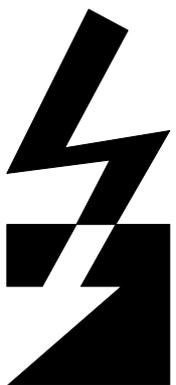


Antriebstechnik im Maschinenbau



RAVEL

Impressum

Autoren:

Benno Jäckle (Kapitel 5)
Schmidhauser AG
Amriswilerstrasse 11
9315 Neukirch-Egnach

Albert Marty (Kapitel 7)
SUVA, Abt. ALM II
Rösslimatt 39
6005 Luzern

Bertil Wallertz (Kapitel 8)
Schaffner Elektronik AG
4708 Luterbach

Hansruedi Wipf (Kapitel 3)
Brütsch Elektronik AG
Nüsatzstrasse 11
8248 Uhwiesen

Oliver Zirn (Kapitel 2)
IWF ETH Zürich
Universitätsstrasse 31
8006 Zürich

Projektleitung und Gestaltung:

Rolf Gloor (Kapitel 1, 4 und 6)
Gloor Engineering
7434 Sufers

RAVEL-Ressortleitung:

Jürg Nipkow, ARENA, Zürich
RAVEL Ressort «Kraft»

Copyright Bundesamt für Konjunkturfragen
3003 Bern, Mai 1995
Auszugsweiser Nachdruck mit Quellenangabe
erlaubt. Zu beziehen bei der Eidg.
Drucksachen- und Materialzentrale (Best.-Nr.
724.333 D)

Vorwort

Das Aktionsprogramm «Bau- und Energie» ist auf sechs Jahre befristet (1990-1995) und setzt sich aus den drei Impulsprogrammen (IP) zusammen:

- IP Bau – Erhaltung und Erneuerung
- RAVEL – Rationelle Verwendung von Elektrizität
- PACER – Erneuerbare Energien

Mit den Impulsprogrammen, die in enger Kooperation von Wirtschaft, Schulen und Bund durchgeführt werden, soll der qualitative Wertschöpfungsprozess unterstützt werden. Dieser ist gekennzeichnet durch geringen Aufwand an nicht erneuerbaren Rohstoffen und Energie sowie abnehmende Umweltbelastung, dafür gesteigerten Einsatz an Fähigkeitskapital.

Im Zentrum der Aktivität von RAVEL steht die Verbesserung der fachlichen Kompetenz, Strom rationell zu verwenden. Neben den bisher im Vordergrund stehenden Produktions- und Sicherheitsaspekten soll verstärkt die wirkungsgradorientierte Sicht treten. Aufgrund einer Verbrauchsmatrix hat RAVEL die zu behandelnden Themen breit abgesteckt. Neben den Stromanwendungen in Gebäuden kommen auch Prozesse in der Industrie, im Gewerbe und im Dienstleistungsbereich zum Zuge. Entsprechend vielfältig sind die angesprochenen Zielgruppen: Sie umfassen Fachleute auf allen Ausbildungsstufen wie auch die Entscheidungsträger, die über stromrelevante Abläufe und Investitionen zu befinden haben.

Kurse, Veranstaltungen, Publikationen, Videos, etc.

Die Ziele werden von RAVEL durch Untersuchungsprojekte zur Verbreiterung der Wissensbasis umgesetzt und – darauf aufbauend – Aus- und Weiterbildung sowie Informationen. Die Wissensvermittlung ist auf die Verwendung in der täglichen Praxis ausge-

richtet. Sie baut hauptsächlich auf Publikationen, Kursen und Veranstaltungen auf. Es ist vorgesehen, jährlich eine RAVEL-Tagung durchzuführen, an der jeweils – zu einem Leitthema – umfassend über neue Ergebnisse, Entwicklungen und Tendenzen in der jungen, faszinierenden Disziplin der rationellen Verwendung von Elektrizität informiert und diskutiert wird. Interessenten können sich über das breitgefächerte, zielgruppenorientierte Weiterbildungsangebot in der Zeitschrift IMPULS informieren. Sie erscheint viermal jährlich und ist (im Abonnement) beim Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern, gratis erhältlich.

Jedem Kurs- oder Veranstaltungsteilnehmer wird jeweils eine Dokumentation abgegeben. Diese besteht zur Hauptsache auf der für den entsprechenden Anlass erarbeiteten Fachpublikation. Die Publikationen können auch unabhängig von Kursbesuchen bei der Eidgenössischen Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ), 3000 Bern, bezogen werden.

Zuständigkeiten

Um das ambitionöse Bildungsprogramm bewältigen zu können wurde ein Organisations- und Bearbeitungskonzept gewählt, das neben der kompetenten Bearbeitung durch Spezialisten auch die Beachtung der Schnittstellen im Bereich der Stromanwendungen sowie die erforderliche Abstützung bei Verbänden und Schulen der beteiligten Branchen sicherstellt. Eine aus Vertretern der interessierten Verbände, Schulen und Organisationen bestehende Kommission legt die Inhalte des Programms fest und stellt die Koordination mit den übrigen Aktivitäten, die den rationellen Einsatz der Elektrizität anstreben, sicher. Branchenorganisationen übernehmen die Durchführung der Weiterbildungs- und Informationsangebote. Für deren Vorbereitung ist das Programmleitungsteam (Dr.

Roland Walthert, Werner Böhi, Dr. Eric Bush, Jean-Marc Chuard, Hans Rudolf Gabathuler, Jürg Nipkow, Ruedi Spalinger, Dr. Daniel Spreng, Felix Walter, Dr. Charles Weinmann sowie Eric Mosimann, BfK) verantwortlich. Die Sachbearbeitung wird im Rahmen von Ressorts durch Projektgruppen erbracht, die inhaltlich, zeitlich und kostenmässig definierte Einzelaufgaben (Untersuchungs- und Umsetzungsprojekte) zu lösen haben.

Dokumentation

Die vorliegende Dokumentation ist eine Zusammenstellung der Referate aus dem RAVEL-Kurs «Maschinenbau und Antriebstechnik: Mehr Wettbewerbs-Chancen mit mehr Energie-Effizienz» für Maschinenkonstrukteure und Verkaufsspezialisten aus der Antriebsbranche.

Nach einer Vernehmlassung ist die vorliegende Dokumentation sorgfältig überarbeitet worden. Dennoch hatten die Autoren freie Hand, unter-

schiedliche Ansichten über einzelne Fragen nach eigenem Ermessen zu beurteilen und zu berücksichtigen. Sie tragen denn auch die Verantwortung für die Texte. Unzulänglichkeiten, die sich in der praktischen Anwendung ergeben, können bei einer allfälligen Überarbeitung behoben werden. Anregungen nehmen das Bundesamt für Konjunkturfragen oder der verantwortliche Projektleiter (siehe Seite 2) entgegen. Für die wertvolle Mitarbeit zum Gelingen der vorliegenden Publikation sei an dieser Stelle allen Beteiligten bestens gedankt.

Juni 1995 Bundesamt für Konjunkturfragen
Dr. B. Hotz-Hart
Vizedirektor für Technologie

Inhaltsverzeichnis

1. Energieeffizienz im Maschinenbau (Rolf Gloor)	7
Beispiele für Energieeffizienz	7
Die fünf Bereiche des Energiesparens	8
Systembetrachtung	8
Lösungsansätze zum Energiesparen	10
2. Spanabhebende Werkzeugmaschinen (Oliver Zirn)	11
Systembetrachtung	11
Prozess-spezifischer Energiebedarf	12
Maschine und Komponenten	12
Leistungs- und Energiebedarf von Werkzeugmaschinen	13
Zusammenfassung	14
3. CNC-Technik (Hansruedi Wipf)	15
Aufbau und Strukturen von CNC's	15
Planungsphasen	17
Produktivitätssteigerungen und Energiesparen	19
Mehr Produktivität durch Sensorik	20
4. Antriebsdimensionierung (Rolf Gloor)	21
Bestimmung der Lastmomente	21
Die Krafterzeugung in einem Motor	22
Statische Antriebsauslegung	23
Dynamische Antriebsauslegung	24
Thermische Auslegung, Überlastung	27
Zusammenfassung	28
5. Frequenzumrichter (Benno Jäckle)	29
Aufbau des Leistungsteils	29
Halbleiterschalter und deren Verluste	30
Verlustleistung von Umrichtern	31
Beispiel: Antriebswirkungsgrad	32
Beispiel: Lüftungsanlage	33
Beispiel: Pumpensteuerung	33
Aufgepasst beim Umrichtereinsatz!	34
Zusammenfassung	34
6. Antriebssysteme (Rolf Gloor)	35
Elektromotor und Verluste	35
Technische Ausführung von Motoren	36
Gleichstrommotor	37
Synchronmotor	38
Asynchronmotor	39
Reluktanzmotor	40
Vergleich von Antriebssystemen	41

7. Sicherheit im Maschinenbau (Albert Marty)	43
Gefahrenanalyse und Integration des Sicherheitskonzepts	43
Internationale Sicherheits-Anforderungen	44
Betriebsarten	44
Sicherheitsmassnahmen	45
Sicherheitssteuerungen	46
Schlusswort	46
8. EMV im Maschinenbau (Bertil Wallertz)	47
Grundbegriffe der EMV	47
EMV-Normen und das CE-Zeichen	47
EMV-Technik	48
Frequenzumformer als EMV-Störquelle	49
Schutzmassnahmen	49
Zusammenfassung	50
Publikationen des Impulsprogrammes RAVEL	51

1. Energieeffizienz im Maschinenbau

Autor: Rolf Gloor

Die Energiekosten einer Industriemaschine sind im allgemeinen gering, bezogen auf die Personal- und Kapitalkosten. Vergleicht man die Energiekosten aber mit dem Gewinn, so sind die Beträge oft nahe zusammen. Intelligente Einsparungen von Elektrizität erhöhen direkt den Gewinn.

Die Wirtschaftlichkeit von Energiesparmassnahmen kann mit folgender vereinfachten Berechnung überprüft werden: Eine Maschine im Einschichtbetrieb läuft 10 000 Stunden während ihrer Nutzungsdauer von 5 Jahren. Bei einer Leistungsaufnahme von 10 kW und einem Strompreis von 10 Rappen pro kWh kostet der Elektrizitätsverbrauch 10 000 Franken.

Für die Einsparung von einem Watt kann ein Franken investiert werden.

Beim Mehrschichtbetrieb und einer längeren Nutzung können es auch 5 Franken pro eingespartes Watt sein.

Es sind aber nicht nur die Kosten, welche für eine energie-effiziente Maschine sprechen. Eine energetisch geschickt konstruierte Maschine ist auch technisch besser. Der Konstrukteur, welcher genau weiss, wann er für den Prozess wieviel Energie braucht, und diese nur dann frei gibt, beherrscht sein Handwerk.



Bild 1) Energieeffizienz im Maschinenbau.

Der Verkäufer, welcher in seinem Angebot einen geringen Stromverbrauch aufführen kann, hat einen Vorsprung gegenüber seinen Konkurrenten.

Beispiele für Energieeffizienz

Beispiel: Spritzgussmaschine

Die Firma ProControl aus Flawil hat einen Spritzgussautomaten für Kunststoffteile energetisch untersucht und verbessert. Die Hydraulikaggregate wurden komplett durch elektrische Servoantriebe (bis 130 Nm Drehmoment) ersetzt. Mit einer Doppelzahnstange und einem Vierpunkt Doppel-Kniehebel wurden 1000 kN Schliesskraft realisiert. Pro Kunststoffteil reduzierte sich der spezifische Energieverbrauch um 50%. Die Maschine benötigt 10 kW weniger Leistung und einen hat viel geringeren Kühlaufwand. Die problematische und teure Entsorgung des Hydrauliköls entfällt. Darüber hinaus, und das ist am wichtigsten, ist die modifizierte Maschine genauer und schneller.

Beispiel: Streckwerk

Bei einer Textilmaschinenart wird der Stoff zwischen treibenden und bremsenden Walzen gestreckt. Das ziehende Walzensystem wird durch einen Drehstrommotor mit Frequenzumrichter angetrieben. Das andere wird mit einer wassergekühlten Magnetpulverbremse gebremst. Bei einer energetischen Überarbeitung der Maschine fand man auf dem Markt ein Frequenzumrichtersystem in Modulbauweise. Der bremsende und der treibende Teil wurden danach mit dem gleichen Antriebssystem ausgeführt. Der eine Motor läuft als Generator und gibt seine

Leistung über den gemeinsamen Gleichstromzwischenkreis der Frequenzumrichter an den treibenden Antrieb ab. Der durchschnittliche Leistungsbedarf der Maschine reduzierte sich von 10 auf 7 kW. Die eingesparten 3 kW entlasten auch die Raumklimatisierung. Die Mehrkosten werden durch die Konstruktionsvereinfachung kompensiert. Zusätzlich vereinfachte und verkürzte sich das Einrichten, da der bremsende Teil auch angetrieben werden kann.

Beispiel: Abfüllanlage

An einer Sackabfüllanlage werden die vollen Säcke auf einem Drehtisch zur automatischen Palettierstation geschwenkt. Bei einer Produktionserhöhung von 400 auf 500 Säcke in der Stunde überhitzte sich der im Start/Stop-Modus betriebene 5.5 kW Drehstrommotor. Nach dem zweiten Ersatzmotor wurde ein 7.5 kW Motor eingebaut. Dieser überhitzte sich noch viel schneller. Eine energetische Grobanalyse ergab, dass der Motor die meiste Energie brauchte um sich selber zu beschleunigen. Dabei erwärmte sich sein Rotor jedesmal mit dem Äquivalent der kinetischen Energie der beschleunigten Massen. Die träge Masse des Motors musste reduziert werden und die Beschleunigung mit geringem Schlupf erfolgen. An der bestehenden mechanischen Konstruktion wurde der zweipolige Asynchronmotor durch einen kleineren vierpoligen 100 Hz Motor mit Frequenzumrichter ersetzt. Der Jahresenergiebedarf für den Drehtisch halbierte sich. Danach war eine Produktionserhöhung auf 560 Säcke pro Stunde möglich.

Beispiel: Schneckenförderer

Ein Schneckenförderer für eine Verbrennungsanlage wird während 8600 Jahresstunden über ein Schneckengetriebe mit $i = 45$ und einen 5.5 kW Drehstrommotor angetrieben. Das Getriebe verheizte fast die Hälfte der Motorleistung. Durch den Einsatz eines Zykloidengetriebes genügte ein 4 kW Motor. Statt 50 000 sind nur noch 35 000 kWh

Elektrizität pro Jahr nötig. Die Mehrkosten gegenüber dem alten Antriebssystem betragen 1200 Franken. Pro Jahr werden aber bei einem Strompreis von 10 Rappen pro kWh 1500 Franken eingespart. Das bessere Getriebesystem zahlt sich also in weniger als einem Jahr.

Die fünf Bereiche des Energiesparens

1. System: In der Wahl des energieoptimalen Systems liegen die grössten Energiesparmöglichkeiten. Es ist zum Beispiel energetisch viel effizienter Schüttgut auf Förderbändern als mit Luft zu fördern.

2. Steuerung: Oft kostet es praktisch nichts, Komponenten abzuschalten wenn sie nicht benötigt werden. Mit drehzahlvariablen Antrieben kann zum Beispiel bei der Flüssigkeitsförderung bedarfsgerecht geliefert werden.

3. Auslegung: Überdimensionierung hat nichts mit besserer Qualität zu tun und kostet Geld. Ein zu grosser Motor erfordert zum Beispiel auch ein zu grosses Getriebe dieses wieder ein stärkeres Fundament.

4. Komponentenwahl: Bei Energiesparmassnahmen denkt man vordergründig an den Einsatz von teuren Komponenten mit einem hohen Wirkungsgrad. Vorallem bei Anwendungen mit langer Betriebsdauer haben diese «besseren» Komponenten ihre Bedeutung.

5. Unterhalt: Ein abgenützter Keilriemen oder ein nicht nachkalibrierter Temperatursensor verschwendet nicht nur Energie, sondern kann auch die Prozessqualität verschlechtern. Für den Konstrukteur bezieht sich der Unterhalt nicht nur auf die Betriebsanleitung sondern auch auf Anzeigergeräte und wartungsfreundliche Einrichtungen.

Systembetrachtung

Es gibt einige Beispiele für etablierte Energiespar-Anstrengungen. Die eindrucklichsten ergeben sich beim Antrieb mit unserer Muskelkraft oder mit einer Batterie. Wenn wir ein Velo mit einem Motorrad vergleichen, sehen wir, welche konstruktiven Anstrengungen beim Gewicht und der Reibung im Kraftübertragungssystem unternommen wurden. Ein normaler Tischcomputer würde mit der Batterie eines ebenbürtigen Notebook-Computer nach zehn Minuten den Geist aufgeben. Obwohl diese Beispiele mit dem Maschinenbau nicht allzuviel zu tun haben, zeigen sie, dass die grössten Sparmöglichkeiten in der Grundkonstruktion liegen.

Man kann Maschinen und Anlagen vergleichen, indem man die Leistungsaufnahme im Leerlauf und bei Last misst. Eine Wasserpumpe braucht mit Wasser viel mehr Leistung als ohne Wasser. Bei einer Werkzeugmaschine wird das Wattmeter etwas ansteigen, wenn gearbeitet wird. Eine Verpackungsmaschine oder ein Roboter brauchen ohne Werkstück nahezu gleichviel Strom wie mit Werkstück.

Nach einem Grundgesetz der Physik geht keine Energie verloren. Was als Energie in eine Maschine hineingesteckt wird, kommt wieder heraus, sonst würde sich die Maschine mit der Zeit ja überhitzen. Die Energie (vor allem Wärme), welche die Maschine abgibt, ist aber meistens nichts wert, da sie nicht genutzt wird, oder sogar noch aufwendig abgeführt werden muss.

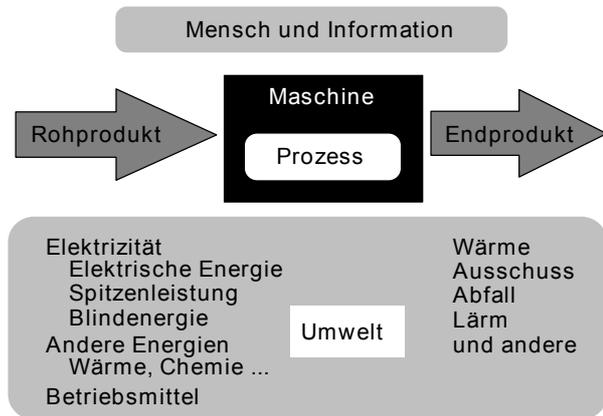


Bild 2) Energiebilanz einer Maschine.

In vielen Anwendungen ist eine bestimmte Energie für den Prozess notwendig. Für eine komplizierte Bearbeitungsmaschine ist die Verwendung des Begriffs Wirkungsgrad nicht sehr sinnvoll. Energetisch ist der Ausdruck Nutzungsgrad (der durchschnittliche Wirkungsgrad) besser. Wenn eine Maschine in einem Zyklus von 10 Sekunden für 2 Sekunden mit einem Wirkungsgrad von 50% arbeitet so kann der Nutzungsgrad bei 15% liegen. Der Einrichtbetrieb und die Stillstandszeiten reduzieren den Nutzungsgrad nochmals.

Eine andere Betrachtungsweise konzentriert sich auf die Energieverluste. Die Verluste fallen an verschiedenen Teilen der Maschine an. Zum einen sind es die Prozessverluste wie beim Zerspanen eines Werkstückes. Zum anderen entstehen die Maschinenverluste vor allem durch Reibung und in den Hilfsaggregaten. Elektrische Verluste erwärmen die Motoren, Kabel, Steuerungen, Trafos, Schalter und Sensoren. Zusätzliche Verluste verursachen die Beleuchtung, die Klimatisierung und natürlich auch Produktionsausschuss und eine schlechte Maschinenauslastung.

Kennlinien verschiedener Prozesse
Den verschiedenen Grundprozesse kann man Kennlinien in bezug auf Leistung und Geschwindigkeit (Drehzahl) zuordnen. Folgende vier Gruppen, unterscheiden sich um jeweils eine Potenz:

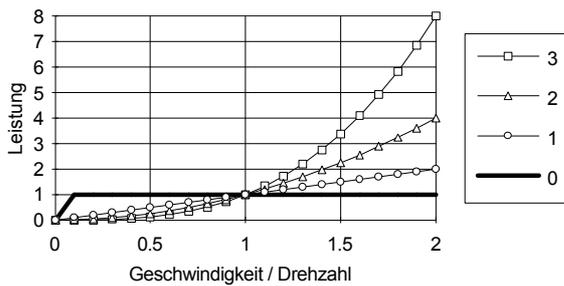


Bild 3) Kennlinien verschiedener Prozesse.

0. Potenz: Ab einer gewissen Drehzahl konstante Leistungsaufnahme bei spanabhebender Bearbeitung wie Bohren, Fräsen, Drehen und beim Zentrumswickler.

1. Potenz: Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt beim Lift, Kran und bei der Gleitreibung die Leistung proportional zu.

