufer.

► *Schleifringläufer* besitzen anstelle eines Käfigrotors einen in Sternschaltung gewickelten Rotor, dessen Wicklungsanfänge (K, L, M) auf Schleifringe geführt sind (Abb. 3-11). Durch einen Bürstensenst werden die Schleifringe abgegriffen und mit einem Anlasserwiderstand verbunden, welcher schrittweise kurzgeschlossen wird. Am Ende des Hochlaufs werden auch die Schleifringe kurzgeschlossen, so dass der Motor wie ein gewöhnlicher Kurzschlussläufer funktioniert. Die Anlassersteuerung erfolgt mit Leistungshalbleitern.

Anwendung finden Schleifringläufer dort, wo grosse Lasten aus dem Stand angefahren werden (z.B. Hebeanlagen, Zentrifugen, Wasserwerkspumpen, Steinbrechmaschinen, Refiner). Für grosse Leistungen werden die Motoren mit Hochspannung betrieben.

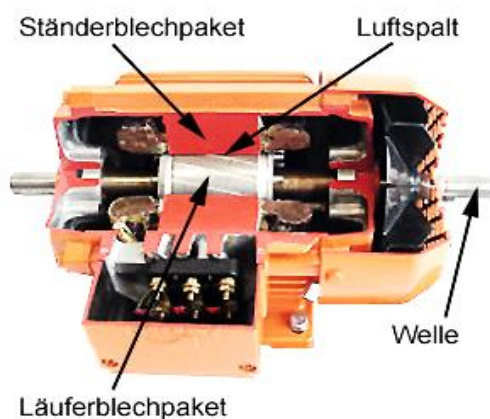


Abb. 3-10

Drehstrommotor mit Kurzschlussläufer

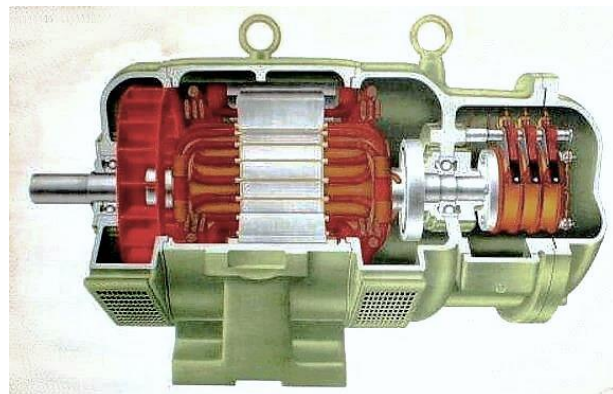


Abb. 3-11

Drehstrommotor mit Schleifringläufer

3.3.2 Synchronmotoren

Wo synchrone Drehzahlen gefordert sind, gelangen ein- und mehrphasige Synchronmotoren zum Einsatz, die nach unterschiedlichen Prinzipien konstruiert werden. Baut man in einem Ständer mit Drehstromwicklung einen aus Permanentmagneten aufgebauten Rotor ein (Abb. 3-12), so bildet sich nach erfolgtem Anlauf eine schlupflose Läuferbewegung aus. Der Rotor wird synchron vom Drehfeld mitgezogen.

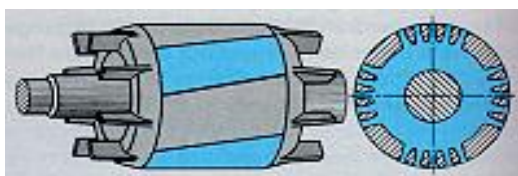


Abb. 3-12

Rotor eines Synchronmotors

Grössere Motoren benötigen eine über Schleifringe zugeführte Gleichstromerregung. Infolge der Massenträgheit des Rotors bedürfen sie einer Starthilfe (Anlaufkäfig). Die Polzahl des Läufers muss derjenigen der Statorwicklung entsprechen. Durch unterschiedliche Polpaarzahl können unterschiedliche Drehzahlen realisiert werden.

Bei zunehmender Momentabgabe entsteht ein sog. Lastwinkel, dh. das Polrad eilt dem Drehfeld winkelfverschoben hinterher, ohne jedoch aus dem drehfeldsynchrone Lauf zu fallen. Bei einem Lastwinkel von 90° kippt ein zweipoliger Motor und bleibt stehen.

Bei Untererregung nehmen Synchronmotoren induktive Blindleistung auf, bei Übererregung generieren sie Blindleistung ins Netz zurück. Sie werden deshalb auch als *Phasenschiebermaschinen* zur Blindstromkompensation eingesetzt.

Wegen ihrer konstanten Drehzahl werden einphasige Synchronmotoren als AC-Kleinmotoren für Uhren, Programmschaltwerke und Meßschreiber eingesetzt. Langsamlaufende *Spaltpol-Synchronmotoren*, meist Aussenläufer, werden nach dem *Klauenpolprinzip* hergestellt.

► Der *Reluktanzmotor*²¹ läuft asynchron an und springt nach erfolgtem Hochlauf in die synchrone Drehzahl (sog. *Aussprung*). Bei Ueberlast läuft er asynchron weiter. Das Rotorblechpaket besitzt so viele Aussparungen, als der Ständer Pole hat. Dadurch entstehen Zonen erhöhter Permeabilität, die wie ausgeprägte Pole wirken. Der Stator eines dreiphasigen Synchron-Reluktanzmotors mit Käfigläufer ist identisch mit dem eines dreiphasigen Standard-Käfigläufermotors. Verwendet werden Reluktanzmotoren z.B. für Antriebe von Textilspindeln und Fördereinrichtungen, dh. dort, wo mehrere Antriebe miteinander synchron laufen müssen.

► Eine Verbesserung des Reluktanzmotors ist der *Hysteresemotor*, der mit praktisch konstantem Drehmoment hochläuft, um dann kontinuierlich in den Synchronbetrieb überzugehen (Einsprung). Bei zu grosser Last fällt er nicht aus dem Tritt, sondern läuft mit Asynchronverhalten weiter (Schlupf). Bei Entlastung treibt das Hysteresemoment den Läufer wieder in den Synchronbetrieb.

3.3.3 Drehmoment/Drehzahlkennlinie eines Asynchronmotors

Ein Standard-Asynchronmotor besitzt ein relativ gutes *Anzugsmoment*. Dieses muss immer grösser als das durch die Last bedingte *Losbrechmoment* sein (Abb. 3-13).

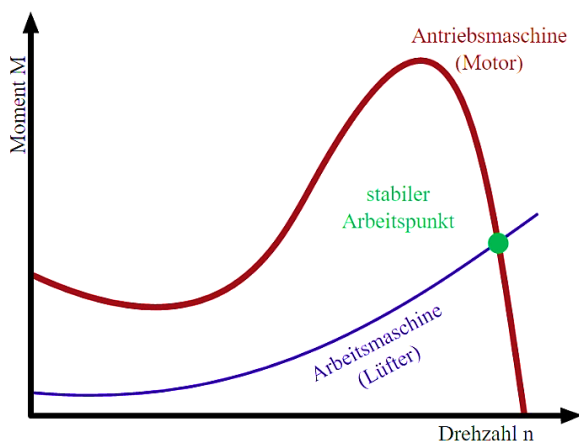


Abb. 3-13a

Drehmoment-Drehzahlkennlinie²²

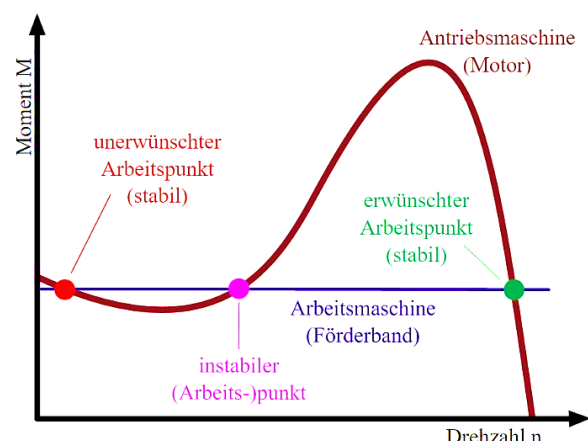


Abb. 3-13b

Arbeitspunkt einer Asynchronmaschine²³

²¹ Das Reluktanzprinzip kam erstmals um das Jahr 1840 zum Einsatz. Im Laufe der Zeit führten verschiedene Optimierungen zu unterschiedlichen Motorprinzipien und -konstruktionen.