2. Potenz: Bei der laminaren Strömung nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit die Leistung quadratisch zu. Dieser Effekt ist bei Feinfiltern und hydrodynamischen Lagern zu beobachten.

3. Potenz: Am häufigsten nimmt die Leistung mit der Geschwindigkeit kubisch zu. Zum Beispiel bei turbulenten Strömungsverhältnissen in Gebläsen, Pumpen und bei der Positionierung.

Lösungsansätze zum Energiesparen

1. Konzentration auf die Energiefresser: Energie ist Leistung mal Zeit. Eine kleine Pumpe mit 100 Watt Leistung, welche rund um die Uhr läuft, braucht mehr Energie als eine 2 kW Spindel, welche eine Stunde pro Tag läuft.

2. Optimaler Prozess für die Aufgabe: Für die Lösung einer Aufgabe gibt es verschiedene Möglichkeiten. Zum Beispiel braucht das Fräsen von Stahl etwa 30 mal weniger spezifische Energie als das Schleifen oder 100 mal weniger als die Funkenerosion.

3. Reduktion der Reibung: Maschinen mit einer hohen Leerlaufleistung haben oft hohe Reibungsverluste. Die Reibung kann mit reibungsarmen Kontaktstellen (Beispiel: Wälz-

lager statt Gleitlager) und bei schnellen Oberflächen mit strömungsoptimalen Formen reduziert werden.

4. Reduktion der bewegten Massen: Komponenten, welche oft die Geschwindigkeit ändern, sollten möglichst leicht sein. Durch die Materialwahl, zum Beispiel Aluminium statt Stahl, die Form, zum Beispiel Wabenprofil statt Vollprofil, kann die Masse reduziert werden. Zusätzlich kann durch verteilte Antriebe und durch Direktantriebe eine erhebliche Vereinfachung realisiert werden.

5. Prozessgrößen dem momentanen Bedarf anpassen: Viele Komponenten an einer Maschine arbeiten mehr, als nötig ist. Zum Beispiel regelt eine Zustellachse seit dem Einrichten auf der gleichen Position, obwohl sie geklemmt und abgeschaltet werden könnte. Ein anderes Beispiel ist bei vielen Hydraulikaggregaten zu finden, welche die überschüssige Energie über einen Bypass vernichten, anstatt die Förderleistung dem Bedarf anzupassen.

6. Antriebskonzepte auch energetisch auswählen: Es ist nicht egal, welches Antriebssystem gewählt wird. Am besten ist der Elektroantrieb und das Getriebe. Diese erreichen zusammen einen Wirkungsgrad von 50 bis 90%.

Der Hydraulikantrieb wandelt dreimal die Energie. Vom Elektromotor in die Pumpe und dann in den Hydraulikantrieb. Gute Systeme erreichen einen Wirkungsgrad von 50%. Am schlechtesten sieht es mit der Pneumatik aus. Zur dreifachen Energie wandlung kommt die Abwärme der Luft bei der Kompression dazu. Ein Pneumatiksystem übersteigt selten einen Wirkungsgrad von 5%.

7. Maschinenumgebung mit einbeziehen: Eine Maschine ist energetisch nicht nur mit ihrem elektrischen Anschluss mit der Umgebung verknüpft. Nebst den anderen direkten Energieanschlüssen wie Öl, Gas, Druckluft, Hydraulik, Heizung und Kühlung beeinflusst sie das Klima in ihrer Umgebung. Um aus einer warmen Maschinenhalle 2 kW herauszukühlen braucht es zusätzlich 1 kW Strom.

8. Anwender mit einbeziehen: Viele Maschinen werden nicht abgeschaltet, weil es eine kleine Ewigkeit geht, bis sie betriebsbereit sind. Dem Unterhalt dient eine dauernde Leistungsmessung mit Trendauswertung als Wartungsanzeige und Störungsindikator.

9. Energiebilanz: Wenn Massen dauernd beschleunigt und abgebremst werden, so wird die Bremsenergie meistens in Wärme umgewandelt. Bei Systemen mit mehreren Achsen können diese die Energie unter sich austauschen. Für grösser Antriebe gibt es auch die Möglichkeit der Netzzurückspeisung. Wo möglich, sollte wenigstens die Abwärme einer Maschine zum Beispiel für Warmwasser genutzt werden.

10. Leistungskoordination: Wenn in einer Fabrik mehrere Maschinen in Betrieb sind, oder in einer Maschine mehrere Antriebe, so kann mit einem gestaffelten Einschalten und einer gegenseitigen Verriegelung die Leistungsspitze gebrochen werden. Die Kommunikation unter den Maschinen und zum Leitsystem sollte auch die Energie berücksichtigen. Zum Beispiel könnte ein

Handlingroboter jeweils erst kurz vor dem Bearbeitungsende eingeschaltet werden.

2. Spanabhebende Werkzeugmaschinen

Autor: Oliver Zirn

Der Energiebedarf von Werkzeugmaschinen stellt eine bislang wenig beachtete Einflussgrösse für deren Produktivität dar. Es bieten sich jedoch eine Vielzahl von Möglichkeiten, den Energiebedarf eines Maschinenparkes zu minimieren. Hierzu werden ausgehend von der zentralen Bearbeitungsaufgabe der Spanbildung die energetischen Zusammenhänge an Werkzeugmaschinen aufgezeigt. Neben der energie-optimalen Betriebsführung von Werkzeugmaschinen werden vor allem weitergreifende Änderungen in der Konstruktion und im Antriebsentwurf, welche teils parallel zu neuen Fertigungstechnologien wie der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung verlaufen können, den Energie- und Leistungsbedarf bei gleichzeitiger Produktivitätssteigerung verringern.

Es darf erwartet werden, dass die energetische Optimierung zukünftig einen wichtigen Anteil an der Produktivität und damit an der Konkurrenzfähigkeit moderner Werkzeugmaschinen darstellt.

Die energetische Betrachtung von Werkzeugmaschinen bedeutet vorwiegend die Betrachtung des elektrischen Energiebedarfes, da die Wandlung in mechanische Arbeit heute fast immer direkt oder indirekt aus elektrischer Energie erfolgt. Der Bedarf an elektrischer Energie der gesamten Schweizer Maschinenindustrie betrug 1993 rund 2800 GWh, welche naturgemäss überwiegend in Hochlastzeiten – und damit auch Hochtarifzeiten – angefordert wurden. Bei Einschichtbetrieb entspricht diese Energie einem unterbrochenen Band von rund 1,4 GW elektrischer Leistung. Demnach bedarf es zur Bereitstellung der von der Maschinenindustrie benötigten elektrischen Energie der Leistung mehrerer grosser Kraftwerksblöcke.

Diese vereinfachte Darstellung macht bereits deutlich, dass bei der Ausschöpfung der Energiesparpotentiale neben der Minimierung des Energie- und Primärenergiebedarfes auch die Begrenzung der bereitzustellenden Leistung als vorrangige Ziele zu betrachten sind.

Systembetrachtung

Die Herstellung industrieller Güter kann in metabolische Prozesse, die zur Herstellung der Grundstoffe dienen, und morphologische Prozesse, welche Formgebung und Oberflächenbearbeitung bewerkstelligen, unterteilt werden. Die Kosten je Herstellungseinheit der morphologischen Prozesse liegen deutlich über denen der metabolischen Prozesse. Dagegen liegt der Energiebedarf der metabolischen Herstellungsprozesse bezogen auf eine Herstellungseinheit deutlich über dem Energiebedarf der nachfolgenden morphologischen Arbeitsschritte, was in diesen Bereichen bereits früh einen Optimierungsdruck im Hinblick auf die spürbaren Energiekosten erzeugte. Zudem liegt damit ein zusätzlicher Ansatzpunkt bei der Energie-Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Minimierung der zur Maschinenherstellung benötigten Energie (sogenannte «graue Energie»).

In diesem Gesamtfeld tragen die spanabhebenden Werkzeugmaschinen einen grossen Anteil der Produktivität morphologischer Herstellungsprozesse. Der Energiebedarf dieser Maschinen stellt dabei einen Anteil am Herstellungsaufwand dar, wobei der Leistungsbedarf dem fixen und der Energiebedarf dem variablen Herstellungsaufwand zugerechnet wird.

Der Energiebedarf einer Werkzeugmaschine wird in Zukunft neben Bearbeitungspräzision und Bearbeitungsleistung einen massgeblichen Einfluss auf die Produktivität – und damit nicht zuletzt auf die Konkurrenzfähigkeit – einer Werkzeugmaschine haben.

Prozess-spezifischer Energiebedarf

Die qualitative Aufteilung der Energie, die zur Spanbildung benötigt wird, ist in Bild 1 dargestellt. Im Sinne einer hohen Werkzeugstandzeit sind die Reibungsverluste durch geeignete Prozessparameter wie Schnittgeschwindigkeit, Werkzeuggeometrie, und Zustellung gering zu halten, so dass ca. 80% der mechanischen Hauptspindleistung zur Spanbildung genutzt werden können. Die Schnittgeschwindigkeit bewegt sich bei konventionellen Verfahren zwischen 3 und 200 m/min, beim Hochgeschwindigkeitsfräsen in Stahl bis ca. 1500 m/min und bei Aluminium bis 5000 m/min. Der erzielbare Volumenabtrag liegt dabei bei 80 .. 160 cm³/min bis zu 1600 cm³/min.

Den verschiedenen abtragenden Bearbeitungsverfahren können die in Tab. 1 dargestellten spezifischen (volumenbezogenen) Energiewerte zugeordnet werden.

Prozess	Benötigte Energie zur Spanbildung
---------	-----------------------------------

Drehen, Fräsen, Bohren	1..3	J/mm ³
Schleifen	30..60	J/mm ³
Funkenerosion	100..200	J/mm ³
Elektroerosion	200..500	J/mm ³

Zum Vergleich:

Schneiden/Stanzen	0,5..3	J/mm ²
Biegen	..1	J/mm ²

Tab. 1) Die benötigte Energie zur Spanbildung variiert zwischen 1 und 500 J/mm³.

Maschine und Komponenten

Üblicherweise werden die Komponenten moderner Werkzeugmaschinen in die Bereiche Gestelle, Führungen und Lager, Antriebe sowie Steuerungen unterteilt.

Im Bereich der Gestelle liegen die Energieparpotentiale beim Einsatz von Materialien geringen Energiegehaltes. Zudem müssen Gewichtseinsparungen – insbesondere im Hinblick auf die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung an bewegten Maschinenteilen – bei gleichzeitig höherer Steifigkeit durch eine weiter verbesserte oder gegebenenfalls alternative Konstruktion erreicht werden. Ein eindrückliches Beispiel hierfür ist die Oktahedral-Hexapod-Fräsmaschine nach dem «Flugsimulator-Prinzip», welche eine hohe Steifigkeit und einen grossen Arbeitsraum mit geringem Gewicht und postulierbarem thermischen Verhalten verbindet.

Eine wichtige und analytisch schwer

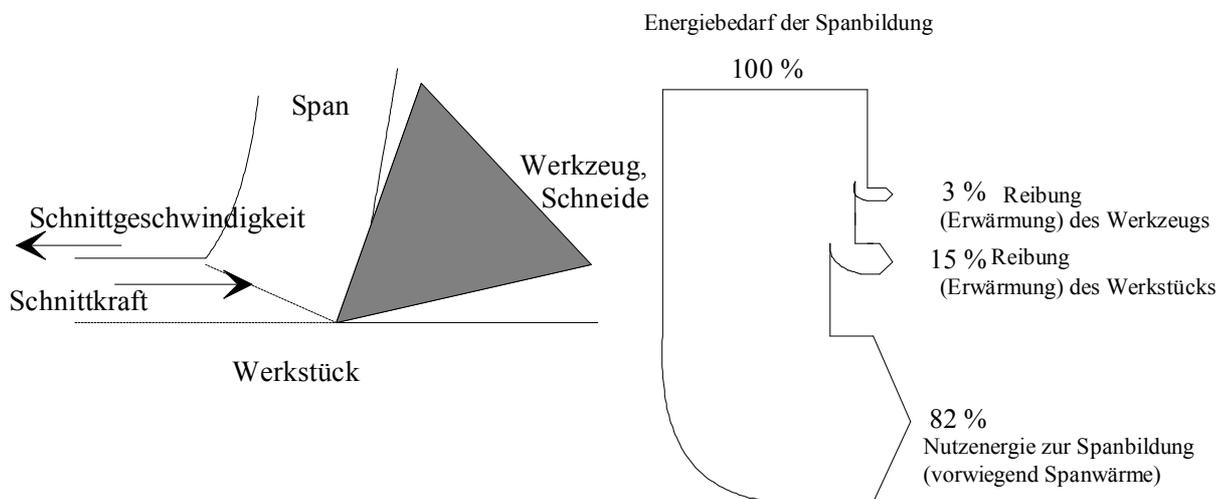


Bild 1) Energiefluss beim Zerspanprozess

handhabbare Einflussgröße für die Genauigkeit und damit für die Produktivität einer Maschine ist die thermische Stabilität. Die gängige Praxis des Warmlaufenlassens vor Produktionsbeginn ist ein energetisch unsinniger und in thermischer Hinsicht schlechter Kompromiss, da die Maschine über die Hilfsantriebe und nicht über die im Prozess wirksamen Wärmequellen beheizt wird. Abhilfe kann hier eine optimierte Konstruktion mit kleinen Wärmekapazitäten, kleinen Wärmewiderständen und geschickt platzierten Wärmequellen bieten. Neben der heute immer öfter angewandten steuerungsseitigen Kompensation der Wärmeausdehnung bietet sich eine gezielte Erwärmung oder Flüssigkühlung bestimmter Bauteile als energetisch sinnvolle Alternative an.

Im Bereich der Führungen und Lager kann durch geringere Reibung und verschleissarme Komponenten der Energiebedarf nebst Lebensdauer verbessert werden.

Die Antriebe und Antriebskomponenten müssen einem hohen Wirkungsgrad besitzen. Hierbei ist vor allem die Nutzbremmung anstelle der Widerstandsbremmung in Verbindung mit einer möglichst kleinen

kinetischen Gesamtsystemenergie der Achsen zu erwähnen. Zudem sollten die Antriebsketten auch im Hinblick auf die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung mit möglichst geringen Trägheiten behaftet sein. Hierbei können Kugelgewindetriebe hoher Steigung oder, soweit vom Prozess her möglich, Direktantriebe zum Einsatz kommen. In Bild 2 sind die energetischen Verhältnisse dreier Vergleichsachsen für einen Beschleunigungsvorgang dargestellt.

Steuerungsseitig sind je nach Prozess und Maschinenumgebung verschiedene Einsparmöglichkeiten gegeben. Bei der Programmerstellung muss durch Abstimmung der Antriebe der Leistungsbedarf minimiert und die Widerstandsbremmung soweit möglich vermieden werden.

Der Energie- und Leistungsbedarf eines Maschinenparkes hängt neben dem Energiebedarf des Bearbeitungszyklusses zusätzlich noch wesentlich von den Aktivitäten der Bediener und der «Gleichzeitigkeit» der Herstellungsperioden beziehungsweise Lastspitzen ab. Im Bereich der Steuerung des Gesamt-Maschinenparkes können durch verbesserte Abstimmung der Arbeitsschritte und die Minimierung von Pausen- und Leerlaufzeiten deutliche Arbeits- und Leistungseinsparungen erzielt werden. Hierbei kann mit den heute zur Verfügung stehenden Simulationswerkzeugen eine weitgehende Optimierung mit Hilfe von Maschinenparkmodellen vorgenommen werden.

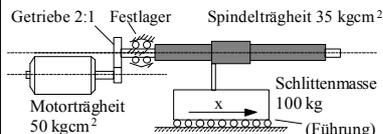
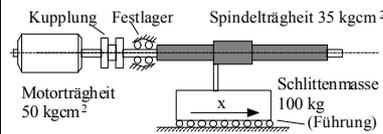
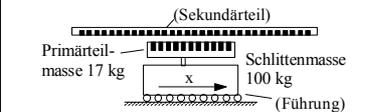
Beispielachse (Skizze)	Beschleunigungszeit auf 0,5 m/s	Ohmsche Beschleunigungsverluste	Gesamtsystemenergie Schlittenenergie
<p>Kugelgewindtrieb (10 mm Steigung)</p>  <p>Getriebe 2:1 Festlager Spindelträgheit 35 kgcm² Motorträgheit 50 kgcm² Schlittenmasse 100 kg (Führung)</p>	0,065 s	130 J	$\frac{1160 \text{ J}}{12,5 \text{ J}} = 92,8$
<p>Kugelgewindtrieb (32 mm Steigung)</p>  <p>Kupplung Festlager Spindelträgheit 35 kgcm² Motorträgheit 50 kgcm² Schlittenmasse 100 kg (Führung)</p>	0,017 s	34 J	$\frac{48 \text{ J}}{12,5 \text{ J}} = 3,84$
<p>Direktantrieb (Maximalkraft 2000 N)</p>  <p>(Sekundärteil) Primärteilmasse 17 kg Schlittenmasse 100 kg (Führung)</p>	0,03 s	30 J	$\frac{15 \text{ J}}{12,5 \text{ J}} = 1,2$

Bild 2) Gegenüberstellung der Beschleunigungsverluste und der Systemenergien verschiedener Vorschubantriebs-Konfigurationen.

Leistungs- und Energiebedarf von

Leistungs- und Energiebedarf von

Werkzeugmaschinen

Grundsätzlich kann eine immer weiterschreitende Erhöhung der installierten Leistung von CNC-Maschinen festgestellt werden. Die Hersteller erhöhen die Leistungsreserven der Maschinen möglicherweise, weil dies – richtig oder falsch – eine Forderung des Marktes zu sein scheint. Dagegen ist heute die mittlere Leistung P_m während eines Herstellungszyklus in 80% der Fälle kleiner als die halbe gesamte installierte Leistung.

Die Wahl grösser dimensionierter Motoren erzwingt eine höhere Dimensionierung für die gesamte elektrische Antriebskette. Ebenso müssen die mechanischen Übertragungsglieder und die Strukturbauteile stärker und damit zunächst schwerer dimensioniert werden. Dadurch wird die ganze Maschine aber auch teurer.

Anteil der installierten Leistung	Hauptspindel-leistung	Achs-vor-schub	Hilfsan-triebe
Fräsmaschine	51%	37%	12%
Bearbeitungszentrum	38%	38%	24%
Lehrenbohrwerk	49%	36%	15%
Horizontal-Drehmasch.	66%	22%	12%
Vertikal-Drehmaschine	72%	21%	7%
HSM-Fräsmaschine	20..40%	50..60%	10..20%
Schleifmaschine	40..60%	ca.20%	ca. 30%

Tab. 2) Aufteilung der installierten Leistung für

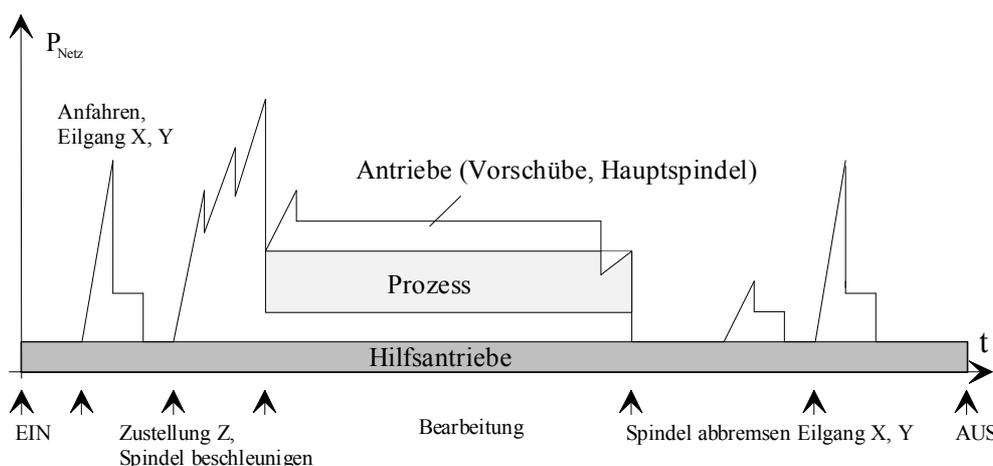


Bild 3) Qualitative Darstellung der Leistung und Arbeit während eines Bearbeitungsvorgangs.

verschiedene Werkzeugmaschinen.

Das Gewicht der Maschinen nimmt exponentiell mit der installierten Leistung zu. Für Horizontaldrehmaschinen kann näherungsweise ein quadratischer Zusammenhang zwischen Maschinengewicht und installierter Leistung angegeben werden.

In Bild 3 ist der Netzleistungsverlauf einer Fräsmaschine qualitativ für einen Bearbeitungsvorgang dargestellt. Die Aufteilung auf die verschiedenen Antriebsarten zeigt deutlich den geringen Anteil der eigentlichen Bearbeitungsenergie am Gesamtenergiebedarf. Der Energieanteil, der tatsächlich im Laufe einer Arbeitsschicht zur Spanbildung aufgewandt wird, liegt heute in den meisten Fällen deutlich unter 25% des Gesamtenergiebedarfes.