²² <https://de.wikipedia.org/wiki/Arbeitspunkt>

²³ Ebenda.

Während des gesamten Hochlaufs muss ein *Überschussmoment* für die Beschleunigungsarbeit vorhanden sein. Das grösste erreichbare Moment bei Erreichen der "Überziehgeschwindigkeit" wird als *Kippmoment* bezeichnet. Beim *Nenn Drehmoment* erreicht der Antrieb seinen optimalen Arbeitspunkt. Im Leerlauf erfolgt Annäherung an die Synchron Drehzahl. Bei Belastung fällt die Drehzahl, bis das Ueberschussmoment verbraucht ist; danach kippt der Motor in den negativen Bereich und blockiert.

Die Differenz zwischen synchroner und realer Drehzahl wird als "Schlupf" bezeichnet. Bei Nennlast beträgt dieser 3 % bis 8 % der Leerlaufdrehzahl. Bei Drehstrommotoren, die mit einem Frequenzumrichter betrieben werden, ist eine *Schlupfkompensation* erforderlich, sobald die Drehzahl auf ≤ 5 % absinkt. Der Schlupf beträgt dann bereits 50 % des ansonsten üblichen Wertes und der Motor bleibt ohne Kompensationsmassnahmen stehen.

3.3.4 Begrenzung des Anlaufstromes

Das Anlassen von Drehstrommotoren erzeugt im elektrischen Verteilsystem Stromstösse und damit unerwünschte Spannungseinbrüche (sog. Dips). Abhängig von der Last und der Ausführungsform des Rotors sind Anlaufströme bis zum achtfachen Betrag des Nennstromes möglich. Die kontrollpflichtigen Unternehmungen legen deshalb Grenzwerte für den Direktanlauf von Normmotoren fest. Um diese Grenzwerte einzuhalten und das Netz nicht unzulässig zu belasten, wurden unterschiedliche Anlassverfahren entwickelt.

- *Stromverdrängungsläufer* reduzieren den Anlaufstromes bei gleichzeitig verbessertem Anzugsmoment.
- *Schleifringläufer* werden dort eingesetzt, wo bei reduziertem Anlaufstrom ein kräftiges Drehmoment verlangt wird.
- Mit einem *Stern-Dreieck-Starter* kann der Anlaufstrom auf den dreifachen Nennstrom gesenkt werden. Gelegentlich wird stattdessen die einfachere KUSA²⁴-Schaltung verwendet.
- Immer häufiger werden *elektronische Sanftanlasser* (Softstarter) eingesetzt; dabei sinkt aber das Anzugsmoment. Deshalb eignet sich dieses Verfahren nicht für jede Anwendung.

²⁴ KUSA = **K**urzschlussläufer **S**anftanlauf.

4 EMV-konformer Betrieb

Weil beim Frequenzumrichter infolge Gleichrichtung und anschliessender Wechselrichtung mit dem Auftreten von Oberwellen gerechnet werden muss, sind die diesbezüglichen Bestimmungen zur Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in den betreffenden Regelwerken zu berücksichtigen. Im Kontext sind die Normen EN 55011 (Umgebungsnorm) und EN 61800-3 (Produktnorm) zu beachten und die EMV-Richtlinie anzuwenden. Konkrete Massnahmen zur Vermeidung von Störungen in industrieller Umgebung können den Herstellerunterlagen entnommen werden.²⁵

4.1 Geschirmte Motorenkabel

Elektroinstallateure und Anlagenbauer verwenden geschirmte Kabel. Hochwertige Motorenleitungen (z.B. ÖLFLEX® SERVO 2YSLCY-JB) besitzen eine doppelte Schirmung. Der innere Schirm wird einseitig und der äußere Schirm zweiseitig aufgelegt. Symmetrisch verdrehte Polleiter erhöhen die Störfestigkeit gegenüber magnetischen Felder (Abb. 4-1).

Besteht die Masseverbindung lediglich beim Frequenzumrichter, so ist auf der Motorseite ein RC-Glied zwischen Schirm und Gerätemasse anzubringen (sonst werden nur niederfrequente Störungen bedämpft).

Für die Übertragung binärer Steuersignale mit 24 VDC sind geschirmte Kabel nicht zwingend erforderlich. Kabel für analoge Signale hingegen müssen einen Schirm vorweisen. Geeignet ist ein engmaschiges Kupfergeflecht, das einseitig (nur im Steuerschrank) geerdet wird. Hinzu kommen verdrehte Adern, um induzierte Störpegel (Gegentaktstörungen) zu reduzieren.



Abb. 4-1

Symmetrische Anschlussleitung mit gedritteltem Schutzleiter²⁶

Um die HF-Impedanz zu minimieren, ist immer auf eine grossflächige Kontaktierung beim Anschluss des Kabelschirmes zu achten (Abb. 4-2). Das Verdrillen des Schirmes oder das Anlöten einer Aderlitze soll tunlichst vermieden werden. Diese Massnahme ist erforderlich, weil hochfrequente Ströme infolge des *Skin-Effektes* nur auf der Leiteroberfläche fließen.

Kontaktstellen müssen blank sein. Sie sind von Farbe, Lack und Korrosion zu befreien. Kratzscheiben sind gewöhnlichen Unterlegscheiben vorzuziehen. Verzinnete, verzinkte und kadmierte Schraubverbindungen eignen sich für den vorgesehenen Zweck. Als Alternative zu den Schirmanschlussklemmen eignen sich geprüfte EMV-Kabelverschraubungen (Abb. 4-3).

Wird das lastseitige Kabel aufgetrennt – z.B. um einen Sicherheitsschalter einzubauen –, so muß die Schirmung auf möglichst direktem Weg durchverbunden werden. Steckverbindungen sind möglichst zu vermeiden.

Last but not least ist auch dem Potentialausgleich ein Augenmerk zu widmen. Ausser den Herstellerangaben sind die diesbezüglichen Normen (NIN 2015) zu konsultieren. Elektrisch

²⁵ Betriebsmittel in industriellen Anlagen mit eigener Trafostation gehören zur "zweiten Umgebung". Die Umgebungsklassen sind in der Umgebungsnorm, die Einsatzkategorien in der Produktnorm beschrieben.

²⁶ Motorflex 3 PLUS 2YSLCY-J 0,6/1 kV.

leitende Motorechassis, Montagerahmen und Kabelkanäle aus Metall sind mit einem Potentialausgleichsleiter von min. 10 mm² zu verbinden. Hauptpotentialausgleichsleiter müssen auf dem kürzestmöglichen Wege mit einem zentralen Erdungspunkt verbunden werden.



Abb. 4-2
Befestigungsbeispiele geschirmter Leitungen



Abb. 4-3
Beispiele von EMC-Kabelverschraubungen

4.2 Schaltschrankeinbau von Frequenzumrichtern

Gelegentlich trifft man Frequenzumrichter an, die direkt auf das Mauerwerk von Gebäuden montiert wurden. In diesem Fall sollte zumindest ein Potentialausgleichsleiter verlegt werden. Einzelne, nebeneinander montierte Umrichter sind sternförmig mit einer Potentialausgleichschiene zu verbinden.

In Schaltanlagen eingebaute Frequenzumrichter sind auf eine metallische Grundplatte zu montieren, die mit dem Schutzleiter der Anschlussleitung verbunden ist. Nach Möglichkeit sollen blanke resp. verzinkte Bleche verwendet werden. Lackierte Grundplatten müssen an den in Frage kommenden Stellen vom Lack befreit werden, damit eine niederohmige Verbindung zustande kommt. Empfindliche Geräte wie z.B. Regelplatinen, Messumformer, PLC-Steuerungen²⁷ usw. können mit Abschirmblechen vor Störeinstrahlung geschützt werden.

4.3 Abwehrmassnahmen für leitungsgebundene Ströungen

Wir unterscheiden Störschutzmassnahmen vor dem Umrichter und solche im Lastkreis des Umrichters. Zweck dieser Störschutzmassnahmen ist die Glättung von Spannungsspitzen und die Abwehr von Oberwellen. Vor dem Frequenzumrichter geeignet sind Netzdrosseln (Spulen mit Eisenkern) und Netzfilter (Tiefpassfilter), nach dem Frequenzumrichter kommen du/dt-Drosseln und Sinusfilter zur Anwendung. Letztere sind dreiphasige LC-Filter.

4.3.1 Netzseitiger Störschutz

Für alle Frequenzumrichter ist eingangsseitig ein Netzfilter erforderlich (Abb. 4-4). Für kleinere

²⁷ PLC = Programmable Logic Controller; deutsch SPS = Speicherprogrammierbare Steuerungen.

Leistungen sind solche Filter bereits standardmässig in die Geräte integriert. Spezielle Oberwellenfilter können in bestimmten Fällen erforderlich werden (Abb. 4-5). Ansonsten empfiehlt sich die Vorschaltung einer Netzdrossel (Abb. 4-6) mit einer Kurzschlußspannung von $\approx 4\%$.



Abb. 4-4
Dreipoliges Netzfilter

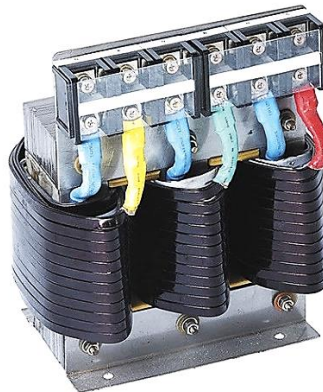


Abb. 4-5
Oberwellenfilter



Abb. 4-6
Netz- od. Kommutierungs-drossel

Drosseln reduzieren Netzurückwirkungen und verbessern den Leistungsfaktor. Der Stromoberwellengehalt (THD²⁸) beträgt bei einem Frequenzumrichter ohne Netzdrosseln ca. 120 % und kann mit internen oder externen Drosseln auf 50% gesenkt werden. Proportional dazu sinkt die Netzspannungsverzerrung. Energiereiche, transiente Spannungsspitzen werden gedämpft. Bei kurzzeitigen Spannungseinbrüchen können große Ladeströme in die Zwischenkreiskondensatoren von Frequenzumrichter fließen. Netzdrosseln begrenzen diese Stromstöße. Zudem wird die Stromwelligkeit im Zwischenkreis verringert, was sich positiv auf die Lebensdauer der Kondensatoren auswirkt.

4.3.2 Motorseitiger Störschutz

In vereinzelt Fällen genügt als Abhilfe bereits die Schlaufung der Motorleiter durch einen Ferritring (Abb. 4-7). Wirksamer als Ferritkerne sind du/dt-Motordrosseln, welche die Spannungsspitzen brechen und die Anstiegsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung (bis 10 kV/ μ s) reduzieren (Abb. 4-8). Insbesondere bei grossen Kabellängen erweisen sich Motordrosseln als wirksame Dämpfung gegen schädliche Strompulse. Bei erhöhten Anforderungen muss ein *Sinusfilter* zwischen Frequenzumrichter und Motor eingebaut werden (Abb. 4-9). Mit derartigen LC-Filtern wird ein nahezu sinusförmiger Spannungsverlauf erzielt. Dadurch werden hochfrequente Lagerströme eliminiert, was sich positiv auf die Lebensdauer des Antriebes auswirkt.

Bei geschirmten Motorkabeln mit einer Länge > 50 m kann es aufgrund der erhöhten Kabelkapazitäten zu großen Umladeströmen kommen, wodurch eine Abschaltung des Frequenzumrichters bewirkt wird. In diesem Fall ist der Einsatz von Motordrosseln unbedingt zu empfehlen. Wird kein Sinusfilter verwendet, sollten bei Distanzen > 2 m stets geschirmte Kabel benutzt werden. Lange Schirmleitungen erhöhen aber den Gesamtstrom, so dass Motordrosseln erforderlich werden.

²⁸ THD = Total Harmonic Distortion.

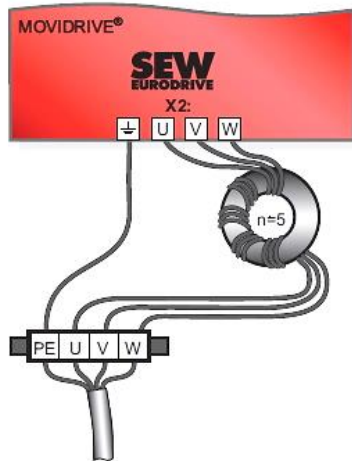


Abb. 4-7
Ferrit-Ringkern²⁹



Abb. 4-8
Motordrossel



Abb. 4-9
Dreiphasen-Sinusfilter

5 Hinweise bei der Fehlersuche an Frequenzumrichtern und Motoren

5.1 Strom- und Spannungsmessungen

Für Messungen an Frequenzumrichtern sollten Multimeter der Kategorie CAT III 600 V oder höher verwendet werden. Durch Wanderwellen im Motorkreis hervorgerufene Spannungsspitzen bedingen stoßspannungsfeste Messgeräte und geeignetes Zubehör (Meßspitzen, Prüfklemmen, Laborkabel usw.). Beachte ferner, dass die Zwischenkreiskondensatoren nach einer Netztrennung noch immer geladen sein können und die Berührungsspannung gefährliche Werte annehmen kann!

Multimeter werden einer von vier möglichen Messkategorien zugeordnet, die auf dem Instrument mit römischen Ziffern vermerkt ist. Den Kategorien zugeteilt sind Spannungsniveaus von 300 V, 600 V oder 1'000 V. Fehlt die Klassifizierung, so darf das Gerät nur für Messungen der Kategorie 1 (CAT I) benutzt werden.

CAT I	Messungen an Objekten, die keine direkte Verbindung mit dem Niederspannungsnetz haben und mit Kleinspannung betrieben werden wie z.B. Sonnerieanlagen.
CAT II	Messungen an Objekten, die über eine Steckvorrichtung (10 A) mit einer Hausinstallation verbunden sind wie z.B. Tischbohrmaschinen.
CAT III	Messungen an Objekten, die fest an eine Hausinstallation angeschlossen sind wie z.B. Kochherde oder Boiler, aber auch transportable Verbraucher auf Baustellen und in landwirtschaftlichen Betrieben.
CAT IV	Messungen an Objekten, wo grosse Kurzschlußströme zu erwarten sind wie z.B. Hauptverteilungen und Industrieanlagen.

Die Netzspannung kann in vielen Fällen mit einem mittelwertbildenden Messgerät gemessen werden. Für Netzströme dagegen sind TrueRMS-Messgeräte erforderlich, weil die Kurvenform

²⁹ Bildquelle: Praxis der Antriebstechnik (SEW Eurodrive).

durch den Brückengleichrichter und den Siebkondensator verzerrt wird.³⁰ Am Ausgang eines Frequenzumrichters verhält es sich umgekehrt. Weil auf der Motorenseite keine sinusförmigen Spannungen zu erwarten sind, müssen TrueRMS-Messgeräte benutzt werden. Der Motorstrom hat bei höheren Taktfrequenzen einen sinusartigen Verlauf und kann daher mit einem mittelwertbildenden Zangenstrommeter gemessen werden. Von wenigen Ausnahmen abgesehen sollten im industriellen Umfeld aber nur noch TrueRMS-Messgeräte (Abb. 5-1) verwendet werden.