Die Hilfsantriebe haben trotz kleiner installierter Leistung einen erheblichen Anteil am Energiebedarf, so dass durch entsprechende bedarfsorientierte Steuerung dieser Antriebe eine spürbare Reduktion des Energieverbrauches erzielbar sein wird.

Um zukünftig im Bereich der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung entsprechende Bahn Genauigkeiten zu erhalten, werden bis an die physikalische Machbarkeitsgrenze optimierte Vorschubantriebe eingesetzt werden, deren Leistungs- und Energiebedarf grösser als der Bedarf der Hauptspindel sein kann. Dennoch

ist diese Leistung keine «Verlustleistung», sondern ein wesentlicher Bestandteil der Hauptaufgabe der Werkzeugmaschine für das schnelle Zerspanen mit hoher Genauigkeit, d.h. höchster Produktivität.

Zusammenfassung

In Anbetracht des heute noch sehr niedrigen Energiepreisniveaus in den meisten Industrieländern wird die nachträgliche energetische Optimierung eines bestehenden Maschinenparks nur im Bereich der Betriebsführung rentabel und sinnvoll sein. Für künftige Generationen von Werkzeugmaschinen darf jedoch erwartet werden, dass die Miteinbeziehung energetischer Aspekte eine auch vom Käufer geforderte Bedingung sein wird, und damit neben Leistung und Präzision einen massgeblichen Anteil an der Konkurrenzfähigkeit und der Produktivität einer Werkzeugmaschine haben wird.

3. CNC-Technik

Autor: Hansruedi Wipf

Was wäre eine moderne Werkzeugmaschine ohne CNC-Steuerung? Nebst den ausgewiesenen Vorteilen mangelt es vielen automatisierten Maschinen an einigen Funktionen, welche mit handbetriebenen Maschinen möglich waren. Dazu gehört das Abschalten der Maschine während einer kurzen Produktionspause, das Festklemmen von Achsen, welche nicht bewegt werden und die prozessoptimale Vorschubregelung (Geräusch, Beobachtung der Spanbildung ...).

Mit der CNC-Technik sind solche Funktionen nur möglich, wenn sie der Maschinenhersteller vorsieht. Der Endanwender kann nur noch die Möglichkeiten nutzen, welche er über die CNC-Steuerung erreicht. In diesem Beitrag wird versucht, die Vielfalt um den Bereich der CNC-Technik zu gliedern und Energiesparmöglichkeiten aufzuzeigen. Es zeigt sich, dass die grössten Potentiale in der Planung der Maschinen liegen. Eine Konstruktion, welche auch auf die rationelle Verwendung von Elektrizität ausgerichtet ist, führt zu einer leistungsfähigeren Maschine.

Aufbau und Strukturen von CNC's

Ein CNC-Steuerungs-System lässt sich in drei Funktionsebenen unterteilen (Bild 1):

MMI: Das Mensch-Maschine-Interface übernimmt alle Aufgaben im Bereich der Bedienung, Datenvisualisierung und Kommunikation mit den peripheren Einheiten und der Datenaufarbeitung.

NCP: Im NC-Kern werden in den einzelnen Funktionsmodulen alle Echtzeitfunktionen gesteuert. Die beiden Komponenten des NCP's sind: NCI, der NC-Interpreter, zuständig für die Ablaufsteuerung der

Bearbeitungsprogramme und Zyklen. AXM, der Achsen-Manager, in dem die Interpolationsdaten für alle NC-Achsen generiert werden.

PLC: Die speicherprogrammierbare Anpass-Steuerung (SPS), in welcher alle Steuerungs- und Überwachungsaufgaben der Maschinenperipherie wahrgenommen werden.

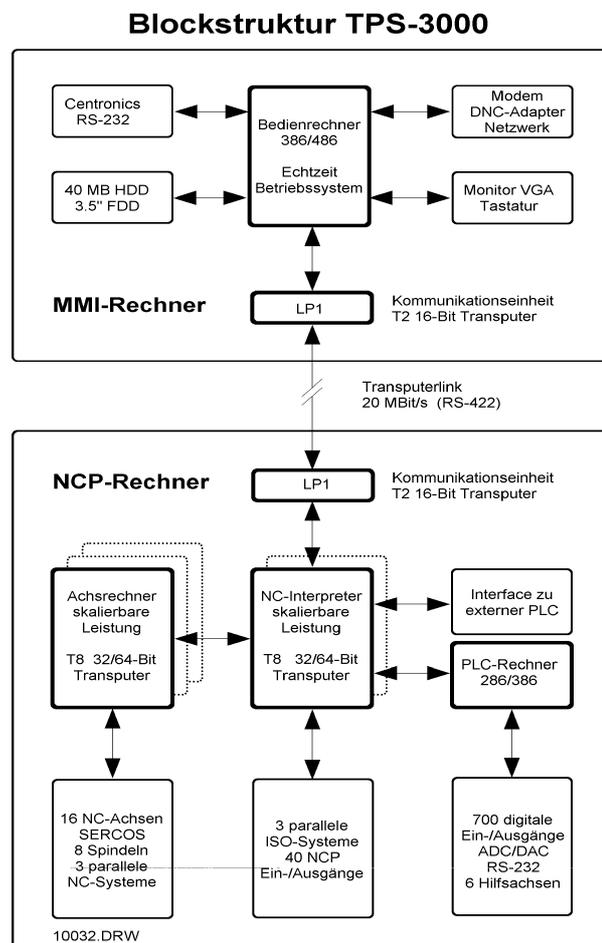


Bild 1) Funktionsebenen einer CNC-Steuerung.

Preisklassen von CNC's

Die Möglichkeiten, ein CNC-System in allen Belangen optimal an eine Maschine anzupassen, sind abhängig von der jeweiligen CNC-

Struktur. Bis zu einem gewissen Grad sind die Möglichkeiten proportional zum Preis einer CNC-Steuerung, so dass eine grobe Unterteilung in die folgenden drei Preisklassen gemacht werden könnte:

Lowcost-CNC: Eine Lowcost-CNC ist eine Steuerungen für bis zu 3 NC-Achsen welche in einfachen Fräsmaschinen und Kreuztischen eingesetzt wird. Es gibt feste Funktionsstrukturen und vorgegebene anwendungsspezifische Zyklen. Die Werkstückprogrammierung erfolgt nach DIN 66025 oder vorgegebenen Zyklenfunktionen. Für Sonderfunktionen stehen nur geringe Adaptionmöglichkeiten zur Verfügung. Die Bedienerstrukturen für Hand, Automatik und Programmieren sind fest vorgegeben. Die typische Leistungsdaten sind: Blockzykluszeiten 20-100 ms, Interpolations- und Lagereglertakt 10-20 ms.

Medium-CNC: Die Medium-CNC ist ausbaubar bis etwa 6 NC-Achsen. Mehrkanalstrukturen mit unabhängigen Interpolatoren sind möglich. Die Standardvarianten für Fräsen, Drehen, Schleifen usw. sind verfügbar. Getrennte Funktionsebenen MMI, NC, SPS inklusive programmierbarer Applikationsschnittstellen sind vorhanden.

Als MMI-Funktionen sind die Bedienerstrukturen und der Bildaufbau fest vorgegeben. Die Möglichkeiten mit NC-Befehlen einfache Text- und Dialogfenster zu realisieren sind gegeben. Von den NCP-Funktionen sind die Werkstückprogrammierung ISO Code nach DIN 66025 oder Zyklenfunktionen möglich. Ein erweiterter Befehlssatz für Ablaufsteuerungen und Subroutinen ist vorhanden. Eine lineare 3-Achsen und Kreis-Interpolation ist Standard, höhere Interpolationsarten sind zum Teil verfügbar. Typische Leistungsdaten sind: Blockzykluszeiten 10-50 ms, Interpolations- und Lagereglertakt 5-15 ms. Eine integrierte SPS mit NC-Windowsschnittstelle bildet die PLC-Funktionen.

High End-CNC: Die High End-CNC hat offene Strukturen für das Applikationsengineering auf den Ebenen MMI, NCP und

PLC (Bild 2). Dadurch ergeben sich flexible Hardwarestrukturen für skalierbare Rechnerleistungen. Der vermehrte Einsatz von PC-Hardware beim MMI-Rechner wird möglich. Multiprozessorfähige NC-Systeme lassen den flexiblen Ausbau von NC-Achsen zu. Die Mehrkanalstrukturen mit unabhängigen Interpolatoren ermöglichen Varianten bis 5-Achsen-Fräsen, Mehrspindeldrehen, Schleifen usw. Die offenen Programmchnittstellen für die Integration an Sondermaschinen sind vorhanden.

Die MMI-Funktionen basieren auf Standardstrukturen sowie projektierbaren maschinenspezifischen Benutzeroberflächen. Standardisierte Multitasking-Betriebssysteme ermöglichen die Integration von eigenständigen Programmen (MS-DOS, Windows, UNIX usw.) sowie maschinenspezifische Programmiersysteme (WOP und AVOR), graphische Simulationsprogramme und CAD-Systeme. DNC-Erweiterungen mit direkter LAN-Ankopplung (PC-LAN, Ethernet) sowie MMI-Windows direkt zur NC und PLC sind realisierbar. Ein Datenlogger für Fehler, History, Zustände und Diagnose sowie ein Massenspeicher wie Hard- und Floppydisk gehören zum Funktionsumfang.

Als NCP-Funktionen sind höhere Interpolationsarten wie Spline, Parabel, 5-Achsen-Polynome und Mehrkanalstrukturen mit virtuellen Achszuordnungen möglich. Zu den Antrieben gibt es offene Schnittstellen wie: analog, SERCOS, Firmenbussysteme (Siemens, FANUC u.s.w.). Es können weiche Rampenübergänge für grössere Beschleunigungen generiert werden. Mit den offenen Strukturen für komplexe Zyklenprogrammierung können mathematische Funktionen und logische Operationen implementiert werden. Hochsprachenstrukturen um ISO 66025 können überlagert werden (IF, WHILE, FOR ...) und in die Systemsoftware kann ein Sourcecode direkt eingebunden werden.

Durch flexible NC-Windows kann eine direkte Prozessbeeinflussung stattfinden wie

ISO-Interrupt aus ISO-, MMI- oder PLC-Funktionen. Eine kanalspezifische Vorschubsteuerungen kann auf Einzelachsen oder Interpolationskanäle wirken. Die flexiblen Kompensationsstrukturen basieren auf Maschinenkonstanten, Spindel- und Werkzeugkompensationen für Winkel-, Spindel-, Cross-Error. Kompensationstabellen in Funktion von Maschinenparametern und -temperaturgang können dynamisch nachgeladen werden. MMI-Window wirkt direkt zur NC und PLC für Logik, R-Daten und Files. Die typische Leistungsdaten von High-End CNC-Systemen sind: Blockzykluszeiten 0.2-5 ms und Interpolations- und Lagereglertakt 0.5-3 ms.

Die PLC-Funktionen umfassen SPS mit MMI- und NC-Windowsschnittstelle. Feldbusinterfaces für Interbus-S, Profibus, CAN-Bus usw. sind möglich. Hilfsachsen wie Schrittmotoren und Servohydraulik können direkt angesteuert werden. Als Analogschnittstellen stehen 12/16-Bit ADI und ADC zur Verfügung. Die Durchführung einer Maschinendiagnose ist möglich.

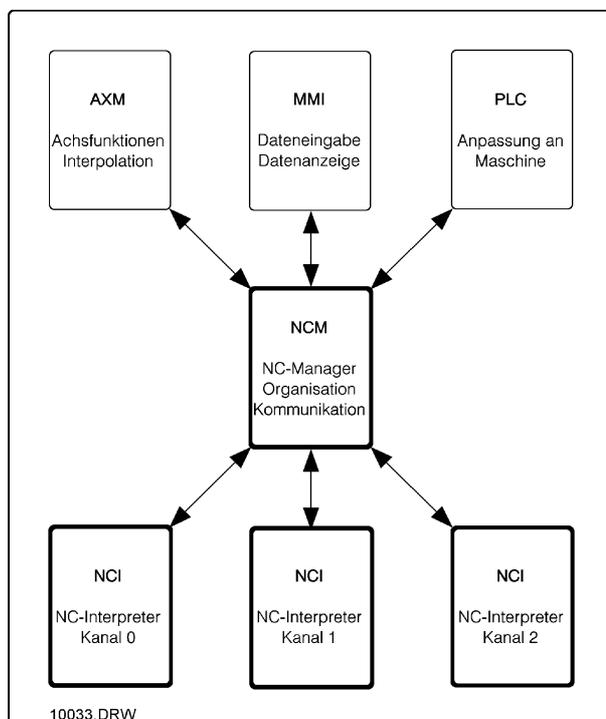


Bild 2) Blockstruktur der Datenkommunikationen zwischen MMI, NC und PLC.

Trends im Steuerungsbau

Im Steuerungsbau findet bei den CNC-Herstellern eine Strukturbereinigung statt. Bei den MMI-Konzepten baut man auf PC-Hardware mit 486 CPU's. Es werden vermehrt Mono, Dual-Scan und TFT LCD-Display's eingesetzt. Die Harddisk als Datenträger für System- und Anwendersoftware sowie die 3½" Floppy als Transfermedium setzen sich durch. Die flexible Vernetzung ist in immer mehr Systemen möglich. Die NC-Funktionen verfügen über mächtigere Befehlsstrukturen aus ISO. Schnellere Satzverarbeitungszeiten und verbesserte Regelalgorithmen ermöglichen einen geringeren Schleppabstand. Normierte Befehlsstrukturen wie extended ISO und OSACA werden Standard. Eine erweiterte elektronische Fehlerkompensation erhöht die Maschinengenauigkeit.

Offene Antriebsschnittstellen konkurrieren weiterhin Paketlösungen, werden sich aber am Markt behaupten. Die PLC-Strukturen ermöglichen Schnittstellen zwischen CNC und SPS Steuerungen über Feldbusse. Normierte Programmiersprachen vereinfachen die Kommunikation. Mit Feldbussystemen für dezentrale Lösungen stehen bessere Anschlussstechniken durch standardisierte E/A-Module und normierten Datenschnittstellen zu Aggregaten wie Spindelantriebe, Messstationen und Sensorik zur Verfügung.

Planungsphasen

Der Energiepreis ist noch in den wenigsten Fällen ausschlaggebend für aktive Massnahmen zum Energiesparen auf Werkzeugmaschinen. Beachten wir aber die Tatsache, dass unnötiger Energieverbrauch zusätzliche thermische Probleme im Schaltschrank und auf der Maschine hervorrufen kann, so ist es wichtig, in jeder Entwicklungsphase diesem Aspekt die notwendige Aufmerksamkeit zu schenken.

Entwicklung: Im Bereich der Werkzeugmaschinen und der dazugehörigen Steuerungstechnik wird die Forschung und Entwicklung noch wichtige Beiträge zur Optimierung der Steuerungskomponenten leisten. Durch die Entwicklung von Steuer- und Antriebseinheiten mit einem besseren Wirkungsgrad kann die Kühlleistung im Schaltschrank und der Temperaturgang auf der Maschine reduziert werden. Die Geräteschnittstellen sind offen für eine flexible Maschinenintegrationen zu gestalten. Die Komponenten bekommen ein temperaturunabhängiges Verhalten mit einem breiten Spannungs- und Frequenzbereich ohne verlustreiche Anpassungsschaltungen. Mit einer verbesserten Sensorik kann der Prozess überwacht werden. Dazu gehört zum Beispiel eine präzise Leistungsinformation bei Spindeltrieben über den gesamten Drehzahlbereich und Körperschallmessgeräte für adaptive Vorschubsteuerungen.

Konstruktion: Bereits bei einem allgemeinen Maschinenpflichtenheft müssen die Entwicklungsteams der Konstruktion, Elektroplanung und des Softwareengineering eng zusammenarbeiten, um eine optimale Lösung zu erreichen. Die nachfolgenden Punkte sind Beispiele, wo bereits in frühen Planungs- und Entwicklungsphasen einer Werkzeugmaschine wichtige Punkte mitberücksichtigt werden müssen:

Der Temperaturgang der Maschine kann mit guter Wärmeableitung im Bereich der Motoren, Spannvorrichtungen und Aggregate verbessert werden. Für die Temperaturstabilität ist der Einfluss des Kühlmittelflusses in der Maschine zu berücksichtigen. Bei der Antriebsdimensionierung ist auf die thermische Zeitkonstante der Antriebe, auf die Beschleunigungs- und Schnittkräfte sowie auf die optimale Abstimmung des Massenträgheitsmoments zwischen Antrieb und Maschine zu achten. Für die Halte- und Klemmeinrichtungen von Haupt- und Hilfsantrieben sind Sicherheitsaspekte und die Energieabschaltung in Betracht zu ziehen. Mit dem Einsatz von elektronischen Kom-

pensationen (Bild 3) können Winkelfehler, Cross-Error und Spindelsteigung korrigiert werden.

Anhand mechanischer Referenzsysteme, welche bei der Konstruktion festzulegen sind, können die notwendigen Maschinenkonstanten bei der Inbetriebnahme einfach vermessen werden.

Die in leistungsfähigen CNC-Steuerungen integrierten Kompensationsmechanismen ermöglichen weitgehend automatisierte Einrichtungsfunktionen zu realisieren. Dadurch ergeben sich kürzeste Stillstandszeiten beim Umrüsten, automatischer Werkstückwechsel und weniger Ausschuss (first part, good part).

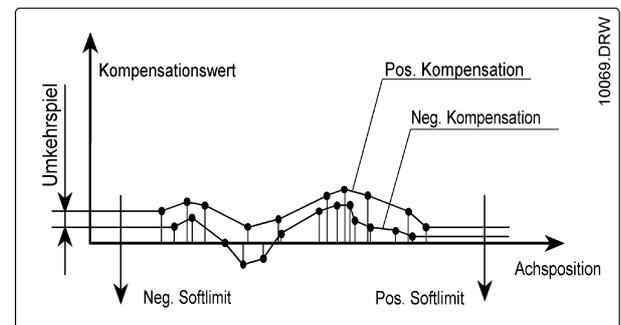


Bild 3) Kippkompensationen mit erweiterter Spindelsteigungsfehlerkompensation.

Elektroengineering: Gute Elektroplanung leistet bei der gesamten Anlagenplanung einen wesentlichen Beitrag für eine flexible Steuerung der installierten Verbraucher. Leider werden solche Forderungen oft durch den vorgegebenen Kostenrahmen ganz ausser acht gelassen. Andererseits ist zu beachten, dass flexible Steuerfunktionen auch die Maschinenfunktionalität erhöhen können. Zusätzlich sind bei der Berücksichtigung von einigen Aspekten auch ohne zusätzliche Aufwendungen Energie und Kosten einzusparen.

Das Ziel muss es sein, ohne Schrankkühlung die zulässigen Temperaturbereiche nicht zu überschreiten. Temperaturunterschiede bis 10 Grad innerhalb eines Schaltschranks sind durchaus möglich, und somit bei der Layoutpla-

nung entscheidend, ob zusätzliche Kühlleistung in Schaltschrank zu installieren ist. Bei der Planung eines Schranklayouts sollten temperaturunempfindliche Einheiten wie Klemmen, Rangierfelder, Sicherungen usw. im oberen Schrankteil angeordnet sein. Die Leistungseinheiten mit grossen Verlustleistungen können in einem getrennten Schrankteil plaziert werden. Lokale Wärmestaus oder gegenseitige Warmluftbeeinflussung durch Geräte sind zu vermeiden. Wärmestaus lassen sich durch forcierte Umluft vermeiden.

Die Widerstandsmodule von Servo- und Spindelantrieben zur Vernichtung der Bremsenergie sind, wenn möglich, ausserhalb des Schrankes zu montieren, zum Beispiel in einem Gehäuserucksack. Es sind nur Kühlgeräte mit einstellbaren Temperaturreglern einzusetzen. Die Temperatureinstellung ist möglichst hoch anzusetzen, damit der Schaltschrank nicht zum Umgebungskühler wird. Aggregate und Baugruppen sind mit möglichst selektiver Ansteuerung zu planen. Freischalten von Antrieben sollte während dem Betrieb möglich sein.

Softwareengineering: Mit modernen Programmierwerkzeugen auf der CNC können komplexe Programmstrukturen wirtschaftlich gelöst werden. Möglichkeiten und Offenheit der CNC-Funktionen sind: Online-Zustell-Strategien, variable Werkzeugradiuswerte, Offenheit der Aggregats-Schnittstellen und konstruktive Vorgaben wie Bremsen und Klemmen. In den Programmstrukturen sollten flexible Parameterschnittstellen für die Ablauf- und Schaltfunktionssteuerung durch den Endanwender vorhanden sein.

Produktivitätssteigerungen und Energiesparen

Unter der Annahme, dass bei einer Werkzeugmaschine durch optimierte Abläufe die Bearbeitungszeiten gesenkt werden, reduzieren sich auch die unproduktiven Neben-

zeiten, und somit auch der Gesamtenergieaufwand.