Drehspuhlinstrumente und Low-cost Digitalmultimeter zeigen bei nichtsinusförmigem Verlauf einen zu kleinen Messwert an. Wird keine allzu hohe Genauigkeit verlangt, so ist es einfacher, Motorspannung und Motorstrom auf der Bedienungsanzeige des Frequenzumrichters abzulesen.

Wem mit solchem Equipment kein Erfolg beschieden ist, muss zu anderen Prüfmitteln greifen. Geeignet zur Erfassung nichtsinusförmiger Spannungen sind z.B. Scopemeter (Abb. 5-2). Aufgrund des relativ hohen Spannungspotentials sollte die Tastsonde über eine Differentialprobe an den Oszilloskopeingang angeschlossen werden. Ausgenommen sind Geräte mit vollisolierten Kanälen.



TRMS-Multimeter von CEM

TRMS-Clampmeter von Velleman

Scopemeter von Fluke

Abb. 5-1
Digitale Echt-Effektivwert Messgeräte

Abb. 5-2
Handheld-Oszilloskop

Unterschiede zwischen RMS und TrueRMS:

Dreheisenmessgeräte zeigen zwar immer den Effektivwert einer Wechselgröße an, sind aber nur für niedrige Frequenzen geeignet. Low-Cost Multimeter messen mittels einer Gleichrichterschaltung den Gleichwert einer Wechselspannung. Dieser wird mit dem Formfaktor von 1,11 multipliziert und ergibt so den Effektivwert für eine sinusförmige Spannung. Weicht ein Meßsignal vom reinen Sinus ab, so verändert sich auch der Formfaktor, der für jede Kurvenform einen anderen Wert besitzt.

³⁰ TrueRMS bzw. TRMS = True Root mean square oder Echt-Effektivwert, auch als quadratischer Mittelwert bezeichnet.

Dadurch zeigt das Multimeter einen falschen (zu kleinen) Wert an. Je stärker die Verzerrung, um so grösser wird der Anzeigefehler. Der Grad der Verzerrung wird mit dem *Crestfaktor* angegeben. Bei verzerrter Kurvenform sind TRMS-Geräte genauer, weil sie innerhalb einer definierten Bandbreite den quadratischen Mittelwert aller Harmonischen anzeigen. Die Minimalanforderung für den Einsatz im Energiebereich ist eine Bandbreite von 1 kHz und ein Crestfaktor von 3.

Zusammenfassend unterscheiden wir mittelwertbildende Messgeräte (RMS) und Echt-Effektivwert anzeigende Messgeräte (TrueRMS).

- RMS Root mean square
- TRMS True root mean square (urspr. ein Marketingbegriff von Fluke)
- RMS AC Effektivwert AC-gekoppelt (nur Wechselanteil)
- RMS DC Effektivwert DC-gekoppelt (Gleich- und Wechselanteil)³¹

Fazit: Elektronische Messgeräte mit TRMS-Wandler ermitteln aus unterschiedlichen Signalen den wahren Effektivwert und zeigen den Messwert folglich richtig an. Bei reinen Sinusgrössen zeigen RMS- als auch TRMS-Geräte denselben Messwert an. Bei nichtsinusförmigen Spannungen oder Strömen dagegen sind die Anzeigen unterschiedlich. Mittelwertbildende Geräte zeigen aufgrund ihrer Eichung nur den quadratischen Mittelwert (Effektivwert) der Grundwelle korrekt an.

Der quadratische Mittelwert (Root mean square) eines Wechselstromes entspricht dem Wert eines Gleichstromes, der in derselben Zeit dieselbe elektrische Energie in einem Wirkwiderstand in Wärme umsetzt.

$$G = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T g^2(t) dt}$$

Unter dem *Formfaktor* (F) versteht man den Quotienten aus Effektivwert und Gleichrichtwert (Rectified value). Letzterer wird auch als linearer oder arithmetischer Mittelwert bezeichnet.

$$F = \frac{G_{eff}}{\bar{G}}$$

Für reine Sinusgrößen besitzt der Formfaktor einen Wert von 1,11. Für eine pulsierende Halbwelle nach einem Einweggleichrichter kommen wir auf einen Formfaktor von 1,57.

Als *Crest-* oder *Scheitelfaktor* (CF) bezeichnet man das Verhältnis aus Spitzenwert und Effektivwert eines Signals.

$$CF = \frac{G_{peak}}{G_{eff}}$$

Für eine sinusförmige Grösse beträgt der Crestfaktor $\sqrt{2} \approx 1,41$. Mit wachsender Verzerrung nimmt der Wert zu. Ein Sägezahnsignal z.B. hat einen Crestfaktor von $\sqrt{3} \approx 1,73$ und bei einem Phasenschnitt können Werte bis 4,2 vorkommen. Der Crestfaktor ist also ein Indikator für die Abweichung eines Signals von der reinen Sinusform.

³¹ Ein DC-Signal hat während eines Zeitintervalls immer die gleiche Amplitude. Als DC-Komponente (od. Gleichwert) bezeichnet man den (linearen) Mittelwert eines Signals.

5.2 Schutz- und Abschaltvorrichtungen

5.2.1 Fehlerstromschutzschalter

Wird vor einem Frequenzumrichter ein Fehlerstromschutzschalter (RCCB³²) verwendet, so ist darauf zu achten, dass nur allstromsensitive Geräte (Typ B) eingesetzt werden. Ansonsten ist mit ungewollten Auslösungen zu rechnen. In bestimmten Fällen sind kurzzeitverzögerte FI-Schutzschalter angezeigt.

5.2.2 Thermistoren

Für thermische Schutzorgane gilt, dass sie nur dann auslösen dürfen, wenn eine Gefährdung des Motors bevorsteht. Aufgrund der wechselnden Last- und Drehzahlverhältnisse eignen sich klassische Motorschutzschalter nicht zum Schutz von frequenzgeregelten Drehstrommotoren. Anstelle dessen werden Thermistoren (Kaltleiter) und Bimetallschalter verwendet. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass die Wicklungstemperatur des Motors direkt erfasst wird und der Antrieb somit erst dann eingeschaltet werden kann, wenn er sich genügend abgekühlt hat.

a) Bimetallschalter werden für Motoren bis ca. 7,5 kW direkt in Reihe mit den Statorwicklungen verdrahtet. Sie schalten den Motor bei einer definierten Grenztemperatur aus. Für höhere Leistungen werden Bimetallfühler an ein Auswertegerät angeschlossen, das den Antrieb bei unzulässiger Erwärmung ausschaltet.

b) Thermistoren, also temperaturabhängige Widerstände, erhöhen ihren Widerstand sprunghaft bei Überschreiten einer festgelegten Grenztemperatur. Meist finden Kaltleiter (PTC-Widerstände) Verwendung. In der Regel werden drei in die Statorwicklungen verteilte Kaltleiter in Reihe geschaltet. Im Frequenzumrichter übernimmt eine Auswerteelektronik den Motorschutz. Bei der Fehlersuche ist darauf zu achten, dass die Meßspannung den zulässigen vom Hersteller angegebenen Wert nicht überschreitet, sonst kann der Kaltleiter zerstört werden.

Nicht unmittelbar erfasst werden mittels der thermischen Auslösung:

- Rotorüberlast
- Phasenausfall
- Asymmetrie
- Kurzschluss
- Erdschluss

5.3 Drehstrommotoren

5.3.1 Fehler im Statorkreis

Um unzulässige Erwärmungen eines Elektromotors zu verhindern, werden Lüfter eingesetzt. Für kleinere Motoren ist meist eine Eigenbelüftung durch ein auf der Motorwelle angebrachtes Flügelrad vorgesehen. Für Antriebe im mittleren und oberen Leistungsbereich erfüllt nur ein drehzahlunabhängiger Fremdlüfter die erforderliche Funktion.

Ein Nachteil der Eigenbelüftung zeigt sich im unteren Drehzahlbereich, wo der Lüfter nur noch eine ungenügende Luftmenge fördern kann, so dass sich der Motor bei Belastung stark er-

³² RCCB = Residual Current operated Circuit-Breaker. Oft wird nur der Oberbegriff (RCD) verwendet.

wärmt. In solchen Fällen ist ein Fremdlüfter nötig. Ein vergleichbarer Effekt entsteht bei hohen Umgebungstemperaturen. Hier muss dem Motor notfalls gekühlte und gefilterte Luft zugeführt werden.

Instandhaltungs- und Elektrofachleute müssen beim Ausfall eines Antriebes den Fehler in möglichst kurzer Zeit finden. Erfahrungsgemäss kommen bei Elektroantrieben die folgenden Fehlerursachen vor:

- Überlast 30%
- Isolationschäden 20%
- Phasenausfall 14%
- Lagerschäden 13%
- Alterung 10%
- Rotorschäden 5%
- Diverse 8%

In praxi begegnen dem Instandhalter nebst den üblichen Lagerschäden meist schadhafte Wicklungen, die zu Phasenausfall sowie Kurz- und Erdschlüssen führen. Mit geeigneten Messgeräten kann der Fehler in der Regel rasch gefunden werden. Wer die Beschaffungskosten nicht scheut und desöfteren mit Elektromotoren zu tun hat, greift zu einem Motor-Circuit-Evaluator.

Statorwicklungen werden mit einem Isolationsmessgerät auf ihre Isolationstauglichkeit geprüft. Die Gleichprüfspannung sollte 1'000 V betragen, um auch bei leichteren Isolationsschäden ein messbares Resultat zu ermöglichen. Wird lediglich ein Ohmmeter benutzt, kommt es nicht zu einem Durchschlag und der Schaden bleibt unbemerkt. Wicklungsunterbrüche dagegen lassen mit einem Ohmmeter ermitteln. Sind die Messwerte für jede Phase in etwa gleich gross, so kann von einer intakten Statorwicklung ausgegangen werden. Eine vergleichbare Aussage ermöglicht die Messung der Polleiterströme mit einem Clampmeter. Sind die Ströme von gleicher Grösse, so sind die Wicklungen in Ordnung.

Im Umfeld drehzahlgesteuerter Maschinen sollten nur Motoren mit verstärkter Wicklungsisolation eingesetzt werden. Ansonsten droht bei den steilen Anstiegsflanken ein Durchschlagen der Isolationswerkstoffe. Im Kontext werden nach DIN EN 60085 spezifische Isolierstoffklassen unterschieden.

Isolierklasse		Umgebungs- temp. in °C	Wicklungs- temp. in °C	Höchstzulässige Dauertemp. in °C
B	Standardanwendungen	40	80	130
F	Umrichter- und Frequenzumrichter- gespiesene Motoren	40	105	155
H	für besondere Fälle	40	125	180

Werden die zugehörigen Temperaturen um mehr als 10 °C überschritten, so verkürzt sich die Lebensdauer der Wicklung bereits drastisch. Die Umgebungstemperatur sollte nicht mehr als 40 °C betragen. Das bedeutet konkret, dass ein Elektromotor der Isolationsklasse F bei einer Umgebungstemperatur von 40 °C eine Wicklungstemperatur von 105 °C – zuzüglich einer Toleranz von 10 °C – erreichen darf (max. also eine Temperatur von 155 °C).

5.3.2 Fehler im Rotorkreis

Etwas schwieriger gestaltet sich die Fehlersuche bei schadhaftem Rotor. Elektromaschinenbauer haben dafür geeignete Messgeräte zur Hand, welche auch eine statische Rotordiagnose ermöglichen. Statisch bedeutet im Ruhezustand des Motors. Entsprechende Erfahrung in der Handhabung solcher Geräte ist hier unumgänglich. Eine teure Anschaffung lohnt sich bei nur gelegentlichem Gebrauch nicht.

5.3.3 Wälzlager

Ein nicht geringes Problem sind die durch Oberwellen hervorgerufenen Lagerschäden. Infolge der steilen Anstiegsflanken der Spannungspulse entstehen zahlreiche Harmonische, die sich über die zwischen Motorwelle und Masse existenten parasitären Kapazitäten entladen. Bei Dauereinwirkung bilden sich an den Wälzlagern Abnutzungsmerkmale aus, die zu einem vorzeitigen Lagerausfall beitragen. Abhilfe schaffen Sinusfilter und isolierende Keramiklager.

Defekte Lager lassen sich auf verschiedene Art und Weise ausfindig machen. Der vermutlich einfachste, aber nichtsdestotrotz hilfreiche Test funktioniert mit einem Schraubenzieher, den man an geeigneter Stelle am Motor ansetzt. Den Handgriff hält man ans Ohr. Lagerschäden machen sich durch schrille, singende oder unregelmässige Geräusche beim Lauf bemerkbar.

Präziser geht es mit einem Prüfgerät, das die Lagergeräusche akkustisch verstärkt. Eine andere Methode beruht auf der Schwingungsmessung. Abgenutzte und schadhafte Lager zeigen einen charakteristischen Frequenzverlauf bis in den Ultraschallbereich. Für die Interpretation des Frequenzspektrums ist eine Schulung in der Regel sinnvoll. Die Wälzlagerhersteller bieten zu diesem Zweck diverse Instandhaltungsseminare an.

5.4 Sensoren

Bei drehzahlgeregelten Antrieben mit Sensorrückführung unterscheiden wir:

- Tachogeneratoren
- Resolver
- Inkrementalgeber
- Absolutwertgeber

5.4.1 Tachogeneratoren

Tachogeneratoren findet man oft bei Gleichstromantrieben. Es kommen DC- und AC-Dynamos zum Einsatz. Auf Letzteren findet sich manchmal die Bezeichnung R.F.³³ Laut Hübner – einem der bekanntesten Tachohersteller in Europa – ist folgende Regel zu beachten: Für grosse Maschinen und Anlagen mit langem Übertragungsweg werden eigengelagerte Tachos mit 60 V/1'000 min⁻¹ (oder mehr) verwendet. Für hochdynamische Antriebe mit kurzem Übertragungsweg wird der Einbau von Hohlwellen-Tachos mit 20 V/1.000 min⁻¹ (auch etwas mehr oder weniger) empfohlen. Bei der Montage sind Fluchtungsfehler zu vermeiden.

Die Überprüfung ist relativ einfach; dazu benötigen wir lediglich ein Multimeter. Gemessen wird eine drehzahlabhängige Spannung – im Beispiel eine Gleichspannung (Abb. 5-3). Dem Gleichspannungspegel ist aufgrund der Kommutierung ein "Spannungsrippel" (auch als "Riffel" bezeichnet) überlagert. Bei "unschöner" Gleichspannung sind die Kohlebürsten und der

³³ R.F. = Radio frequency

Kollektor zu inspizieren. Ggf. muss der Kollektor "überdreht" werden.

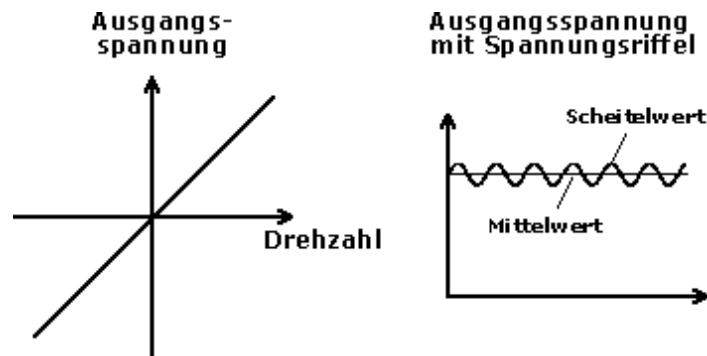


Abb. 5-3
DC-Tachospannung³⁴

Um den Spannungsverlauf beim Hochfahren des Antriebes zu verfolgen, empfiehlt sich die Verwendung eines Analog-Messgerätes (Abb. 5-4); damit lassen sich Veränderungen zeitkontinuierlicher Signale besonders gut betrachten.