Ablaufoptimierung der Bearbeitungsprozesse: Bei Werkzeugmaschinen mit hoher Zyklenfunktionalität können durch intelligente Softwarelösungen unnötige Verfahrenswege eliminiert werden. Dazu zählen werkzeugkompensierte Ausgangslagen, Freifahr-, Kollisionsstrategien und spindelkompensierte Ausgangslagen beim automatischem Spindelwechsel. Voraussetzungen für die Realisierung solcher Strukturen sind CNC-Steuerungen mit sehr schnellen NC-Interpreter. Die anspruchsvollen Funktionsabläufe und umfangreiche Kompensationsberechnungen müssen Online ohne Stillstandszeiten von der CNC berechnet werden.

```
% (* Beispiel Konturberechnung Online *)
N005 FOR phi = phi_start TO phi_end STEP d_phi;
N010 BEGIN;
N015 Xn = dm/2 * COS(phi) - 2 * e * COS(2*phi) + e *
COS(4*phi);
N020 Yn = dm/2 * SIN(phi) + 2 * e * SIN(2*phi) + e * SIN(4*phi);
N025 G1 x Xn y Yn;
N030 END;
```

Bild 4) Berechnung von Wegsegmenten.

Parkieren von NC-Achsen: Hilfs- und Hauptachsen können bei entsprechenden Funktionsschnittstellen (M-Codes für die Bremssteuerung, Klemmung und die Antriebsfreischaltung) einfach während dem Prozess parkiert werden. Unter Freischalten werden leistungslose Antriebe verstanden. Die Vorteile sind: keine Mikrooszillationen der Achse im Stillstand, keine unnötige Maschinenerwärmung und die Achse muss auch nicht für den Referenzsuchlauf verfahren werden, wenn eine genaue Position eingestellt ist.

Werkzeugvorbereitungen: Die Werkzeugvorbereitung während der Bearbeitung, sowie eine flexible Werkzeugverwaltung auf der Steuerung reduzieren die Werkzeugwechselzeiten.

Werkstückprogrammierung (AVOR/WOP): Die Werkstückprogrammierung unterteilt sich grob in zwei Hauptgruppen:

Bei der CAD-CAM-Kopplung bestimmen der NC-Generator und der nachgeschaltete Postprozessor weitgehend die Qualität von optimierten Verfah- und Schnittstrategien. Der Postprozessor müsste auch feststellen, welche NC-Achsen für ein Werkstück nicht gebraucht werden, und diese Achsen könnte er mit dem entsprechenden M-Code parkieren. Die CNC braucht für minimale Stillstandszeiten grosse Massenspeicher (z.B. Harddisk) und einen Background Programmtransfer während der Bearbeitung.

Für die WOP / Zyklenprogrammierung sind die gleichen Programmgeneratoren auf der CNC und in der AVOR. Sie müssen während der Bearbeitung aktiv sein, was vermehrt bei PC-basierenden MMI's möglich ist.

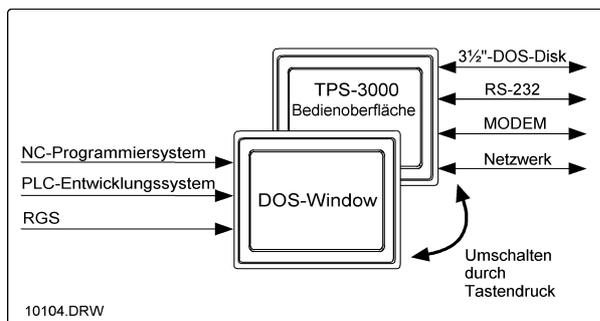


Bild 5) Bei arbeitender Maschine auf der CNC programmieren.

Die Programmsimulationen mit graphischer Unterstützung müssen sowohl auf dem AVOR-Rechner und der CNC möglich sein.

Mehr Produktivität durch Sensorik

Vermehrt stehen dem Werkzeugmaschinenhersteller Mess- und Steuergeräte zur Verfügung, die es ermöglichen, den Bearbeitungsprozess Online zu steuern und zu regeln. Der Entwicklungsstand einiger Messgeräte ist bereits so weit fortgeschritten, dass viele CNC-Steuerungen die verfügbaren Prozessinformationen wegen ungenügender Schnittstellen oder mangelnder CNC-Funktionalität nicht mehr optimal auswerten können.

CNC-Interfacefunktionen beinhalten: CNC-Eingänge die direkt im Interpolationstakt

oder schneller eine Signalauswertung ermöglichen, exakte Positionserfassung mit Messtastern bei Maximalgeschwindigkeit, Analogeingänge bis 16 Bit ADC, Serieschnittstellen für die Kommunikation mit intelligenten Aggregaten. (Messstationen usw.) und ein Feldbusinterface für Sensor / Aktor Ebene.

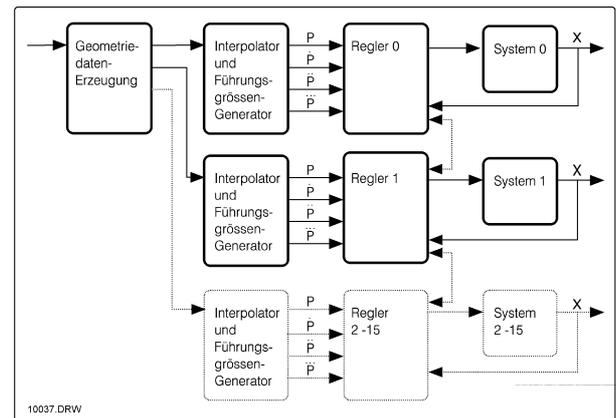


Bild 6) Reglerstruktur für Mehrachsen-CNC.

Dadurch ergeben sich Anwendungen mit Messtastern für Werkstück- oder Aufspannpositionen. Mit Leistungssignalgebern und Körperschallsensoren können Werkstück und Werkzeugkontakt Online erkannt werden. Analoge Messtaster dienen der schnellen Positionserfassung, wenn die Steuerung anhand der Tasterauslenkung die genaue Position berechnen kann. Mit leistungsproportionalen Signalen kann der Vorschub geregelt werden (adaptive Vorschubregelung). Dieses Verfahren verlangt CNC-Steuerungen, die auch im Interpolationsbetrieb innerhalb den Geschwindigkeitsrampen ein schleppfehlerfreies Fahren garantieren.

Verarbeiten von Messeingängen: Messtastereingänge auf CNC-Steuerungen können je nach System direkt auf NC-Eingänge oder via PLC in der NC-verarbeitet werden. Nebst CNC-internen Reaktionsgeschwindigkeit auf Messeingängen ist es viel entscheidender, mit welcher Geschwindigkeit und Funktionalität die CNC-Applikation den Prozessablauf beeinflussen kann. Bei Hochgeschwindigkeits-Schleifscheiben wird durch

Abtasten der Scheibenausdehnung mit Sensoren der Werkzeugradius automatisch kompensiert. Das «Luftschleifen» wird verhindert. Die Endmasserkennung erfolgt Online und das Abfahren von Messzyklen dient der Aufspannorientierung.

Adaptive Vorschubsteuerung: Beim Schleifen kommen externe Messgeräte zum Einsatz, die ein leistungsproportionales Analogsignal zur CNC melden. Diese skalierten Online-Informationen vom Bearbeitungsprozess verarbeitet die CNC direkt als Vorschubsüberlagerung zur programmierten Geschwindigkeit. Dadurch ergibt sich ein Vorschub mit konstanter Spindelleistung. Die CNC kann ein stumpfes Werkzeug erkennen, es automatisch abrichten oder wechseln. Das Endmass wird durch die Analyse des Schleifdruckes erkannt (Bild 7).

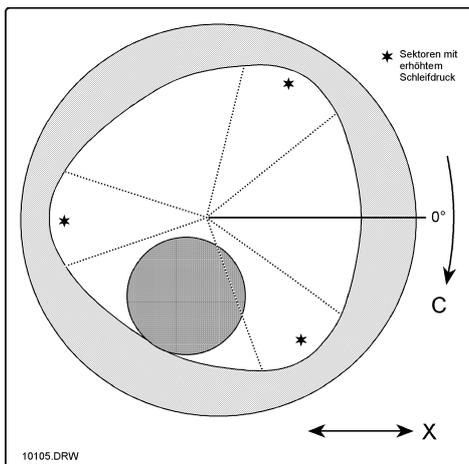


Bild 7) Unterschiedliche Schleifdrücke beim Unrundschleifen.

4. Antriebsdimensionierung

Autor: Rolf Gloor

In Maschinen findet man oft überdimensionierte Antriebe. Ein zu grosser Antrieb hat nichts mit guter Qualität zu tun, denn er verursacht höhere Kosten für das Antriebssystem selber und für die massivere Infrastruktur in der Mechanik (Getriebe, Fundamente ...) und der Elektrik (Verkabelung, Schaltschrank ...). Ein zu grosser Motor ist aber auch weniger dynamisch und er hat eine grössere Verlustleistung.

Die Antriebsdimensionierung lässt sich in vier Phasen unterteilen: Analyse, Berechnung, Systemauswahl und Kontrolle. Dieses Kapitel versucht einige Zusammenhänge zwischen den Antriebsanforderungen und den Möglichkeiten mit Elektromotoren aufzuzeigen. Durch die konsequente Verwendung von SI-Einheiten bei der Antriebsauslegung vereinfacht sich die Berechnung und die Fehlerquellen reduzieren sich auf falsche Annahmen. Der Maschinenkonstrukteur und Antriebsfachmann soll mehr Sicherheit auf dem Weg zu günstigen und energieeffizienten Antriebslösungen erhalten.

Die Antriebsdimensionierung lässt sich in folgende 3 Gruppen unterteilen:

- Statische Auslegung: Das Drehmoment des Antriebes muss über den ganzen Betriebsbereich grösser als das Lastmoment sein.
- Dynamische Auslegung: Der Antrieb muss genügend Drehmomentreserve haben, um die Last in der geforderten Zeit auf die gewünschte Geschwindigkeit oder Position zu bringen.
- Thermische Auslegung: Der Antrieb darf sich nicht über seine maximal zulässige Temperatur erwärmen.

Grundlage für die Auslegung sind die Funktionen, welche die Maschine erfüllen muss. Sehr oft wird eine Antriebsaufgabe nur mit ihrer Maximaldrehzahl und Maximalleistung spezifiziert. Bei den meisten Arbeitsprozessen ist dieses Vorgehen zulässig, weil dort bei der höchsten Drehzahl auch das grösste Drehmoment erforderlich ist. Bei vielen Maschinen sind aber die Lastmomente (Bild 1) nicht bekannt und man weiss nur, dass es mit den eingesetzten Antrieben funktioniert. Dass der Antrieb zu gross ist, sieht man vielleicht erst an einer Konkurrenzmaschine.

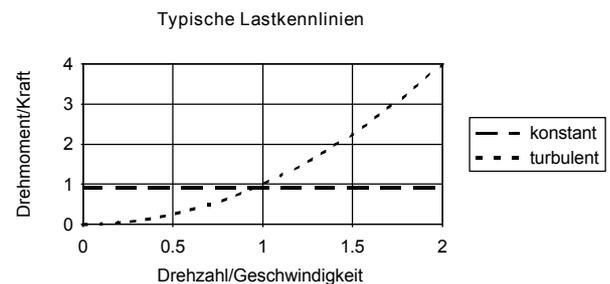


Bild 1) Die häufigsten Lastkennlinien.

Bestimmung der Lastmomente

Bei einer Maschine gibt es folgende Möglichkeiten zur Bestimmung der Lastmomente:

- Berechnung der Prozesskräfte: In der Literatur (Dubel, Papers ...) sind oft Angaben über die grundsätzlichen Kräfte oder Erfahrungswerte für einen Prozess zu finden. Verknüpft mit den Parametern der Maschine lässt sich damit analytisch oder iterativ (eventuell mit Computerunterstützung) das Lastmoment über den Betriebsbereich bestimmen. Falls keine Angaben gefunden werden, kann das Last-

moment vielleicht aus ähnlichen Prozessen abgeschätzt werden.

- Messung der Prozesskräfte: An einem Modell, Prototypen oder an einer ähnlichen Maschine können die Kräfte mit Sensoren gemessen werden. Eine einfache statische Kraft- oder Drehmomentmessung kann mit einer Federwaage (Drehmoment = Kraft mal Hebelarm) durchgeführt werden. Beschleunigungskräfte in komplexen Bewegungsabläufen können zum Beispiel durch die quantitative Auswertung von Bild-Aufzeichnungen bestimmt werden.
- Ausmessung am Motor: Bei einer bestehenden Maschine kann direkt am Motor das Lastmoment ermittelt werden. Bei elektrischen Antriebssystemen besteht ein Zusammenhang zwischen Motorstrom und Drehmoment. Mit einer Messreihe (Motorstrom und Drehzahl) kann die Lastkennlinie ermittelt werden. Durch Leerlaufversuche und eine Kalibrierung sind Referenzwerte zu schaffen, weil bei vielen Antrieben der Strom nicht proportional zum Drehmoment ist. Bei dynamischen Bewegungen ist die Schwungmasse des Motors bei der Prozessanalyse zu berücksichtigen.

Die Krafterzeugung in einem Motor

Ein Elektromotor ist ein elektromagnetischer Energiewandler. Der eine Teil des Motors ist fest (Stator), der andere Teil beweglich (Rotor). Bei der Mehrzahl von Motoren liegt der Rotor innen.

Das Drehmoment wird im Luftspalt (zwischen Stator und Rotor) erzeugt (Bild 2). Bei den meisten Motoren (Ausnahme Reluktanzmotoren) entsteht es durch die Kraft, welche auf die Stromleiter im Magnetfeld ausgeübt wird. Das Magnetfeld wird entweder durch integrierte Elektromagnete (Erregerwicklung) oder mit Permanentmagneten gebildet.

Lokal gesehen (Bild 3) wirkt eine Schubkraft, deren Größe proportional zum Magnetfeld und zum Strombelag ist. Die maximale Stärke des Magnetfeldes ist durch die Sättigung des Eisens im Bereich von einem Tesla begrenzt. Die Wärme, welche im Stromleiter entsteht, muss abgeführt werden. Somit ist die maximale Schubkraft begrenzt (bei Normmotoren selten über 30 kN/m²). Das Drehmoment an der Motorwelle ergibt sich aus dem Produkt Schubkraft mal Luftspaltfläche mal Hebelarm. Es ist somit proportional zum Rotorvolumen.

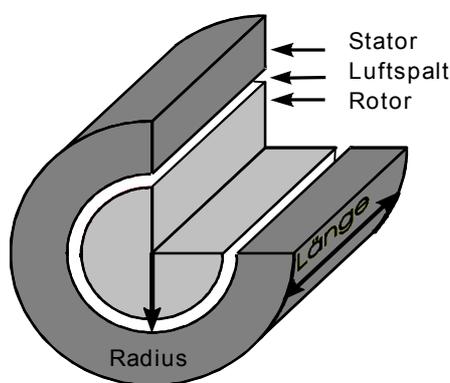


Bild 2) Zwischen Stator und Rotor wirkt die elektromagnetische Kraft im Luftspalt.

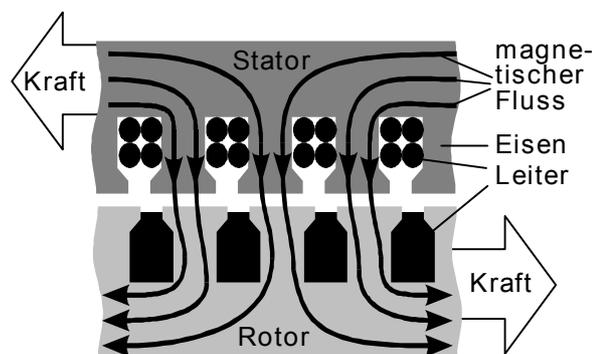


Bild 3) Krafterzeugung im Luftspalt des Motors.

Mit der Induktion B [Vs/m²], dem Ankerstrombelag A [A/m], dem Rotorradius r [m] und der Rotorlänge l [m] rechnet sich das Drehmoment M [Nm]:

$$M \gg B A r^2 l$$

Form. 1) Das Drehmoment ist proportional zum Rotorvolumen

Gleichgrosse zwei- und vierpoligen Asynchronmotoren haben oft die gleiche Nennleistung, obwohl der zweipolige Motor die doppelte Drehzahl hat. Der vierpolige Motor erreicht die Leistung mit einem doppelt so grossen Drehmoment. Die geometrisch bessere Flussführung erlaubt einen grösseren Rotor (erkennbar am Trägheitsmoment) und dadurch ein grösseres Drehmoment (Bild 4).

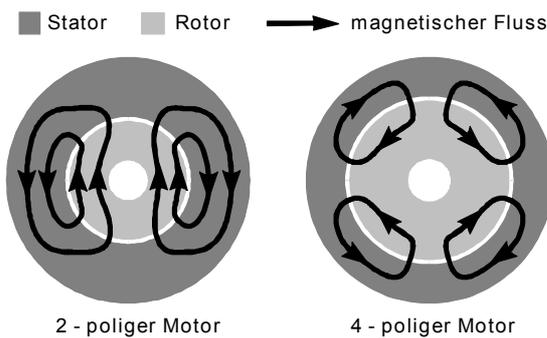


Bild 4) Der vierpolige Motor hat ein grösseres Drehmoment als der zweipolige, weil er für den magnetischen Fluss weniger Statoreisen braucht.

Wenn man den vierpoligen Motor an 100 Hertz betreibt, hat er eine doppelt so grosse Nennleistung wie der zweipolige Motor im gleichen Gehäuse. Der umrichter gespeiste «100 Hz Motor» braucht eine angepasste Wicklung (Sonderwicklung), welche aber nicht viel teurer als die Normwicklung ist. Ein Asynchronmotor mit Frequenzumrichter kann auf eine beliebige Nenndrehzahl (zum Beispiel: 400 U/min, 2400 U/min, 12 000 U/min) ausgelegt werden.

Motorkennlinien

Die Daten auf dem Typenschild eines Motors geben nur über den Nennbetriebspunkt (P_n , M_n , N_n , U_n , I_n ...) Auskunft. Ein Antriebssystem arbeitet aber nicht nur im Nennpunkt. Der Arbeitsbereich kann sich über alle vier Quadranten erstrecken. Ein Asynchronmotor, welcher am Netz betrieben wird (Bild 5), deckt drei Quadranten ab, den vierten Quadranten, wenn zwei Phasen vertauscht werden. Der stabile Betriebspunkt ist gefunden, wenn das Lastmoment gleich dem Motormoment

ist. Eine Differenz ergibt ein Beschleunigungsmoment und dadurch eine Drehzahlveränderung.

Wenn der Asynchronmotor mit einem Frequenzumrichter angesteuert wird, so kann seine Kennlinie so verändert werden, dass bei der gewünschten Drehzahl das Lastmoment aufgebracht wird, wie bei Servoantriebssystemen. Ein Servoantrieb unterscheidet sich aber vom umrichtergespeisten Asynchronmotor durch eine dynamische und genaue Drehzahlregelung und die Beherrschung der tiefen Drehzahlen.

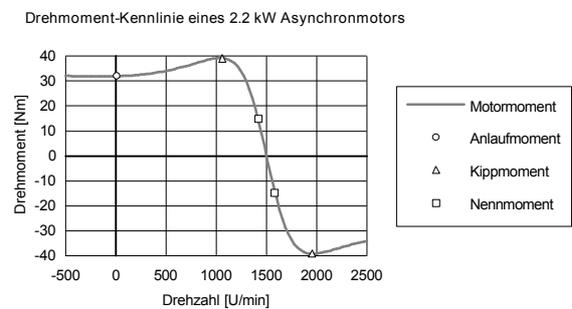


Bild 5) Kennlinie eines «anzugsstarken» vierpoligen Asynchronmotors am 50 Hz Netz.

Ein Servoantriebssystem (Bild 6) hat im Stillstand das höchste Drehmoment. Je nach zulässiger Übertemperatur (zum Beispiel 60 oder 100 Grad Kelvin) und je nach der Art der Kühlung kann der gleiche Motor verschiedene Nenndrehmomente abgeben. Im Gegensatz zum Netzbetrieb ist bei einem Antriebssystem mit Leistungselektronik der Strom limitiert. Der Nennstrom und die Überlastbarkeit des Ansteuergerätes beschränken die Drehmoment-Kennlinie des Antriebes.

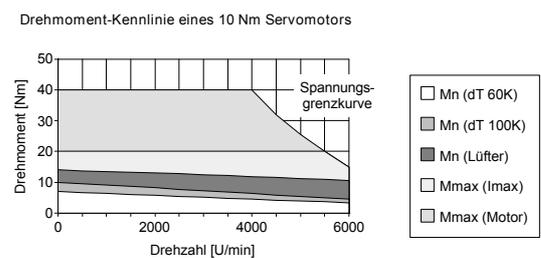


Bild 6) Kennline eines Servoantriebssystems.

Statische Antriebsauslegung

Bei Arbeitsmaschinen mit langsamen Drehzahländerungen genügt meistens eine statische Antriebsauslegung. Es gilt die Bedingung, dass über den ganzen Drehzahlbereich das Lastmoment nicht grösser als das Antriebsmoment sein darf (Bild 7). Wenn das Losbrechmoment (die Haftreibung) nicht grösser als das Anzugsdrehmoment ist, sind keine Anlaufschwierigkeiten zu erwarten.