Im industriellen Umfeld haben sich auch Analog-Digital-Multimeter bewährt, also Messgeräte, die nebst einer digitalen Messwertanzeige eine Spiegelskala mit Zeiger besitzen (Abb. 5-5). Einige TRMS-Digitalmultimeter haben zusätzlich zur Ziffernanzeige eine Bargraph-Anzeige (Abb. 5-6), was mitunter ebenfalls hilfreich sein kann.

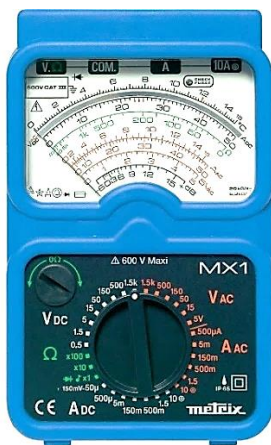


Abb. 5-4
Analog-Multimeter mit Drehspuhlmesswerk von Metex



Abb. 5-5
TRMS-A/D-Multimeter von Chauvin Arnoux



Abb. 5-6
TRMS-Präzisionsmultimeter von GMC mit numerischer Anzeige und Bargraph

Für den Anschluss eines Tacho-Dynamos sind paarweise vedrillte Signalkabel mit einem gemeinsamen Schirm (z.B. ÖLFLEX® SERVO 720 CY) zu verwenden. Der Schirm wird einseitig am Wechselrichter angeschlossen. Einige Hersteller empfehlen zwar die beidseitige Massenverbindung, doch bei Potentialdifferenzen zwischen Antrieb und Umrichter besteht die Gefahr, dass störende Ausgleichsströme über den Kabelschirm fließen.

³⁴ Bildquelle: <http://www.servotechnik.de>

5.4.2 Resolver

Unter einem *Resolver* versteht man einen rotatorischen Lagegeber, bestehend aus einer Erregerwicklung und zwei gegeneinander versetzt angeordneten Messwicklungen. Das Erregersignal im Frequenzbereich von 2 kHz bis 10 kHz wird durch einen "Drehtransformator" auf den Läufer übertragen und von diesem in die Messwicklungen induziert (Abb. 5-7). Als Folge der Rotation werden zwei phasenverschobene Signale generiert. Genutzt werden nur die Hüllkurven, welche in einer Auswerteelektronik weiter verarbeitet werden. Übrig bleiben schliesslich sinus- resp. cosinusförmige Meßsignale, welche die eigentliche Lageinformation enthalten.

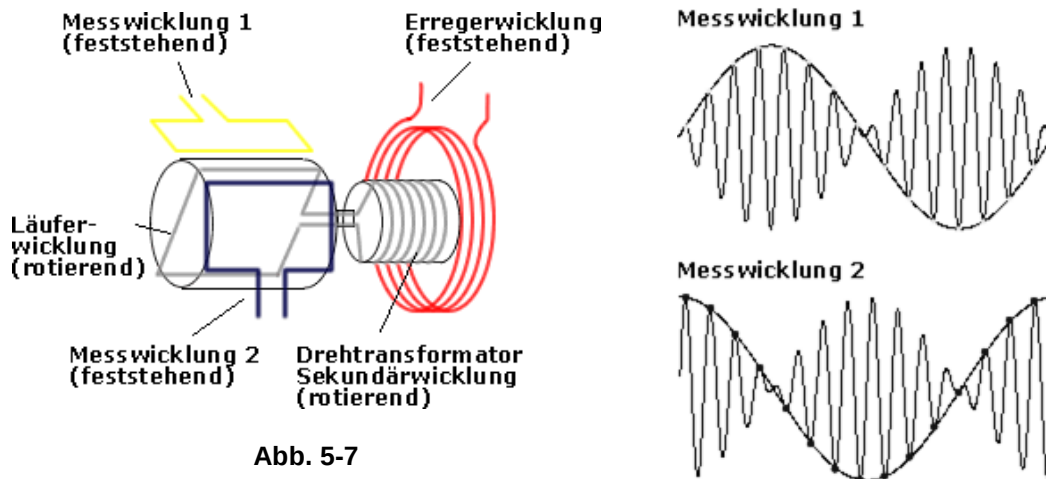


Abb. 5-7
Prinzipieller Aufbau eines Resolvers³⁵

5.4.3 Inkrementalgeber

Verbreitet in der Antriebstechnik sind inkrementale Drehgeber. Es gibt magnetische als auch optische Systeme. Das Messprinzip ist grundsätzlich dasselbe. Pro Umdrehung werden zwei um $\pi/2$ verschobene Signale und ein als Referenz dienender Nullimpuls erzeugt.

a) Zahnradgeber erfassen mit zwei von einem Gleichstrom durchflossenen Induktionsspulen die durch die ferromagnetischen Zähne erzeugten Magnetfeldänderungen. Ihre Auflösung ist geringer als die der optischen Geber, dafür sind sie unkompliziert aufgebaut und äusserst robust.

b) Optische Inkrementalgeber benutzen zur Erzeugung der Impulse eine Strichscheibe. Die um eine Viertelperiode zueinander verschobenen Messsignale (A, B) entstehen in zwei versetzt angeordneten Fototransistoren (Abb. 5-8). Die analogen Signalen werden anschliessend in eine binäre Impulsfolge umgewandelt. Es gibt z.B. Drehgeber mit 1'024 Impulsen pro Umdrehung. Aus der Anzahl der Impulse lässt sich der Drehwinkel berechnen, aus der Phasenverschiebung der Drehsinn. Der Nullimpuls (R) dient zur Referenzierung. In Globo lässt sich so die Rotorposition des Antriebes bestimmen. Bei einem Spannungsausfall gehen die Lageinformationen leider verloren, so dass sich Inkrementalgeber nicht für jede Anwendung eignen.

Fehler im Messkreis lassen sich mit einem Oszilloskop rasch eingrenzen. Spezielle Prüfgeräte sind auch nützlich. Es gibt Phasenwinkel-Messgeräte, die unzulässige Phasenverschiebungen oder fehlenden Spuren anzeigen. Heidenhain bspw. liefert zu den Gebern auch die passenden Prüfgeräte. Ansonsten gilt, dass im Zweifelsfall der Geber ausgetauscht werden muss.

³⁵ Bildquelle: <http://www.servotechnik.de>

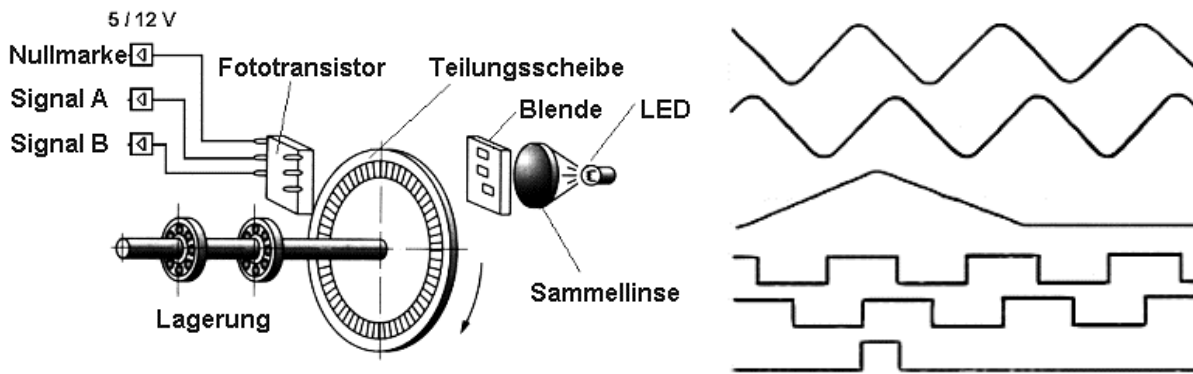


Abb. 5-8

Prinzip des optischen Inkrementalgebers³⁶

5.4.4 Absolutwertgeber

Synchronmotoren für Vektorregelung benötigen absolute Winkelinformationen, weil die Polradlage beim Anfahren des Antriebes bekannt sein muss. Folglich ist eine Geberrückführung erforderlich.

1) *Singleturn*-Absolutwertgeber (Abb. 5-9), welche mit Sinus-Cosinus-Signalen (C, D) arbeiten, besitzen zwei zusätzliche Inkrementalspuren (A, B) und eine Nullspur (Abb. 5-10). Die Periodenlänge der C,D-Spuren ($\lambda = 2\pi$) entspricht exakt einer Wellenumdrehung von 360° .

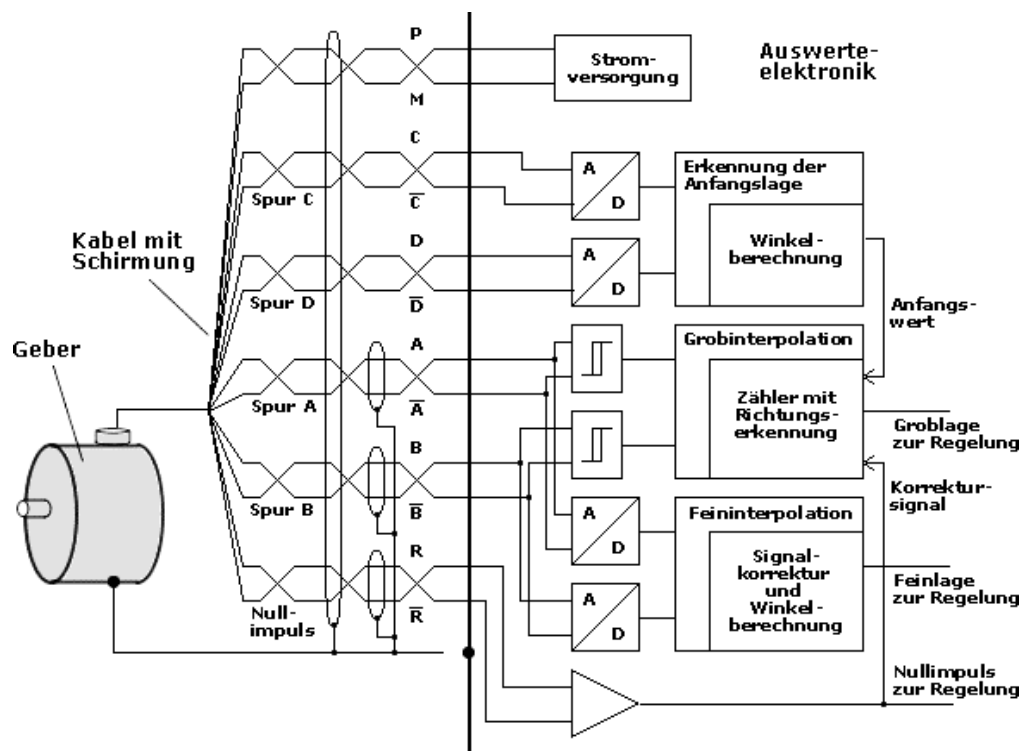


Abb. 5-9

SinCos-Absolutwertgeber³⁷

³⁶ Bildquelle: <http://www.fachlexika.de/technik/mechatronik/>

³⁷ Bildquelle: <http://www.servotechnik.de>

Aus den phasenverschobenen A,D-Spuren lässt sich wie beim Inkrementalgeber die Drehrichtung bestimmen. Der Nullimpuls wird in einer Zählrichtung aufsummiert. Aus diesen Informationen kann die absolute Winkellage errechnet werden.

Für die Übertragung der Gebersignale im obigen Beispiel wird ein geschirmtes Kabel mit min. 6 verdrehten Aderpaaren benötigt. Bei Geberausführungen mit TTL-Pegel (5 VDC) ist ein zusätzliches Aderpaar für die *Sense*-Leitung erforderlich. Über diese Leitung erfasst die Auswertelektronik die Versorgungsspannung am Geber, um so den Spannungsabfall bei großen Leitungslängen ausgleichen zu können.

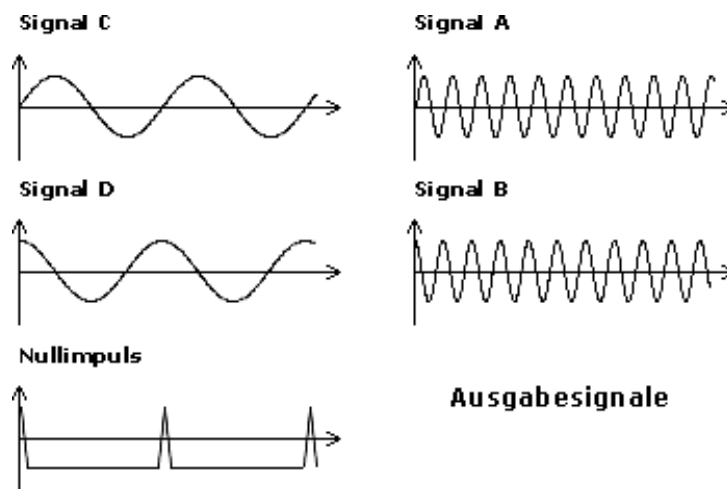


Abb. 5-10

Ausgangssignale eines Singleturn Absolutwertgebers³⁸

Bei einigen Encoderausführungen werden zur Minimierung von leitungsgebundenen Störungen keine groundbezogenen Signale übertragen, sondern Differenzsignale, die sich aus dem primären Signal und einem dazu invertierten Signal generieren lassen. Geeignet für die Datenübertragung ist die serielle Hochgeschwindigkeitsschnittstelle RS-422.

2) Damit Servoregler bei einem Ausfall der Versorgungsspannung die Lage nicht verlieren, benötigen sie absolute Winkelangaben. Absolutwert-Encoder sind auch bei Roboterachsen anzutreffen, deren Lage im Raum nach einem Netzausfall bekannt sein muss, um mit der Arbeit an der richtigen Stelle fortzufahren ohne zuvor referenzieren zu müssen.

Im Kontext werden Drehgeber mit einer Codierscheibe (Absolute shaft encoder) verwendet. Die durch optische oder auch magnetische Abtastung der Scheibe gewonnenen Binärwerte lassen sich einem bestimmten Drehwinkel der Motorachse zuordnen. Üblich sind Scheiben mit einer Gray-Code Signatur (Abb. 5-11).

Der Gray-Code gehört zu den einschrittigen Codes. Beim Wechsel von einem Winkelschritt zum nächsten ändert sich lediglich ein einziges Bit. Mit einer Hamming-Distanz von 1 ist der Gray-Code erheblich störsicherer als bspw. der Dualcode.

Die Ausgangssignale werden über eine serielle Schnittstelle wie z.B. SSI an die Folgeelektronik übertragen.³⁹ Zunehmend finden auch Feldbusse (Profibus, ProfiNet, CANopen, DeviceNet usw.) Verwendung.

³⁸ Bildquelle: <http://www.servotechnik.de>

³⁹ SSI = *Synchronous Serial Interface*, eine Schnittstelle für Absolutwertgeber, die auf dem RS-422 Standard basiert.