Bei hohen Haftmomenten im Bereich des Motoranlaufmomentes nützt bei Asynchronmotoren ein Sanftanlaufgerät nicht viel, denn der Motor beschleunigt erst, wenn er genug Spannung hat, um das Losbrechmoment zu überwinden. Mit einem modernen Frequenzumrichter steht aber schon beim Start ein hohes Drehmoment zur Verfügung.

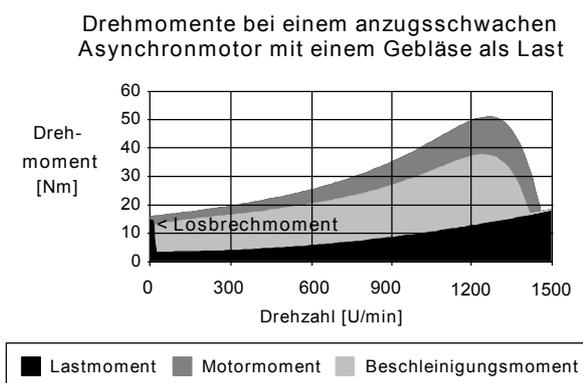


Bild 7) Ein hohes Losbrechmoment kann den Motor blockieren.

Ein Asynchronmotor, der direkt oder mit einem Softstarter ans Netz geschaltet wird, erhitzt sich beim Hochfahren mit der Energie, welche der Rotationsenergie des Rotors und der Last entspricht. In den Datenblättern von Standardmotoren ist die zulässige Anzahl Leerumschaltungen pro Stunde angegeben. Kleine Asynchronmotoren können viel mehr Schaltungen (einige pro Sekunde) als grosse (einige pro Stunde) verkraften. Beim Betrieb mit einem Frequenzumrichter hat der Motor einen be-

schränkten Schlupf und kann viel häufiger geschaltet werden.

Wenn das Lastdrehmoment unterhalb der Nenndrehzahl grösser als das Nenndrehmoment des Motors ist (Zentrumswickler, Knetmaschinen, Exzenter ...), so ist ein Antriebssystem mit einer Kennlinie zu suchen, welches diesen Bereich abdeckt (Gleichstrom-Reihenschluss-Motor, Gleichstrom-Motor mit regulierbarer Erregung, Asynchronmotor mit Frequenzumrichter in der Feldschwächung, geschalteter Reluktanzmotor). Alternativ bleibt sonst eine veränderbare Getriebeuntersetzung oder eine entsprechende Überdimensionierung des Antriebssystems.

Der Preis eines Motors hängt von seiner Grösse und somit vom Nenndrehmoment ab. Die Drehmomentanpassung an die Last ist mit einem Getriebe meistens günstiger als mit einem grossen Motor. Ein Getriebe hat ein Reibungsmoment, welches von der übertragenen Leistung wenig abhängig ist. Der Wirkungsgrad eines Motors oder eines Getriebes bezieht sich auf die Nennleistung. Im Teillastbereich oder bei tieferen Drehzahlen ist der Wirkungsgrad schlechter.

Dynamische Antriebsauslegung

Als Ergänzung zu den Anforderungen bei der statischen Dimensionierung muss bei der dynamischen Antriebsauslegung eine bestimmte Drehzahl oder Position in einer vorgegebenen Zeit erreicht werden. Für die dazu notwendige Beschleunigung (oder Verzögerung) muss das Antriebssystem ein zusätzliches Drehmoment aufbringen. Je grösser die Beschleunigung ist, desto mehr Kraft ist erforderlich. In vielen dynamischen Maschinen braucht der Motor die meiste Kraft, um seinen eigenen Rotor zu beschleunigen.

Translatorisches System

Das translatorische System bezieht sich auf geradlinige (lineare) Bewegungen (Bild 8), wie sie Schlitten, Aufzüge, Kolben und

andere Teile von Maschinen und Anlagen ausführen.

Die Grundeinheiten für das translatorische System sind der Weg s [m], die Zeit t [s] und die Masse m [kg]. Daraus lassen sich die Geschwindigkeit v [m/s], die Beschleunigung a [m/s²] und die Beschleunigungskraft F [N = kgm/s²] ableiten. Im freien Fall (Bild 9) mit einer Beschleunigung von etwa 10 m/s² nimmt die Geschwindigkeit pro Sekunde um 10 m/s zu.



Bild 8) Die translatorische Bewegung.

Die Beschleunigungskraft ist (vereinfacht) das Produkt aus Masse mal Beschleunigung: $F = a m$, oder genauer für veränderliche Massen: $F = d(v m)/dt$. Die Geschwindigkeit ist Weg durch Zeit: $v = ds/dt$. Die Beschleunigung ist Geschwindigkeitsänderung durch Beschleunigungszeit: $a = dv/dt$.

Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg

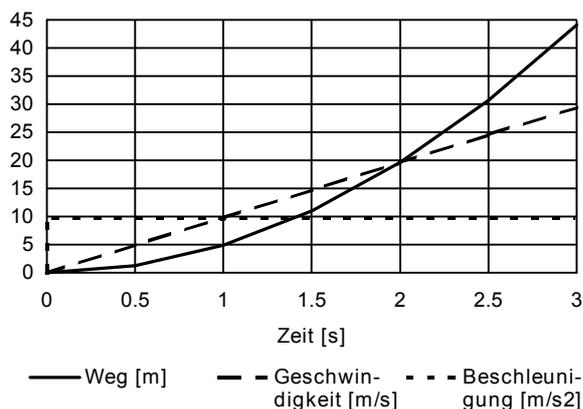


Bild 9) Die Kinematik des freien Falls.

Rotatives System

Das rotative System bezieht sich auf Drehbewegungen wie sie in rotierenden elektrischen Maschinen, Getriebe, Walzen, Spindeln und Teilen von Maschinen und Anlagen vorkommen (Bild 10).

Die Einheit rad (Radian) für den Winkel ist ungewohnt aber praktisch.

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ Umdrehung} / 2\pi \\ (0.16 \text{ Umdrehungen oder } 57.3 \text{ Grad})$$

Durch die Verwendung dieser Größe können Umrechnungsfaktoren (9550, 60 usw.) bei Berechnungen weggelassen werden.

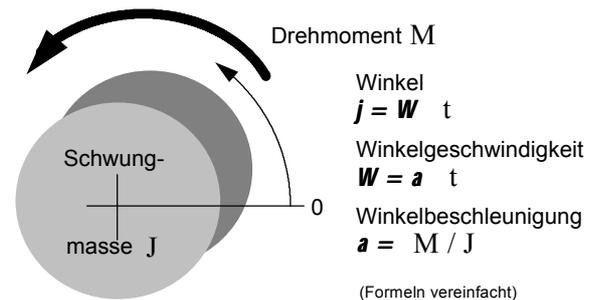


Bild 10) Die rotierende Bewegung.

Die Grundeinheiten für ein rotatives System sind der Winkel j [rad] und die Schwungmasse (Polares Massenträgheitsmoment) J [kgm²]. Daraus lassen sich die Winkelgeschwindigkeit (Drehzahl) w [rad/s], die Winkelbeschleunigung a [rad/s²] und das Beschleunigungsmoment M [Nm] ableiten.

Bei der dynamischen Auslegung von Gelenken, Kurbeltrieben und ähnlichen Systemen ist bei der Berechnung der Beschleunigungsmomente die ausführliche Formel zu verwenden. Durch den veränderlichen Radius für die Bewegungsübertragung vom linearen ins rotative System verändert sich die transformierte Schwungmasse mit dem Winkel und der Zeit.

$$M = \frac{d \alpha w \Phi}{dt} = a J + w \frac{dJ}{dt}$$

Form. 2) Ausführliche Formel zur Berechnung des Beschleunigungsmomentes.

Schwungmasse und Getriebe

Das Massenträgheitsmoment J [kgm²] für einen Vollzylinder mit Radius r [m], Länge l [m], Masse m [kg] und spezifischem Gewicht ρ [kg/m³] rechnet sich:

$$J = \frac{m}{2} r^2 = \frac{r}{2} \rho l r^4$$

Form. 3) Die Schwungmasse eines zylindrischen Körpers.

Die Schwungmasse eines Vollzylinder nimmt mit der vierten Potenz des Durchmessers zu. Ein um 20% dickerer Zylinder hat die doppelte Schwungmasse.

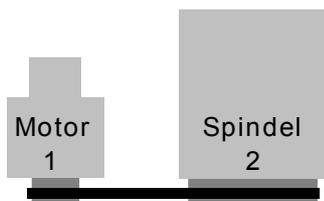


Bild 11) Riemengetriebe mit Übersetzung i.

Wenn zwei rotierende Körper über ein Getriebe miteinander verbunden sind, so wird die Schwungmasse mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses i transformiert. Eine optimale Anpassung ist gefunden, wenn die transformierte träge Masse der Last gleich gross ist, wie die des Motors.

Grösse	System 1	=	System 2
Winkel	j_1	□	$j_2 i$
Drehzahl	w_1	□	$w_2 i$
Winkelbeschleunigung	a_1	□	$a_2 i$
Drehmoment	M_1	□	M_2 / i
Schwungmasse	$J_{1 res}$	□	$J_1 + J_2 / i^2$
Leistung	P_1	□	P_2

Tab. 1) Transformation durch ein Getriebe.

Vom translatorischen ins rotative System
Die Umwandlung einer rotativen in eine translatorische Bewegung kann auf verschiedene Arten erfolgen: Kette, Zahnriemen, Seilzug, Zahnstange, Spindel, usw. Bei diesen Transformationen kann ein Rechnungsradius r [m] als Umrechnungswert angenommen werden. Bei den Übertragungselementen mit einer Abwicklung über den Umfang entspricht dieser

Radius dem geometrischen Wert, bei einer Spindel der Spindelsteigung durch $2 \square$.

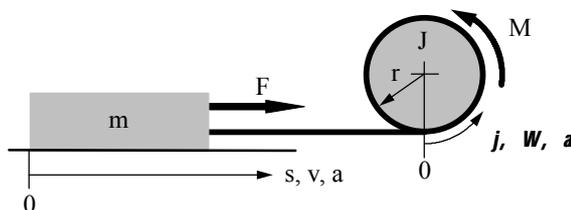


Bild 12) Ein Schlitten wird über einen Seiltrommel mit dem Radius r gezogen.

Grösse	rotativ	=	translatorisch
Winkel	j	=	s / r
Drehzahl	w	=	v / r
Winkelbeschleunig.	a	=	a / r
Drehmoment	M	=	$F r$
Schwungmasse	J_{res}	=	$J + m r^2$

Tab. 2) Transformation mit «Rechnungsradius» r.

Leistung und Energie

Mit der Leistung und Energie kann die Transformationsrechnung überprüft werden, denn sie muss in beiden Systemen gleich gross sein.

Grösse	Symb.	Einheit	transl.	rotativ
Leistung	P	W	F v	M w
Energie (dyn.)	W	J	$m/2 v^2$	$J/2 w^2$
Energie (stat.)	W	J	F s	M j
Erdbeschl.	g	m/s ²	9.81	
Pot. Höhe	h	m		
Pot. Energie	W	J	m g h	

Tab. 3) Leistung und Energie im translatorischen und rotativen System.

Für die Berechnung der Leistung aus der Beziehung Drehmoment mal Drehzahl kann die Umrechnung mit $1 \text{ rad/s} = 60/2 \square \text{ U/min} = 9.55 \text{ U/min} = \text{ca. } 10 \text{ U/min}$ vereinfacht werden. Die verwendete Grösse für die Drehzahl n in Umdrehungen pro Minute ist

etwa 10 mal grösser als die Grösse W in Radian pro Sekunde.

$$P \gg M \frac{n}{10} \quad M \gg \frac{10 P}{n}$$

Form. 4) Vereinfachte Berechnung von Leistung, Drehmoment und Drehzahl.

Bewegungsabläufe

Für die Überwindung einer gegebenen Strecke s [m] in einer möglichst kurzen Positionierzeit t_p [s] gibt es zwei Möglichkeiten der Bewegungsoptimierung. Zum einen kann eine minimale Beschleunigung, zum anderen auf eine minimale Leistung optimiert werden.

Grösse	minimale Beschleunig.	minimale Leistung
Beschleunigungszeit	$t_p / 2$	$t_p / 3$
Geschwindigkeit	$2 s / t_p$	$1.5 s / t_p$
Beschleunigung	$4 s / t_p^2$	$4.5 s / t_p^2$
Leistung	$8 m s^2 / t_p^3$	$6.75 m s^2 / t_p^3$

Tab. 4) Geschwindigkeit und Beschleunigung bei optimierten Bewegungsabläufen.

Für die erste grobe Leistungsabschätzung (Annahme: Schwungmasse Motor = transformierte Last) dient folgende Formel:

$$P_{\text{Beschleunigung}} \gg 20 m_{\text{Last}} \frac{s_{\text{Positionierhub}}^2}{t_{\text{Positionierzeit}}^3}$$

Form. 5) Leistungsabschätzung für eine Positionierung in minimaler Zeit.

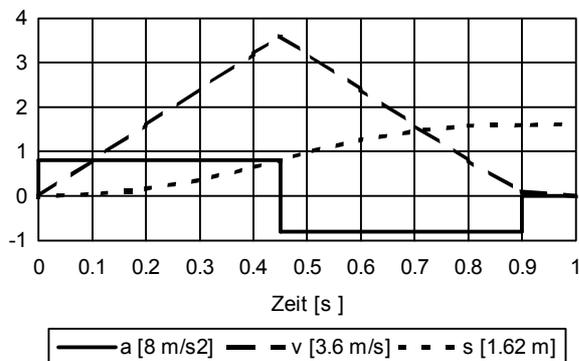


Bild 13) Bewegungsverlauf mit minimaler Beschleunigungskraft.

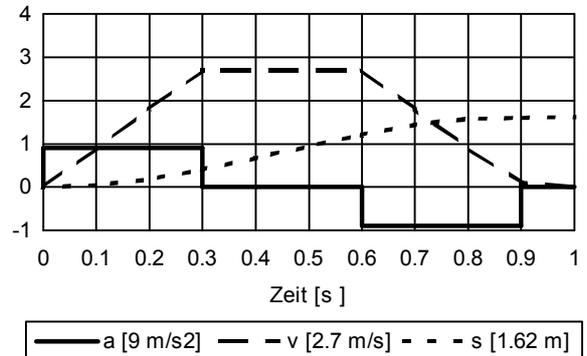


Bild 14) Bewegungsverlauf mit minimaler Leistung.

Bei der Auslegung für die beiden Beispiele (Bild 13/14) ist von der Positionierzeit von einer Sekunde eine Zehntelsekunde abgezogen worden. Je nach Steifigkeit des Regelsystems dauert es eine Zeit, bis sich der Antrieb und die Last auf die genaue Position ausgerichtet haben (Beruhigungszeit). Der Regler des Ansteuergerätes darf für eine genaue Positionierung nicht am «Anschlag» fahren. Für einen sauberen Bewegungsablauf sollte das maximale Drehmoment des Antriebssystems nur bis zu 90% ausgenutzt werden.

Thermische Auslegung, Überlastung

Grundlage für die thermische Auslegung ist die Annahme, dass sich das Motor nur durch das Drehmoment erwärmt. Die Verluste im Motor sind proportional zum Quadrat des Drehmoments. Ein Betrieb mit dem halbem Drehmoment verursacht nur einen Viertel der Motorverluste, das doppelte Drehmoment die vierfachen. Bei der Definition der Betriebsart S6 ist die Zeitdauer auf 10 Minuten festgelegt. Bei Motoren ab Baugrösse 73 (150 mm Durchmesser) ist diese Zeitkonstante ausreichend.

Die Betriebsart S6/60 beschreibt zum Beispiel eine Überlastung des Antriebes um 30% während 6 Minuten. In den übrigen 4

Minuten ist der Antrieb unbelastet (im Leerlauf).

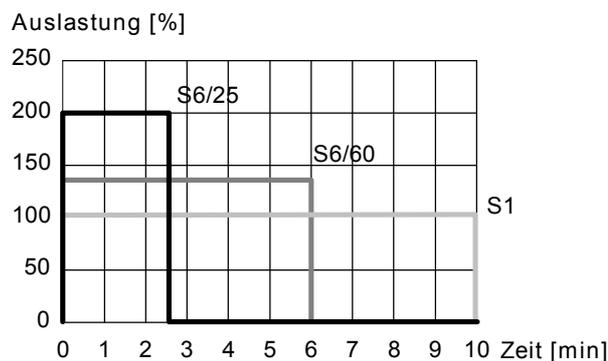


Bild 15) Antriebe dürfen kurzzeitig überlastet werden.

Wenn sich ein Motor dauernd über die zulässige Temperatur erwärmt, reduziert sich seine Lebensdauer (die Wicklungslebensdauer ist ca. 100 000 Stunden). Wenn besonders hohe Leistungen nur ausnahmsweise benötigt werden (zum Beispiel: Ventilator mit einer Betriebsart «Sturmlüftung» im Brandfall), kann es sich durchaus lohnen, einen zweiten Motor zu installieren, welcher nur bei Bedarf eingeschaltet wird.

Die meisten Antriebssysteme mit elektronischen Steuergeräten können den Motor auch bremsen. Bei Vierquadranten-Phasenanschnittgeräten für Gleichstromantriebe und bei einigen grösseren Frequenzumrichtern wird die Bremsenergie ins Netz zurückgespiesen. Bei Achsmodulen mit einem gemeinsamen Spannungszwischenkreis kann die Bremsenergie von den anderen Antrieben genutzt werden. In den anderen Fällen wird die Bremsenergie in einem Ballastwiderstand verheizt. Die Bremswiderstände sind meistens so dimensioniert, dass sie dauernd etwa 10 bis 20% der Nennleistung und kurzzeitig die maximale Leistung des Antriebssystems aufnehmen können. Die Bremswiderstände sollten ausserhalb des Schaltschranks installiert werden.

Zusammenfassung

Grundlage der guten Dimensionierung ist das Kennen der Anforderungen, welche die Maschine an den Antrieb stellt. Ein Antrieb braucht nicht überdimensioniert zu werden,

denn er kann seine Nennleistung dauernd abgeben. Bei komplexeren Antriebsaufgaben helfen Auslegungsprogramme wenig, denn die Berechnung macht den kleineren Teil der Arbeit aus. Die Auswahl der passenden Antriebskomponenten braucht die meiste Zeit. Bei einer guten Auslegung ist wichtig ist, dass nach der Wahl bis auf den Prozess zurückgerechnet wird. Zur Kontrolle sollte über das Drehmoment und zusätzlich über die Leistung/Energie gerechnet werden. So kann vermieden werden, dass zum Beispiel für eine Aufgabenstellung, welche maximal 270 Watt Leistung erfordert, ein 5 Nm Motor mit 3000 U/min Nenndrehzahl (1.5 kW) und ein Verstärker mit zweifacher Überlastbarkeit (3 kW) eingesetzt wird.

5. Frequenzumrichter

Autor: Benno Jäckle

Ein Grossteil der industriellen Antriebsaufgaben werden mit Asynchronmotoren realisiert, welche direkt oder über einen Stern-Dreieck-Schalter mit dem elektrischen Netz verbunden sind. Die Energiezufuhr zu den Maschinen kann nur über einen EIN-AUS-Schalter gesteuert werden. Für eine reduzierte Leistungsabgabe werden energievernichtende By-Pass Einrichtungen oder Drosseln eingesetzt.

Mit einem Frequenzumrichter können solche Maschinen energieeffizienter konstruiert und betrieben werden. Obwohl Umrichter durch ihre eigenen Wärmeverluste den Wirkungsgrad für die Umwandlung von elektrischer in mechanischer Energie verkleinern, ist der durchschnittliche Wirkungsgrad über den ganzen Betriebsbereich um ein mehrfaches besser.

Die heutzutage erhältlichen Antriebssysteme mit Frequenzumrichtern decken eine Vielzahl von Applikationen mit unterschiedlichen Anforderungen ab. Die Umrichtersysteme lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- **AC Inverter:** Low Cost Drehzahlsteuerung für Asynchronmotoren.
- **AC Drive:** Dynamische Drehzahlsteuerung mit Asynchronmotoren (sensorless vector control).
- **AC Servo:** Hochdynamischer Drehzahlregler für Asynchronmotoren mit Rotorpositionsrückführung (vector control).
- **Brushless DC:** Drehzahlregelung für einen Synchronmotor mit einer Rotorpositionsrückführung.
- **SR Drive:** Steuergerät für ein Reluktanzmotor (switched reluctance drive).

Alle genannten Antriebssysteme arbeiten mit Umrichtern, welche sich hauptsächlich in der Komplexität des Steuerteiles unterscheiden. Der Leistungsteil dieser Umrichter ist in etwa der gleiche (Gleichrichter, Zwischenkreiskondensator und sechs Halbleiterschalter).

Aufbau des Leistungsteils

Die Aufgabe des Leistungsteiles besteht darin, aus der Netzspannung ein neues Versorgungsnetz zu erzeugen, welches mit variabler Spannung und Frequenz arbeiten kann. Dazu gibt es unterschiedliche Möglichkeiten:

Direktumrichter

Der Direktumrichter arbeitet, analog wie eine Phasenanschnittsteuerung, mit einem dreiphasigen Stellglied, welches am Umrichterausgang die Energie ohne Zwischenspeicherung zur Verfügung stellt (Bild 1 und 2).