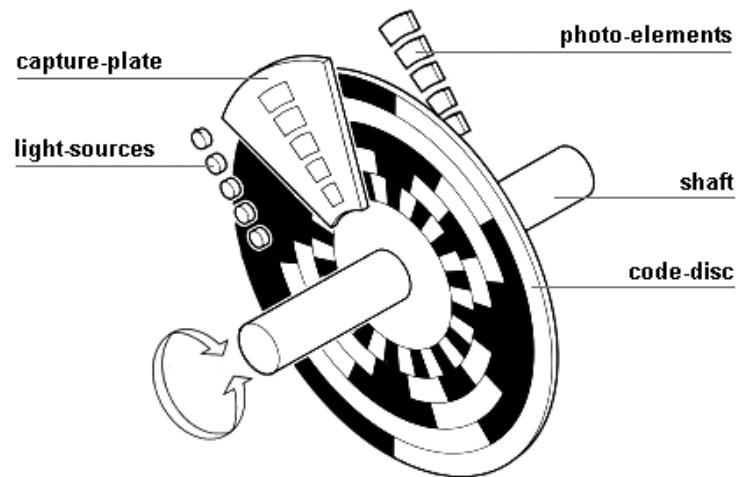


Abb. 5-11
Singleturn Encoder mit 5-Spur Gray-Code⁴⁰

Es gibt auch *Multiturn*-Drehgeber, die über ein Untersetzungsgetriebe grössere Winkel als nur 360° erfassen. Das kann für Positionierantriebe bei grösserem Verfahrensweg ein Kriterium sein.

Im Unterschied zum einfachen Tachodynamo sind für eine erfolgreiche Fehlersuche grundlegende Kenntnisse in digitaler Schaltungstechnik erforderlich. Für den Instandhalter empfehlen sich technische Fachkurse wie sie bspw. vom sfb Bildungszentrum angeboten werden. Der Schreibende erinnert sich an ein Selbststudium mittels Fachbuch und Versuchsplatinen, das er in nächtlichen Stunden im Wohnzimmer absolvierte.

6 Formelanhang

► Die abgegebene Leistung eines dreiphasigen Asynchronmotors, d.h. die Leistung an der Motorwelle, lässt sich aus dem Drehmoment (M) und der Drehzahl (n) mittels folgender Faustformel errechnen:

$$P_2 = \frac{M \cdot n}{9550}$$

P in kW
M in Nm
n in Umdrehungen pro Minute [min⁻¹]⁴¹

Um die aufgenommene Leistung zu erhalten, ist der Wirkungsgrad zu berücksichtigen.

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta}$$

► Das Drehmoment gibt die "Drehstärke" der Motorwelle an. Es handelt sich um ein Kreuzprodukt, weil M als *axialer Vektor* senkrecht auf F und r steht.

$$M = F \times r$$

⁴⁰ Bildquelle: <http://www.fachlexika.de/technik/mechatronik/>

⁴¹ Im angelsächsischen Sprachraum findet sich die Bezeichnung rpm = *revolutions per minute*; auch *rounds per minute*.

Die vom Motor aufgenommene (elektrische) Leistung lässt sich mit der folgenden Formel errechnen:

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

► Bezüglich des Leistungsfaktors sind zwei unterschiedliche Kenngrößen zu unterscheiden:

a) Verschiebungsfaktor (Displacement Power Factor):

$$\cos \varphi = \frac{P}{S_1}$$

b) Leistungsfaktor (True Power Factor):

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

Diese Unterscheidung ist nötig, weil sich in oberwellenbehafteten Netzen ausser der klassischen Verschiebungsblindleistung (Q) die Verzerrungsblindleistung (D) bemerkbar macht (Abb. 6-1).

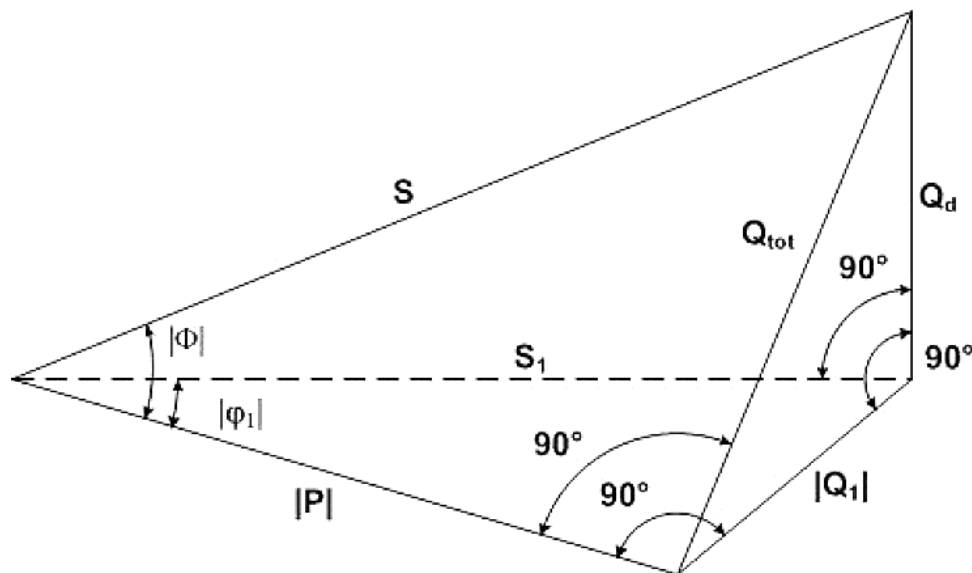


Abb. 6-1

Geometrische Darstellung von Wirk-, Blind- und Scheinleistung

Kommen nur sinusförmige Spannungen und Ströme vor, so ist die obige Unterscheidung obsolet.

► Die Scheinleistung eines drehzahlgeregelten Antriebes setzt sich aufgrund des Oberwellenanteiles aus Wirkleistung (P), Verschiebungsblindleistung (Q_1) und Verzerrungsblindleistung (Q_d) zusammen.

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + Q_d^2}$$

► Der Nennstrom ist derjenige Polleiterstrom, der sich unter Nennlast einstellt. Die zugehörige Drehzahl heisst Nenndrehzahl.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}$$

► Asynchronmaschinen haben einen Schlupf. Die Rotordrehzahl ist etwas kleiner als die Drehzahl des Drehfeldes. Ansonsten entstünde kein Drehmoment.

$$s = [(n_0 - n_N) / n_0] \cdot 100 \%$$

Bei Belastung nimmt der Schlupf zu. Bei Nennlast sind Werte von 3 % bis 5 % üblich.

7 Literaturverzeichnis

7.1 Frequenzumrichter

- Wissenswertes über Frequenzumrichter (Danfoss Handbuch).
- Frequenzumrichter - Die Bibliothek der Technik, Bd. 36 (Verlag Moderne Industrie).

7.2 Antriebstechnik

- Jens Weidauer: Elektrische Antriebstechnik (Publicis Publishing).
- Andreas Binder: Elektrische Maschinen und Antriebe (Springer).
- Uwe Nuß: Hochdynamische Regelung elektrischer Antriebe (VDE).
- Johannes Teigelkötter: Energieeffiziente elektrische Antriebe (Springer Vieweg).
- Edwin Kiel: Antriebslösungen - Mechatronik für Produktion und Logistik (Springer).
- Georg Flegel, Karl Birnstiel, Wolfgang Nerreter: Elektotechnik für Maschinenbau und Mechatronik (Hanser).
- Dierk Schröder: Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen (Springer Vieweg).

7.3 Leistungselektronik

- Rainer Felderhoff, Udo Busch: Leistungselektronik (Hanser).
- Joachim Specovius: Grundkurs Leistungselektronik (Springer Vieweg).
- Gert Hagmann: Leistungselektronik (AULA-Verlag).

7.4 Sensorik

- Stefan Hesse, Gerhard Schnell: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation (Springer Vieweg).
- Herbert Bernstein: Messelektronik und Sensoren (Springer Vieweg).
- Ekbert Hering: Sensoren in Wissenschaft und Technik (Vieweg+Teubner Verlag).
- Stefan Basler: Encoder und Motor-Feedback-Systeme (Springer Vieweg).