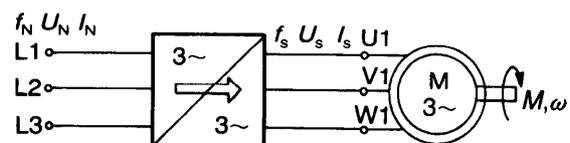


Bild 1) Blocksaltbild eines Direktumrichters.

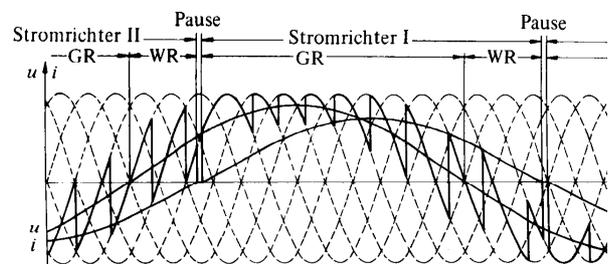


Bild 2) Strom- und Spannungsverläufe eines Direktumrichters.

Zwischenkreisumrichter

Der Zwischenkreisumrichter speichert die zu übertragende Energie in einem Energiespeicher und gibt sie anschliessend gleichmässig mit der gewünschten Spannung und Frequenz an die angeschlossenen Verbraucher (Motoren) ab. Es wird zwischen zwei Arten unterschieden:

- Der **Stromzwischenkreisumrichter** arbeitet mit einer Längsdrossel (Induktivität) als Energiespeicher, welche den Strom im Zwischenkreis konstant hält.
- Der **Spannungszwischenkreisumrichter** benötigt eine konstante Spannung über dem Zwischenkreis. Eine Kondensatorbank dient ihm als Energiespeicher.

In den meisten Applikationen werden Umrichter mit Spannungszwischenkreis eingesetzt (Bild 3). Als Eingangsstufe wird eine passive Gleichrichterbrücke eingesetzt, welche die Elektrolytkondensatorbank auf den Scheitelwert der Eingangsspannung auflädt. Diese konstante Spannung wird mit 6-Halbleiterschaltern (heute meistens IGBT's) so zerhackt, dass eine sinusbewertete, pulsbreitenmodulierte, dreiphasige Rechteckspannung entsteht, welche durch einen induktiven Verbraucher (Motor) einen sinusförmigen Strom fliessen lässt (Bild 4).

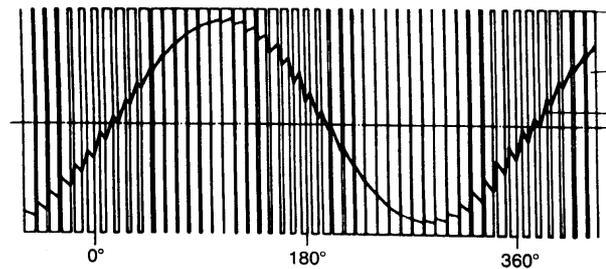
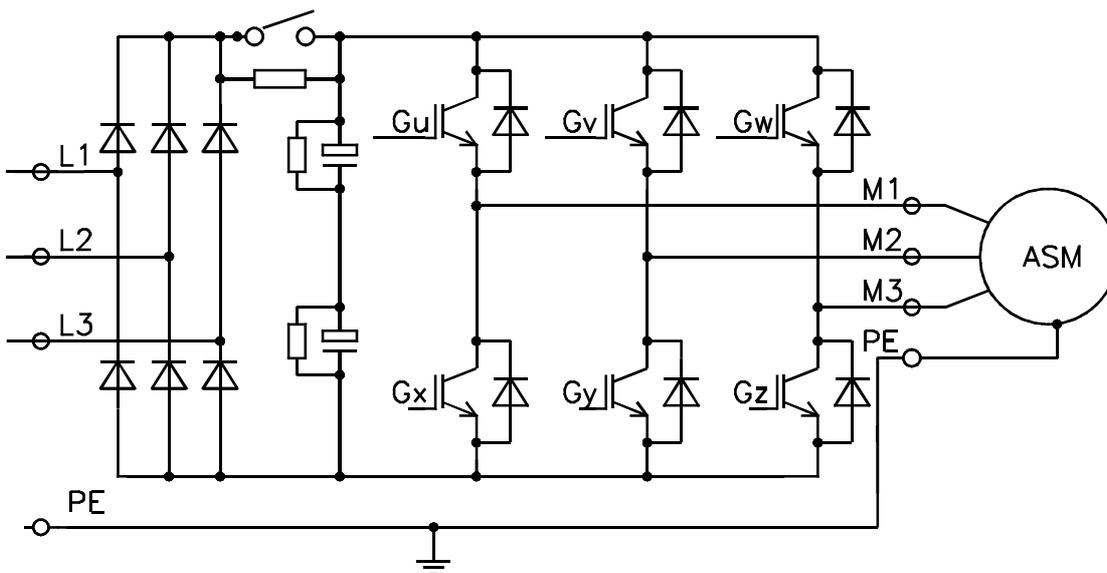


Bild 4) Typische Motorspannungen und Motorströme eines Spannungszwischenkreisumrichters.

Halbleiterschalter und deren Verluste

Für die Erzeugung von rechteckförmigen Spannungen werden Halbleiterschalter eingesetzt. Ein Linearbetrieb dieser Halbleitertransistoren ist nicht zulässig, da die enorme Verlustleistung die Bauteile sofort überhitzen würde. Dem Frequenzumrichterhersteller stehen verschiedenartige Transistoren für unterschiedliche Applikationen zur Verfügung:

- Der **Bipolartransistor** besitzt eine npn-Struktur. Zum Einschalten des Transistors wird ein Strom in den Steuereingang (Basis) eingepreßt. Der durch die Last bestimmte Ausgangsstrom I_C muss nun kleiner sein, als das Produkt Stromverstärkung $I_\beta \cdot \text{Signal}$



Blockdia.skd

Bild 3) Blockdiagramm eines Spannungszwischenkreisumrichters.

Struktur. Zum Einschalten des Transistors wird ein Strom in den Steuereingang (Basis) eingepreßt. Der durch die Last bestimmte Ausgangsstrom I_C muss nun kleiner sein, als das Produkt Stromverstärkung $I_B \cdot \text{Signalstrom } I_B$, sonst wäre der Transistor nicht vollständig geschaltet und würde bei mangelnder Kühlung schlagartig zerstört. Spannungszwischenkreisumrichter älterer Generation wurden mit Bipolartransistoren ausgerüstet.

- Der MOSFET ist ein Feldeffekttransistor, welcher zum Einschalten eine Gleichspannung an seinem Steuereingang (Gate) benötigt. Im Gegensatz zu allen anderen Transistoren steigen die Durchlassverluste nicht linear sondern quadratisch mit dem Strom an. Der MOSFET ist ein sehr schnellschaltendes Bauelement, welches vor allem in batteriegespeisten Umrichtern (Elektrobusse, Elektromobile) zu finden ist.
- Der GTO ist ein ausschaltbarer Thyristor. Im stromführenden Zustand kennt er, ähnliche wie Dioden, keinen Linearbetrieb. Zum Ausschalten benötigt er einen sehr grossen Strom an seinem Steuereingang (Gate). Der langsamschaltende GTO wird vor allem in Bahnnumrichtern eingesetzt.
- Der IGBT ist die Kombination eines MOSFET's als Eingangsstufe und eines Bipolartransistors als Ausgangsstufe. Seine Verlustleistung ist linear zum Strom. Seine typischen Anwendungsgebiete sind allgemeine industrielle Leistungsendstufen von 100 W bis 200 kW.
- Der MCT ist die Kombination eines MOSFET's als Eingangsstufe und eines ausschaltbaren Thyristors als Ausgangsstufe. Da dieses, doch eher langsamschaltende Bauelement immer noch in den Kinderschuhen steckt, ist noch nicht

abzusehen wo und wann es zum industriellen Einsatz kommen wird.

Obwohl diese Halbleiter nur als Schalter eingesetzt werden, sind sie in Sachen Wärmeverluste nicht mit dem mechanischen Schalter vergleichbar. Es wird zwischen zwei verschiedenen Verlustleistungsarten unterschieden:

Durchgangsverluste treten während der stromführenden Zeit der Halbleiter auf. Über den Leistungsanschlüssen der einzelnen Halbleiter fällt eine Spannung ab, welche mit dem lastabhängigen Strom eine Verlustleistung produziert.

Die Durchgangsverluste sind laststromabhängig und fallen vor allem bei Transistoren mit hoher Sättigungsspannung (Spannungsabfall über den Leistungspfad) sehr stark ins Gewicht.

Schaltverluste werden beim Ein- und Ausschalten von Strömen produziert. Bei einem Schaltvorgang treten Kommutierungsvorgänge auf. Das heisst, Spannung und Strom ändern gleichzeitig mit begrenzten Steilheiten ihre Werte. Dabei treten momentan sehr hohe Verlustleistungsspitzen auf, wobei sich die Verlustenergie, wegen der kurzen Zeitdauer, in Grenzen hält. Bei regelmässigen Ein- und Ausschalten summieren sich jedoch diese Verlustenergien so stark, dass sie nicht mehr vernachlässigt werden können.

Je grösser die Schaltfrequenz ist desto höher sind die Schaltverluste. Langsamschaltende Bauteile produzieren längere Kommutierungszeiten, das heisst eine grössere Verlustenergie pro Schaltvorgang. Beim Schalten von induktiven Lasten erhöhen sich die Schaltverluste, da die in den Schaltvorgang miteinbezogene Freilaufdiode zum Aufbau ihrer Sperrspannung auch Verluste produziert.

Verlustleistung von Umrichtern

Frequenzumrichter weisen im Gegensatz zu mechanischen Schaltern, wo der Kontaktwiderstand die bestimmende Verlustleistungsgrösse ist, viel grössere Wärmeverluste auf. Die exakte Berechnung der Umrichterverlustleistung ist sehr aufwendig. Zur Vereinfachung wurde eine Faustformel für 3 * 400 V Umrichter, basierend auf einem variablen Motornennstrom I_M erarbeitet. Diese setzt sich aus folgenden Elementen zusammen:

- Gleichrichter: Bei einer Gleichrichterbrücke fliesst der gleichgerichtete Strom immer über zwei Dioden, von welcher jede etwa 1.5 V Durchlassspannung aufweist:

$$P_{V_{\text{Gleichrichter}}} \approx 3 \text{ V} * I_M$$

- Zwischenkreiselektrolytkondensator: Die Kondensatoren speichern die vom Netz bezogene Energie und geben sie wieder gleichmässig an die Ausgangsstufe ab. Bei einer dreiphasigen Netzeinspeisung kann die Kondensatorbank nur sechs mal pro Netzperiode aufgeladen werden. Das verursacht grosse Rippelströme, die im Innenwiderstand des Kondensators Verlustwärme produzieren. Messungen zeigen folgende Zusammenhänge:

$$P_{V_{\text{Elko}}} \approx 0.4 \text{ V} * I_M$$

- IGBT-Ausgangsstufe: Die Verluste der Ausgangsstufe setzen sich aus den Durchlassverlusten $P_{V_{\text{Ventil}}}$ und den Schaltverlusten $P_{V_{\text{Schalt}}}$ zusammen. Die Ventilverluste sind bestimmt durch die Sättigungsspannung des eingeschalteten IGBT's. Ein Wirkstrom fliesst stets durch zwei IGBT's. Näherungsweise gilt folgender Zusammenhang:

$$P_{V_{\text{Ventil}}} \approx 6.5 \text{ V} * I_M$$

Die Schaltverluste sind von der Schaltgeschwindigkeit und von der Schalthäufigkeit f_{PWM} abhängig. Typische Werte für die Schaltverlustenergie pro Schaltstrom

von IGBT's liegen im Bereich von 0.8 mJ/A:

$$P_{V_{\text{Schalt}}} \approx 0.8 \text{ mVs} * f_{\text{PWM}} * I_M$$

- Spannungsversorgung: Ein Schaltnetzteil realisiert aus dem Zwischenkreis die Spannungsversorgung, deren Ausgangsleistung direkt als Verlustleistung zu werten gilt. Die Wärmeverluste der Mikroprozessorstuerung sind vom Motorstrom unabhängig und betragen im Schnitt 8 W. Andere Hilfsspannungsverbraucher sind jedoch wieder von der Geräteleistungs-kategorie abhängig. Um die Geräte möglichst in kleiner Bauform anzubieten, werden die Kühlkörper in der Regel mit Lüfter zwangsgekühlt. Verlustleistungsannahme:

$$P_{V_{\text{Steuerung}}} \approx 0.1 \text{ V} * I_M + 8 \text{ W}$$

Faustformel für 400 V Umrichter:

$$P_{V_U} \approx (0.8 \text{ mVs} * f_{\text{PWM}} + 10 \text{ V}) * I_M + 8 \text{ W}$$

Beispiel: Antriebswirkungsgrad

Motor: 11 kW, 380 V, 23 A, 50 Hz, $\cos\phi$ 0.83

Umrichter: 16.7 kVA, 24 A, 5 kHz

Gesucht: Wirkungsgrad von Motor, Umrichter

Verlustleistung des Motors:

$$P_{V_M} = P_I - P_O$$

$$= S * \cos\phi - P_O$$

$$S = \sqrt{3} * U * I$$

$$= 1.73 * 380 \text{ V} * 23 \text{ A} = 15.1 \text{ kVA}$$

$$P_I = 15.1 \text{ kVA} * 0.83 = 12.5 \text{ kW}$$

$$P_{V_M} = 12.5 \text{ kW} - 11 \text{ kW} = 1.5 \text{ kW}$$

Verlustleistung des Motors mit Umrichter:

$$P_{O_Z} = P_o \cdot \eta_Z$$

$$= 11 \text{ kW} \cdot 0.95 = 10.5 \text{ kW}$$

$$P_{V_{M_Z}} = 12.5 \text{ kW} - 10.5 \text{ kW} = 2 \text{ kW}$$

Der Frequenzumrichter verschlechtert den Motorwirkungsgrad um zusätzlich 5%, da die Umrichterströme oberfrequente Anteile aufweisen, welche im gewählten Motor Zusatzverluste von etwa 500 Watt verursachen.

Verlustleistung des Umrichters:

$$P_{V_U} = (0.8 \text{ mVs} \cdot f_{p_{WM}} + 10 \text{ V}) I_M + 8 \text{ W}$$

$$= (0.8 \text{ mVs} \cdot 5 \text{ kHz} + 10 \text{ V}) \cdot 23 \text{ A} + 8 \text{ W} = 330 \text{ W}$$

$$P_{I_U} = P_{I_U} + P_{V_U}$$

$$= 12.5 \text{ kW} + 0.33 \text{ kW} = 12.8 \text{ kW}$$

Wirkungsgrade:

$$\eta_M = P_o / P_i$$

$$= 11 \text{ kW} / 12.5 \text{ kW} = 88 \%$$

$$\eta_{M_Z} = P_{O_Z} / P_i$$

$$= 10.5 \text{ kW} / 12.5 \text{ kW} = 84 \%$$

$$\eta_U = P_i / P_{I_U}$$

$$= 12.5 \text{ kW} / 12.8 \text{ kW} = 97 \%$$

$$\eta_{Ant} = P_{O_Z} / P_{I_U}$$

$$= 10.5 \text{ kW} / 12.8 \text{ kW} = 82 \%$$

Beispiel: Lüftungsanlage

Eine bestehende Lüftungsanlage sorgt dafür, dass immer genügend Frischluft in der Tiefgarage vorhanden ist. Der Lüftermotor (11 kW, 380 V, 23 A, 50 Hz, $\cos\phi$ 0.83), der bisher Tag und Nacht im Betrieb war, soll über einem Frequenzumrichter (16.7 kVA, Taktfrequenz 5 kHz) drehzahlgesteuert betrieben werden. Der Umrichter regelt die Frischluftzufuhr in der Garage so, dass der CO_2 -Gehalt einen Maximalwert nicht überschreitet. Als Annahme gelten folgende vereinfachten Lastverhältnisse: Vollast 4 h/Tag, 50% Teillast 12 h/Tag, Abgeschaltet 8 h/Tag.

Es stellen sich, wirtschaftlich gesehen, folgende Fragen: In welchem Umfang reduzieren sich die Energiekosten pro Jahr? Wie lange dauert es, bis die Anlagekosten amortisiert sind?

Ausgangswert: Energieverbrauch der bestehenden Lüftungsanlage (dauernd Vollast):

$$W = P_{In} \cdot t$$

$$= 12.5 \text{ kW} \cdot 365 \cdot 24 \text{ h} = 110 \text{ MWh}$$

Lösung: Energieverbrauch der neuen Anlage.

$$W_{Vol} = P_{I_U} \cdot t_{Voll}$$

$$= 12.8 \text{ kW} \cdot 4 \text{ h} = 52 \text{ kWh}$$

$$W_{Teil} = [0.5 \cdot P_{O_Z} + 0.8 \cdot (P_{V_{M_Z}} + P_{V_U})] \cdot t_{Teil}$$

$$= [0.5 \cdot 10.5 \text{ kW} + 0.8 \cdot (2 \text{ kW} + 0.33 \text{ kW})] \cdot 12 \text{ h} = 85 \text{ kWh}$$

$$W_{tot} = 365 \cdot (W_{Voll} + W_{Teil})$$

$$= 365 \cdot (52 + 85) \text{ kWh} = 50 \text{ MWh}$$

Bemerkungen: Motor und Umrichter haben bei Halblast etwa 80% der Nennverlustleistung.

$$W_{Sp} = W - W_{tot}$$

$$= 110 \text{ MWh} - 50 \text{ MWh} = 60 \text{ MWh}$$

Kosteneinsparungen bei 0.10 Fr./kWh

$$Fr_{Sp} = W_{Spar} \cdot \text{Tarif}$$

$$= 60 \text{ MWh} \cdot 0.10 \text{ Fr./kWh} = 6 \text{ kFr.}$$

Bei Anschaffungskosten von 5000 Franken zahlt sich das geregelte Antriebssystem innerhalb von einem Jahr.

Beispiel: Pumpensteuerung

In einem Nahwärmeverbund wird die Fördermenge der Umwälzpumpe dem Wärmebedarf angepasst. Den grössten Teil der Zeit muss

die Pumpe nur etwa die Hälfte der maximalen Fördermenge liefern. Die Pumpe hat einen Wirkungsgrad von 90% und wird von einem Motor mit den gleichen Daten wie im vorhergehenden Beispiel «Lüftungsanlage» angetrieben.

Bestehende Anlage: Durchflussregelung mit einem Drosselventil. Eine Messung zeigt, dass sich bei einer Halbierung des Durchflusses die aufgenommene Motorenleistung nur um 20% reduziert. Die Aufnahmeleistung für den Pumpenmotor beträgt:

$$\begin{aligned}
 P_{50\%} &= 0.8 \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \\
 &= 0.8 \cdot 1.73 \cdot 380 \text{ V} \cdot \\
 &\quad 23 \text{ A} \cdot 0.83 \quad = \quad 10 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Neues Konzept: Durchflussregelung mit Frequenzumrichter. Der Leistungsbedarf einer Pumpe steigt mit der dritten Potenz des Förderstromes, er ist also bei halber Fördermenge achtmal kleiner: ($0.5^3 = 0.125$).

$$\begin{aligned}
 P_{\text{Hyd}} &= 0.125 \cdot \eta_P \cdot P_M \\
 &= 0.125 \cdot 0.9 \cdot 11 \text{ kW} = 1.2 \text{ kW} \\
 &\quad 4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{V_P} &= (1 - \eta_P) \cdot P_M \\
 &= (1 - 0.9) \cdot 11 \text{ kW} = 1.1 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Die Reduktion der Verlustleistung bei 12.5% Teillast ist etwa 50% ($k = 0.5$).

$$\begin{aligned}
 P_{50\%} &= P_{\text{Hyd}} + k \cdot \\
 &\quad (P_{V_P} + P_{V_M} + P_{V_U}) \\
 &= 1.24 \text{ kW} + 0.5 \cdot \\
 &\quad (1.1 \text{ kW} + 2 \text{ kW} + \\
 &\quad 0.33 \text{ kW}) \quad = \quad 3 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Die Leistungseinsparung beträgt somit 7 kW oder 70% gegenüber der Förderstromanpassung mit einer Drossel.

Aufgepasst beim Umrichter Einsatz!

Digitale Umrichter haben Parametriermöglichkeiten mit Standardvorgaben. Ein Umrichter kann nur energieeffizient arbeiten, wenn seine Parametrierung dem Motor und der Anwendung angepasst ist.

Motorparameter wie Motornennstrom, Motornennspannung und Motornennfrequenz entsprechen in der Regel den Werten eines dem Umrichter angepassten Motors und können, falls erforderlich, auf dem Typenschild oder Datenblatt des Motors abgelesen werden. Die Spannungsfrequenzcharakteristik ist jedoch anwendungsspezifisch und sollte angepasst werden.

Anwendung	Charakteristik
Konstante Lastmomente	Lineare Spannungsanhebung
Lüftungen	Quadratische Spannungsanhebung
Pumpen	Lineare oder quadratische Spannungsanhebung
Wechselnde Lastmomente	Automatische Spannungsanhebung

Tab. 1) Die richtige Spannungsfrequenz-Charakteristik muss für die entsprechende Anwendung ausgewählt werden.

Frequenzumrichter erzeugen am Motorausgang schnelle Spannungsänderungen, welche in Zusammenhang mit langen Motorleitungen (grösser als 20 Meter) gefährliche Überspannungsspitzen an den Motoranschlüssen entstehen lassen, die dann einen Durchschlag in der Motorwicklung verursachen können. Eine Abhilfe bringen da nur Motordrosseln direkt am Ausgang des Umrichters.

Werden Frequenzumrichter ohne Eingangsfiler betrieben, können andere am gleichen Netz angeschlossene Verbraucher gestört werden.

Zusammenfassung

Die Frequenzumrichtertechnik hat sich auf dem Antriebsmarkt durchgesetzt. Die Anschaffungskosten sind etwa fünfmal grösser als die entsprechender mechanischer Schalter. Die Mehrkosten lassen sich jedoch in vielen Applikationen durch Energieeinsparungen in vernünftiger Zeit amortisieren. Der Wirkungsgrad von Umrichtern ist so hoch (grösser als 95%), dass die Verluste in der Berechnung der Energieeinsparung meistens vernachlässigt werden können. Nur richtig parametrisierte Umrichter arbeiten energieeffizient.

6. Antriebssysteme

Autor: Rolf Gloor

Die verschiedenen Elektromotoren wurden vor über 100 Jahren erfunden und haben sich bis heute nicht wesentlich verändert. Die Fortschritte in der Elektronik haben die Möglichkeiten der Antriebstechnik aber stark erweitert. Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen elektrischen Antriebssystemen. Noch zahlreicher sind deren Bezeichnungen. Die im Maschinenbau gebräuchlichen Antriebe lassen sich in folgende vier Gruppen einteilen: Kollektor-, Synchron-, Asynchron- und Reluktanzmaschinen.

Nach den ergiebigen Energiesparmöglichkeiten des optimalen Maschinensystems, der Ansteuerung und der Dimensionierung liegen noch Potentiale in der Auswahl des richtigen Antriebes. Der Wirkungsgrad eines Motors wird in der Praxis erst bei grösseren Antrieben berücksichtigt, obwohl es sich auch bei kleinen Antrieben, welche eine hohe Betriebsdauer haben, bezahlt macht. In Bezug auf den Wirkungsgrad liegen zwischen den einzelnen Systemen keine riesigen Unterschiede, aber doch lohnende Möglichkeiten. Ein 2.2 kW Antrieb mit 83% statt 78% Wirkungsgrad und 8000 Jahresbetriebsstunden spart 500 Franken Elektrizitätskosten in fünf Jahren. Dieses Kapitel will die einzelnen Antriebssysteme beschreiben und die entsprechenden Einsatzbereiche aufzeigen.

Elektromotor und Verluste

Die technische Grösse eines Motors ist mit dem Abstand (mm) von der Welle zur Auflage definiert (Bild 1). Diese Distanz wird als Baugrösse bezeichnet. Für Asynchronmotoren ist diese Grösse normiert (IEC-Normmotor). Beispiel: Ein Motor der Bau-

grösse 100 hat einen Durchmesser von 200 mm.

Ein Elektromotor besteht im wesentlichen aus folgenden drei Teilen:

Stator: der feststehende Teil

Rotor: der rotierende Teil

Gehäuse, Lager, Achse und Kühlung

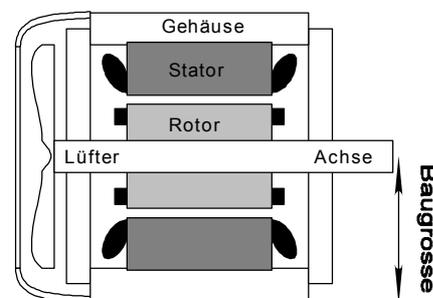


Bild 1) Schnitt durch einen Elektromotor.

In einem Elektromotor fallen verschiedene Verluste an. Die Verlustleistung muss abgeführt werden, damit sich der Motor nicht überhitzt. Es sind die Verluste (und die zulässige Erwärmung), welche die Grösse eines Motors bestimmen:

Kupferverluste (Leiterstromdichte)

- Ankerstrombelag für den drehmomentbildenden Strom.
- Magnetisierungsstrom für die Erregung. Bei einer Erregung mit Permanentmagneten entfallen diese Verluste.

Eisenverluste (Qualität des Blechmaterials)

- Wirbelstromverluste (geblechte Eisenstapel)
- Ummagnetisierungsverluste (Hysterese)

Zusatzverluste (Motorkonstruktion)

- Motorventilator
- Reibungsverluste (Lager und Dichtung)

- Strömungsverluste im Motor (Luftspalt ...)
- Oberwellenverluste und weitere

Die Verluste entstehen in erster Linie im Kupfer (den elektrischen Leitern) und in zweiter Linie im Eisen (den magnetischen Leitern). Die Verluste steigen quadratisch mit dem abgenommenen Drehmoment bei mehr oder weniger konstanten Leerlaufverlusten (Bild 2).

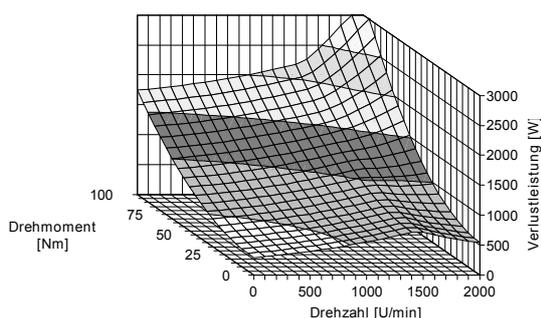


Bild 2) Verlustleistung eines vierpoligen 11 kW Asynchronmotors bei unterschiedlichen Frequenzen und Belastungen.

Je besser die Verlustwärme abgeführt wird, desto mehr Drehmoment und damit auch Leistung kann aus einem Motor herausgeholt werden (Bild 3). Ein hoch ausgenutzter Antrieb hat nicht unbedingt einen besseren Wirkungsgrad.

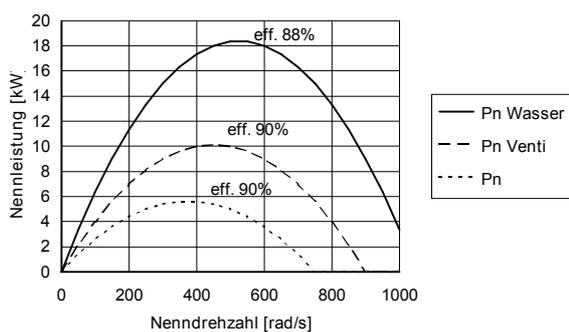


Bild 3) Nennleistung bei verschiedenen Nennzahlen für einen Motor mit Wasserkühlung, mit Ventilator und ohne aktive Kühleinrichtung.

Die Verluste in einem Elektromotor nehmen weniger stark zu als seine Nennleistung. Je grösser ein Elektromotor ist, desto besser

wird sein Wirkungsgrad, wenn seine Nennleistung gebraucht wird.

Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener Leistung. Der im Datenblatt eines Motors angegebene Wirkungsgrad gilt für den Betrieb bei der Nennleistung (bei Nenndrehzahl). Im Leerlauf oder im Stillstand haben alle Motoren den Wirkungsgrad Null (Bild 4).

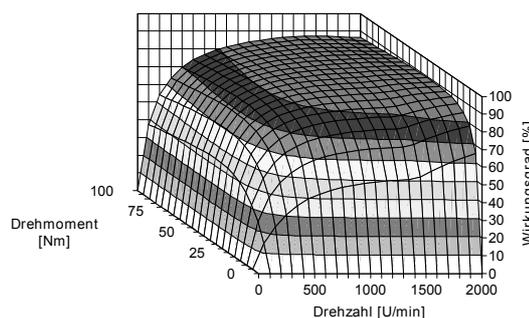


Bild 4) Wirkungsgrad eines vierpoligen 11 kW Asynchronmotors bei unterschiedlichen Frequenzen und Belastungen.

Der Elektromotor ist nur ein Teil des Antriebssystems, welches aus der elektrischen Ansteuerung, dem Kabel, dem Motor und dem Getriebe besteht.

Eine besondere Beachtung verdient das Getriebe. In den meisten Getriebekatalogen sind keine Angaben über den Wirkungsgrad zu finden. Für eine Zahnradstufe kann je nach Getriebegröße ein Wirkungsgrad von 94 bis 98% angenommen werden. Dieser Wirkungsgrad bezieht sich aber auf das Nenndrehmoment. Wenn zum Beispiel ein zweistufiges 3 kW, 200 Nm Getriebe bei Nennleistung einen Wirkungsgrad von 91% hat, so beträgt das Reibungsmoment 20 Nm. Im Teillastbereich bei 50 Nm Lastmoment ist aber sein Wirkungsgrad nur noch 71%. Schneckengetriebe haben tiefe Wirkungsgrade und verheizen im Teillastbereich mehr Leistung als sie abgeben.

Technische Ausführung von Motoren

Toleranzen: Die elektromechanischen Angaben für einen Motor sind oft nur berechnet und unterliegen wegen der Blechqualität Toleranzen. Es wird eine zulässige Abweichung von +/- 10% toleriert. Beispiele: 91% Wirkungsgrad kann 90% bis 92% sein, 1450 U/min Nenndrehzahl kann bei der Asynchronmaschine zwischen 1445 und 1455 liegen.

Leistungsreduktion: Bei Umgebungstemperaturen über 40 °C und Höhenlagen von über 1000 m ü.M. muss der Motor deklassiert werden.

Aussetzbetrieb: Ein Motor, welcher oft ein- und ausgeschaltet wird, kann sich mehr als im Dauerbetrieb erwärmen und dadurch ausfallen. Wenn eine Leistung nur für eine kurze Einschaltdauer (innerhalb von 10 Minuten) benötigt wird, kann vom Motor auch eine höhere Leistung abgenommen werden (Handbohrmaschine ...).

Isolationsklasse: Die Isolationsstoffklasse beschreibt die zulässige Dauertemperatur der Wicklungsisolation. Klasse B (130 °C) gilt als Standard. Klasse F (155 °C) ist bei umrichter-gespiesenen Motoren empfehlenswert. Klasse H (180 °C) ist nur in besonderen Fällen erforderlich.

Schutzart: Die Schutzart (zum Beispiel IP 12) kennzeichnet den Schutz eines elektrischen Gerätes gegen das Eindringen von Fremdkörpern wie Finger, Staub usw. (erste Ziffer) und gegen Wasser (zweite Ziffer). Die Schutzart nimmt keinen Bezug auf die Beständigkeit gegenüber Lösungsmittel und Korrosion. Für die Schutzart ist die Wellendichtung die kritische Stelle. Ein wasserdichter Motor braucht eine spezielle Dichtung, welche regelmässig ersetzt werden müsste und eine relativ hohe Reibung (Verluste) hat. In vielen Fällen genügt da auch eine Schleuderscheibe auf der Welle.

Explosionsschutz: Elektromotoren gibt es in unterschiedlichen Zündschutzarten (erhöhte Sicherheit «e», druckfeste Kapselung «d»). Ein explosionsgeschützter Motor muss zusammen mit dem entsprechenden Steuergerät (Beispiel: Frequenzumrichter) bescheinigt werden.

Zuverlässigkeit von Antriebssystemen
Elektrische Antriebssysteme sind im allgemeinen zuverlässige Systemkomponenten. Folgende Kriterien bestimmen die Zuverlässigkeit:

Bei Kollektormaschinen (Gleichstrommotoren, Universalmotoren ...) liegt die Bürstenstandzeit zwischen 1000 und 8000 Betriebsstunden. Der Kollektor ist jeweils auch zu überprüfen und gegebenenfalls zu revidieren.

Die Lager halten 10 000 bis 50 000 Stunden. Bei grossen und in unbeaufsichtigten Anlagen installierten Antrieben werden die Lagervibrationen und Temperaturen überwacht. Bei Riemenantrieben ist eine verstärkte Lagerung am Motor vorzusehen. Ein Flachriemen ist einem Keilriemen vorzuziehen. Der Riemen und die Spannung sind regelmässig zu kontrollieren.

Bei der Verwendung von Motoren mit hohen Schutzarten (zum Beispiel: IP 56) ist die Lagerdichtung nach den angegebenen Betriebsstunden auszuwechseln.

Die Leistungselektronik erreicht Ausfallraten von unter 1%. Nach etwa 7 Jahren sind die Elektrolytkondensatoren ausgetrocknet. Nach 15 Jahren ist die Gefahr gross, dass beim Lieferanten niemand mehr das Gerät kennt.

Die Wicklung erreicht 100 000 Stunden Lebensdauer bei Nennbetrieb. Überspannungsimpulse im Motor, zum Beispiel vom Frequenzumrichterbetrieb verursacht, können die Wicklungsisolation schneller altern lassen, im Extremfall innert ein paar Stunden.

Gleichstrommotor

Der Gleichstrommotor ist der klassische Regelantrieb. Er wird als Hauptantrieb bis zu einigen 100 kW Leistung als Universalantrieb und als Servoantrieb bis hinunter in den Wattbereich eingesetzt.

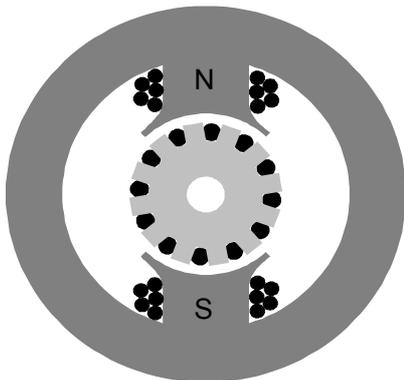


Bild 5) Schnitt durch einen zweipoligen Reihen-schluss-Gleichstrommotor.

Das Prinzip des Gleichstrommotors ist relativ einfach, die mechanische Konstruktion dafür recht aufwendig. Die Leiter des Rotors werden von Magnetfeld des Stators durchdrungen. Die Kommutierung (Nachführung des Strombelages im Rotor) erfolgt auf mechanische Art. Dazu sind auf der Achse Schalter (Kollektor mit Bürsten) angebracht, welche direkt durch die Drehung die entsprechenden Leiter (Windung) einschalten. Die mechanische Festigkeit des Kollektors begrenzt die Maximaldrehzahl des Gleichstrommotors. Das Drehmoment ist proportional zum Strom, die Drehzahl proportional zur Spannung. Ein entsprechendes Regel-/Steuergerät ist einfach und günstig (Seriewiderstand in der Erregung, Thyristortechnik, DC-Chopper).

Für die Erregung (Erzeugung des Magnetfeldes) gibt es folgende Varianten:

- Hauptschluss
(Erregung im Ankerstromkreis)
- Neben- und Fremdschluss
(Erregung unabhängig des Ankerstromes)
- Compoundschluss
(Kombination oberer Varianten)

- Permanenterregung
(Erregung mit Permanentmagneten)

Das Prinzip des Gleichstrommotors funktioniert auch mit Wechselstrom, wenn die Erregung und der Ankerstrom die gleiche Frequenz haben. Die meisten einfachen Kleinantriebe (Scheibenwischer, Fensterheber, Kinderspielzeuge, Haushaltgeräte, Stellantriebe ...) sind mit Kollektormotoren ausgerüstet, welche direkt ans entsprechende Netz geschaltet werden können.

Oft wird auch von bürstenlosen Gleichstrommaschinen «brushless DC» gesprochen. Damit ist ein kommutatorloser Antrieb mit dem Betriebsverhalten einer Gleichstrommaschine gemeint. Eigentlich handelt es sich um eine mit Permanentmagneten erregte Synchronmaschine, welche mit meist blockförmigen Strömen angesteuert wird.

Synchronmotor

Der Synchronmotor wird in der Elektrizitätserzeugung als Generator eingesetzt. Als Motor findet er durch den Einsatz von Permanentmagneten mit der Umrichter-technik immer mehr Verbreitung. Beim Synchronmotor befindet sich die Erregung im Rotor, welcher sich synchron mit dem Feld des Statorstromes dreht.

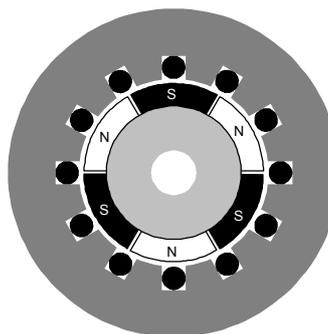


Bild 6) Schnitt durch einen sechspoligen permanent-erregten Synchronmotor.

Wenn der Rotor nicht mit der Statorfrequenz drehen kann (hohe Beschleunigung oder zu hohes Lastmoment), fließen in den Statorwindungen sehr hohe Ströme. Der Synchronmotor kann daher nur bei einfachen Anwendungen zusammen mit einem Fre-

quenzumrichter betrieben werden. Bei Servoantrieben wird durch einen Rotorlagegeber im Motor (zum Beispiel ein Resolver) der Elektronik mitgeteilt, welche Windungsspule gerade im Magnetfeld ist und eingeschaltet werden soll. Die Kommutierung erfolgt elektronisch (Transistoren als Schalter). Es gibt auch Ansteuergeräte, welche Synchronmotoren ohne Sensoren betreiben (zum Beispiel durch die Erfassung der dritten Oberwelle). Für einen hochwertigen Servoantrieb (Beherrschen von tiefen Drehzahlen, geringe Momentpulsationen) ist eine Rückführung von Bewegungsinformationen notwendig (Bild 7).

Synchronmotoren mit Permanentmagneten sind für Drehmomente bis etwa 30 Nm interessant. In Katalogen sind sehr selten Angaben über den Wirkungsgrad zu finden. Obwohl im Rotor eigentlich keine Verluste entstehen sollten, werden die Motoren sehr heiss, vor allem bei höheren Nenndrehzahlen.

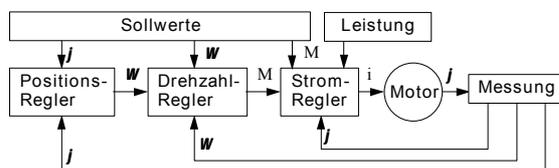


Bild 7) Typische Reglerstruktur eines Servoantriebssystems.

Asynchronmotor

Der Asynchronmotor ist der am meisten verwendete Industriemotor. Er kann direkt (mit Motorschutzschalter) ans Drehstromnetz angeschlossen werden und ist sehr robust und einfach zu bauen. Wegen diesen guten Eigenschaften ist dieser Antrieb international normiert und er wird auf der ganzen Welt in grossen Stückzahlen produziert.

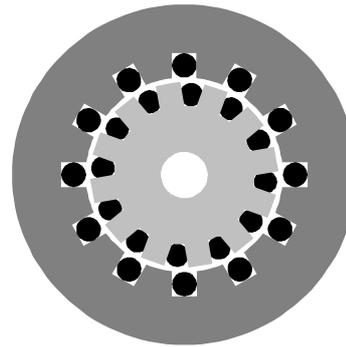


Bild 8) Schnitt durch einen Asynchronmotor.

Der Asynchronmotor hat seinen Namen von der Tatsache, dass er sich nicht genau mit der Netzfrequenz dreht. Er hat nur ein Drehmoment, wenn seine Drehzahl von der synchronen Drehzahl abweicht. Im Betriebsbereich ist das Drehmoment proportional zu dieser Abweichung, welche als Schlupf bezeichnet wird. Beim Asynchronmotor erfolgt die Erregung über die Statorspannung. In die Nuten des Stators sind die Wicklungspakete eingelegt. Im Rotor ist beim Kurzschlussankermotor nur ein Leiter pro Nut eingelegt oder eingegossen. Es werden weder Bürsten noch Magnete verwendet.

Der Asynchronmotor wird direkt an das Drehstromnetz (3 * 400 V) angeschlossen. Für kleine Leistungen (unter 2 kW) kann der Asynchronmotor mit einem Kondensator auch an das Wechselstromnetz (1 * 230 V) angeschlossen werden. Für noch kleinere Leistungen gibt es den Spaltpolmotor (einphasiger Asynchronmotor mit gespaltenem Stator), welcher einen schlechten Wirkungsgrad hat.

Beim Anlauf nimmt der Asynchronmotor sehr hohe Ströme auf. Um die Belastung des Stromnetzes zu reduzieren wird der Motor bei grösseren Leistungen mit einer tieferen Spannung angefahren. Mit dem Stern/Dreieck Anschluss liegen in der Sternschaltung 400 V über zwei Windung an. Nach einer gewissen Zeit wird durch einen externen Schalter in die Dreieckschaltung umgeschaltet und 400 V an eine Windung angelegt. In der Sternschaltung hat der Motor nur ein Drittel des Nenndrehmomentes. Auf dem Typenschild sind die erforderlichen

Spannungen für die Nennleistung in Dreieck- und Sternschaltung angegeben (zum Beispiel: Nennspannung 400/700 V). Die hohen Anlaufströme und die mechanischen Anfahrstöße können auch mit einem Sanftanlaufgerät reduziert werden. Dieses Phasenanschnittgerät zur kontinuierlichen Spannungserhöhung wird normalerweise nach dem Hochfahren überbrückt.

Motoren sind zur maximalen magnetischen Ausnützung des Eisens oft sehr knapp ausgelegt. Das heisst, wenn sie mit einer zu hohen Spannung betrieben werden, kommt das Eisen in die Sättigung und der Strom nimmt überproportional (hohe Leerlaufverluste) zu.

Für besondere Anwendungen (Aufzüge ...) werden auch Asynchronmotoren mit einem hohen Läuferwiderstand (Rotorwiderstand) gebaut. Je höher der Widerstand ist, desto mehr verschiebt sich das maximale Drehmoment (Kippmoment) zu tiefen Drehzahlen. Solche Widerstandsläufermotoren haben einen sehr schlechten Wirkungsgrad und brauchen deshalb ein grosses Gehäuse, um die Verlustwärme loszuwerden. Bei grösseren Leistung wird statt des Kurzschlussankers im Rotor eine Drehstrom-Wicklung eingelegt, deren Enden über drei Schleifringe von aussen abgegriffen werden. Die Rotorleistung wird dann in externen Widerständen verheizt (Anlaufwiderstände) oder über ein Steuergerät (Untersynchrone Kaskade) ins Netz zurückgespielen.

Mit einem Frequenzumrichter kann die Statorspannung und Frequenz des Asynchronmotors stufenlos verändert werden. Dadurch wird aus dem Standardmotor ein drehzahlveränderliches Antriebssystem. Mit einem Rotorlagegeber, dem Errechnen der Magnetisierung und dem Einprägen der entsprechenden Statorströme (Vektorregelung) hat ein Asynchronmotor die Eigenschaften eines Servoantriebes.

Die standardisierten Asynchronmotoren sind für den Betrieb am Drehstromnetz konstruiert. Das heisst, sie haben ein hohes Anlaufmoment (Kippmoment das zwei- bis

dreifache des Nennmomentes) und sind getrimmt auf einen möglichst niedrigen Anlaufstrom (Stromverdrängungsnuten). Auch Asynchronmaschinen im Megawattbereich, welche in Einzelstücken hergestellt werden, unterliegen dieser Orientierung am Netzbetrieb. Ein Antriebssystem, welches aus einem Umrichter und einer Asynchronmaschine besteht, stellt andere Anforderungen an den Motor.

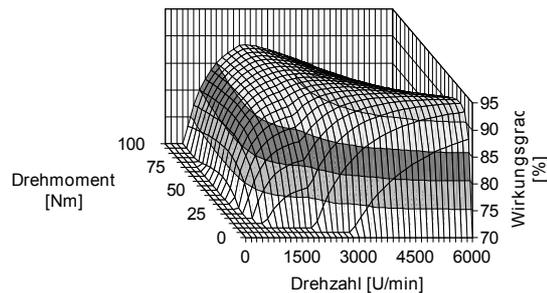


Bild 9) Wirkungsgradfeld eines streuarmlen Asynchronmotors.

Durch eine geschickte Konstruktion, welche die Streuung minimiert, kann das Kippmoment sehr viel höher liegen. Dadurch kann der Asynchronmotor kurzzeitig ein mehrfaches seines Nennmomentes abgeben, ohne überdimensioniert zu sein. Bei Anwendungen, welche über einen weiten Bereich konstante Leistung benötigen (spannabhebende Bearbeitung, Zentrumswickler, Traktionsfahrzeuge ...), erlaubt

dieses hohe Kippmoment einen grossen Feldschwächbereich, indem der Wirkungsgrad besser als im Nennpunkt ist (Bild 9).

Reluktanzmotor

Beim Reluktanzmotor entsteht die Kraft im Luftspalt zwischen Eisen und Eisen. Es muss zwischen drei Ausführungsarten unterschieden werden:

Asynchronmotor mit Reluktanzmoment: Dabei handelt es sich um einen Asynchronmotor, welcher einen Rotor mit ausgeprägten Polen hat. Bis in die Nähe der Nenn Drehzahl hat dieser Antrieb die Kennlinie eines Asynchronmotors. Dann springt er in das Verhalten eines Synchronmotors. Dieser Antrieb hat einen hohen Blindleistungsbedarf (schlechter $\cos \varphi$) und einen schlechten Wirkungsgrad. Er ist nur für einfache Anforderungen (geringe Störmomente) geeignet.

Schrittmotor: Von einigen Watt bis zu einigen 100 Watt Leistung wird dieses gesteuerte System bei Positionierantrieben (Drucker, Automaten ...) eingesetzt. Es ist sehr kostengünstig, hat einen schlechten Wirkungsgrad und ist für Anwendungen mit geringen Störmomenten geeignet.

Switched reluctance drive: Wenn der Reluktanzmotor mit einem Rotorlagegeber ausgerüstet und mit einem speziellen Umrichter angesteuert wird, spricht man von einem geschalteten Reluktanzmotor «SR-Drive».

Der SR-Motor (Bild 10) wird von einem Steuergerät (Bild 11) gespeist, welches über Halbleiter-Schalter Strom in die Motorwicklungen fliessen lässt. Ein Regelsystem, welches über Sensoren den Strom und die Rotorlage erfasst, steuert die Schalter. Der Stator besteht aus bewickelten, ausgeprägten Polen. Die gegenüberliegenden Spulen werden gemeinsam gespeist und bilden eine Phase mit Nord- und Südpol. Der Rotor ist eine einfache zahnradähnliche

Konstruktion ohne Magnete, Wicklungen und Bürsten.

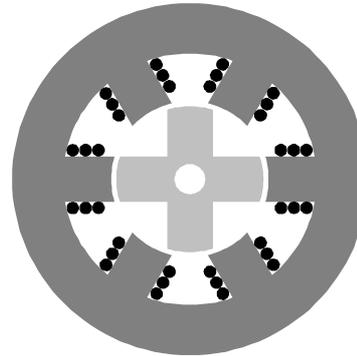


Bild 10) Schnitt durch einen Reluktanzmotor mit vier Rotorpolen und sechs Statorpolen.

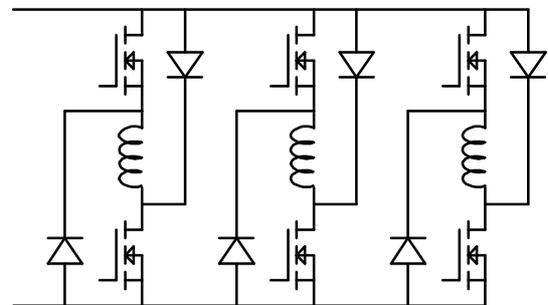


Bild 11) Ansteuerung für einen dreiphasigen Switched Reluctance Motor. Die Motorwicklungen liegen zwischen den Schaltern.

Beim Einschalten der entsprechenden Statorwicklungen wirkt auf den Rotor ein Drehmoment, welches von der magnetischen Anziehungskraft zwischen Stator- und Rotorpol herrührt. Die Regelung sorgt anhand der Informationen vom Rotorlagegeber dafür, dass die Spulen im richtigen Augenblick erregt sind, um das benötigte Drehmoment auf die wirksamste Weise zu erzeugen. Bei tiefen Drehzahlen arbeitet die Steuerung im «Choppermodus»: In die Windungen wird ein Strom über einen bestimmten Rotorwinkel eingepreßt. Bei höheren Drehzahlen arbeitet die Steuerung im «Pulsmodus»: In einer entsprechenden Rotorlage wird für eine bestimmte Zeitspanne eine Spannung an die Windungen angelegt.

Es ist die Flexibilität der Motorerregung, welche weitgehend die hervorragenden Regeleigenschaften und den hohen Wirkungsgrad über einen grossen Drehzahl-

und Drehmomentbereich ermöglicht. Der Rotorlagegeber dient auch als Tacho. Drehmoment und Drehzahl sind voll regelbar, was eine anwendungsoptimale «konstruierbare» Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie innerhalb des jeweiligen Leistungsbereichs ermöglicht. Bisher konnten sich SR-Antriebssysteme wegen der fehlenden Standardisierung erst in kundenspezifischen Massenprodukten behaupten.

Vergleich von Antriebssystemen

Weit mehr als der technische Aufwand beeinflusst die Losgrösse der Produktion und die Standardisierung im Marketing den Preis der Antriebssysteme. Für Industrieantriebe ist der IEC-Normmotor und der darauf aufbauende Markt der Frequenzumrichter eine Richtgrösse. Normmotoren kosten ab einigen kW etwa 10 bis 15 Franken pro Kilogramm Motorengewicht. Bei zwei- und vierpoligen Motoren ergibt das etwa 100 Franken pro kW. Frequenzumrichter kosten im höheren Leistungsbereich etwa 200 Franken pro kW, also etwa das Doppelte des Motors (Bild 12).

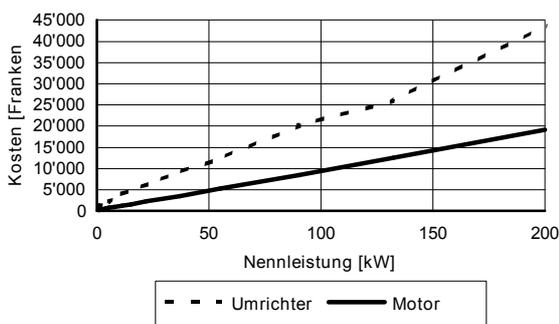


Bild 12) Durchschnittliche Kosten von Asynchronmotoren und Frequenzumrichtern.

Ein Servoantriebssystem mit einem Synchronmotor unterscheidet sich vom Asynchronmotor mit Frequenzumrichter theoretisch nur durch die Permanentmagnete im Motor und durch den Rotorlagegeber. Der kleine Synchronmotor hat einen besseren Wirkungsgrad als der entsprechende Asynchronmotor und kann dadurch

kompakter gebaut werden, was die Mehrkosten für die Magnete ausgleicht. Der Resolver alleine ist nicht schuld, dass ein 2 kW Synchronservo mehr als doppelt so teuer wie eine entsprechende Asynchronmaschine mit Frequenzumrichter für 1400 Franken ist.

Wenn man die Theorie der Antriebe betrachtet, so müsste der Synchronmotor in Bezug auf das Leistungsgewicht, die Dynamik und den Wirkungsgrad gewinnen. Bei einem Vergleich der Katalogdaten (Bild 13) von in der Schweiz erhältlichen Motoren ist im Leistungsgewicht keine Dominanz der Synchronmotoren erkennbar geworden. Deutlich wurde eine Unterlegenheit der Gleichstromantriebe. Wenn man davon ausgeht, dass die Motordimension vor allem von der Verlustleistung abhängt, ist das Leistungsgewicht auch ein Mass für den Wirkungsgrad. Bei einem Hersteller von Asynchronmotoren fiel auf, dass seine Motoren ein überdurchschnittlich gutes Leistungsgewicht haben. Auf Anfrage erklärte dieser Hersteller, dass von seinen Motoren die Nennleistung nie dauernd abverlangt würde, und er daher seine Motoren so klassiere.

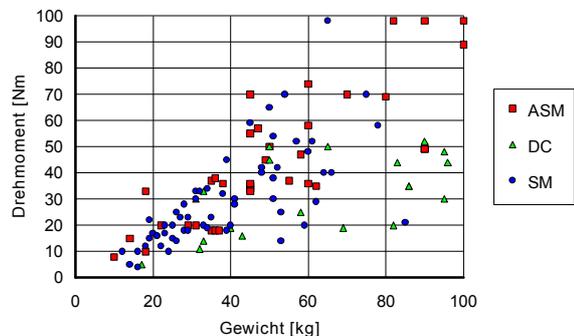


Bild 13) Vergleich von Drehmoment und Gewicht verschiedener Motoren.

Auch in bezug auf den Wirkungsgrad sind schon Anbieter aufgetreten, welche die Daten den Kundenwünschen (leider meistens nur auf dem Papier) anpassen. Sie rechnen damit, dass der Wirkungsgrad nicht überprüft wird oder dass die Messgenauigkeit (elektrische Leistung +/- 1%, mechanische Leistung +/- 2%) die Übertreibung schluckt. Dem Anwender, der Wert auf einen guten Wir-

kungsgrad legt, wird empfohlen, seine Maschine mit Musterantrieben auszurüsten, und die verschiedenen Antriebe mit einem einfachen Stromzähler zu vergleichen.

Es gibt keinen universalen Superantrieb. Je nach Anwendung haben die verschiedenen Antriebssysteme ihre Vor- und Nachteile. Mit dem Einzug der Frequenzumrichter wurde die Gleichstrommaschine schon mehrmals für tot erklärt. Betrachtet man die Zollstatistik der Schweiz (Bild 14), so sieht man, dass der Trend nicht auf ein baldiges Ableben hinweist.

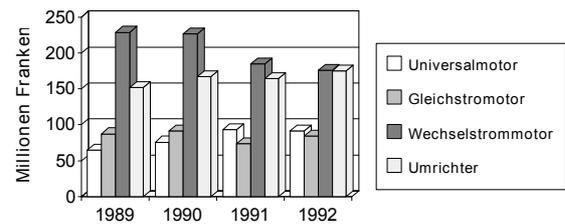


Bild 14) Schweizerischer Import von elektrischen Antrieben.

Ein Vergleich der Antriebssysteme (Tab. 1) lässt in bezug auf den Wirkungsgrad folgende verallgemeinerte Aussage zu:

- Als Antriebe bis in den Kilowattbereich sind Antriebe mit Permanenterregung (Synchron und Gleichstrom) bezüglich Wirkungsgrad besser als die Asynchronmotoren.
- Bei Leistungen ab zehn Kilowatt ist derzeit die Asynchronmaschine meistens die beste Lösung.

Antriebssystem	Gleichstrommotor m. Chopper	Synchronmotor mit Servoregler	Asynchronmotor mit Umrichter	Switched Reluctance Drive
Leistung	bis 3 kW	bis 3 kW	ab 0.3 kW	bis 300 kW
Preis Motor	teuer	teuer	günstig	günstig
Preis Elektronik	günstig	teuer	mittel	mittel
Robustheit	mittel	gut	sehr gut	sehr gut
Regelgüte	sehr gut	gut	mittel	gut
Standardisierung	mittel	gering	hoch	keine
Wirkungsgrad	mittel	gut	mittel	mittel

Tab. 1) Grober Vergleich der verschiedenen Antriebssysteme.

7. Sicherheit im Maschinenbau

Autor: Albert Marty

Sicherheit und sparsamer Umgang mit Ressourcen sind wesentliche Anforderungen an moderne Maschinen und Anlagen und dienen dem Schutze des Menschen. Als Gemeinsamkeit bei beiden Anforderungen gilt, dass sie möglichst früh, das heisst in die Konzeptionsphase des Produktes einfliessen müssen. Nur so sind optimierte und preisgünstige Lösungen zu erreichen. Sichere und verbrauchsarme Maschinen zeigen die Prozessbeherrschung des Herstellers, sie sind ein Qualitätsmerkmal.

Während einerseits der spezifische Energieverbrauch in gesetzlichen Rahmenbedingungen (noch) nicht limitiert ist, sind andererseits die notwendigen Vorschriften bezüglich Sicherheit in der EU wie der Schweiz vorhanden. Insgesamt existieren momentan 14 EG-Richtlinien mit CE-Konformitätsbewertungsverfahren.

Diese dienen dem freien Warenverkehr und vereinheitlichen die minimalen Anforderungen an die betreffenden Produkte. Jeder EG-Staat muss diese Richtlinien in sein Gesetzeswerk einbinden. Damit haben diese EG-Richtlinien «Gesetzescharakter». Zur Erklärung dieser Richtlinien werden von privatrechtlichen Organisation (z.B. CEN/CENELEC) Normen ausgearbeitet. Diese Normen haben jedoch «unverbindlichen Charakter». Im Maschinenbau haben insbesondere folgende EG-Richtlinien grosse Bedeutung:

- 89/392/EWG «EG-Maschinenrichtlinie»
- 73/23/EWG «Niederspannungsrichtlinie»
- 89/336/EWG «Elektromagnetische Verträglichkeit»
- 87/404/EWG «Einfache Druckbehälter»

Weil die «EG-Maschinenrichtlinie» von all diesen Richtlinien zweifellos die grösste Bedeutung hat, wird im nachstehenden Artikel besonders darauf eingetreten.

Gefahrenanalyse und Integration des Sicherheitskonzepts

Damit die möglichen Gefahren von Maschinen erkannt werden können, empfiehlt es sich, die verschiedenen Betriebsarten eines jeden Systems zu analysieren. Bis heute gemachte Gefährdungsanalysen zeigen, dass es sinnvoll ist, zwischen dem Normalbetrieb und den Sonderbetriebsarten zu unterscheiden. Somit lassen sich nur Sicherheitsanforderungen festlegen, wenn zuvor die möglichen Gefährdungen systematisch in einer Analyse ermittelt werden. Wiederum zeigen sich Gemeinsamkeiten von Sicherheit und Energiesparen. Eine Gefährdung für den Menschen entsteht dann, wenn auch Energie in irgendeiner Form vorhanden ist. Das Abschalten einer Maschine ist nun sowohl Sicherheitsmassnahme wie auch Massnahme zur Steigerung der Energieeffizienz.

Bei der Entwicklung von Maschinen ist der Hersteller verpflichtet gemäss «EG-Maschinenrichtlinie» (siehe Kasten Seite 46) eine Gefährdungsanalyse vorzunehmen; die damit hervorgehenden Gefahren zu ermitteln und mit konstruktiven Lösungen aufzeigen, dass alle Gefahren im Hinblick auf Personen, mit Einbezug der verschiedenen Betriebsarten eliminiert werden. Alle ermittelten Gefährdungen sind einer Risikobetrachtung zu unterziehen. Jedes Risiko eines Ereignisses ist abhängig vom Schadenumfang und von der Eintrittshäufigkeit. Die zu beurteilende

Gefahr ist zusätzlich einer Risikostufe zuzuordnen (minimiert, normal, erhöht).

Überall dort, wo aufgrund der Risikobeurteilung das Risiko nicht akzeptiert werden kann, müssen Lösungen (Schutzmassnahmen) gesucht werden. Durch diese Lösungen sind die Eintrittshäufigkeit und der Schadenumfang eines Ereignisses zu reduzieren. Dabei liegen die Lösungsansätze für normale und erhöhte Risiken in der mittelbaren und unmittelbaren Sicherheitstechnik, für minimierte Risiken eher in der hinweisenden Sicherheitstechnik.

- Unmittelbare Sicherheitstechnik: Die Konstruktion wird so ausgeführt, dass keine Gefährdung besteht (z.B. Eliminieren von Scher- und Klemmstellen durch Ergonomie, Einsatz von geringen Kräften und Energien).
- Mittelbare Sicherheitstechnik: Die Gefährdung bleibt bestehen. Durch zusätzliche technische Vorkehrungen wird jedoch erreicht, dass aus der Gefährdung kein Ereignis entsteht (z.B. Verhindern des Eindringens in gefährdende Bewegungen durch mechanische Schutzverdecke oder abschaltende Schutzeinrichtungen; Auffangen von wegfliegenden Teilen durch Schutzverdecke usw.).
- Hinweisende Sicherheitstechnik: Diese gilt nur für Restgefährdungen und minimierte Risiken, also Gefährdungen, die aufgrund menschlicher Faktoren zum Ereignis führen. Durch entsprechendes Verhalten des Betroffenen kann der Eintritt dieses Ereignisses verhindert werden (z.B. Verhaltensanweisungen in der Betriebs- und Wartungsanleitung, Schulung des Personals usw.).

Internationale Sicherheitsanforderungen

Die EG-Maschinenrichtlinie (89/392/EWG) aus dem Jahre 1989 hält die grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen für Maschinen fest. Gemäss Ma-

schinenrichtlinie gilt als «Maschine» eine Gesamtheit von miteinander verbundenen Teilen oder Vorrichtungen, von denen mindestens eines beweglich ist und entsprechend eine Funktion aufweist. Im weiteren werden von internationalen Normengremien einzelne Normen geschaffen, die Lösungsmöglichkeiten aufzeigen (z.B. grundlegende Sicherheitsaspekte EN 292, elektrische Ausrüstung von Industriemaschinen EN 60204 etc.). Ziel dieser Normenwerke ist es, die

grundlegenden Anforderungen der EG-Richtlinien zu erklären, respektive Schutzziele zu spezifizieren. Dieses Normenwerk ist sehr umfangreich; der rote Faden der ursprünglichen Zielsetzung ist darin nicht immer erkennbar.

Betriebsarten

Aufgrund von Erfahrungen und Untersuchungen wurde aufgezeigt, dass sich sehr viele Vorfälle und Unfälle gerade bei komplexen technischen Systemen wie CNC-gesteuerte Bearbeitungsmaschinen und Industrieroboter nicht im Normalbetrieb ereignen. Bei derartigen Maschinen bildet sich ein Schwerpunkt in den Sonderbetriebsarten wie beispielsweise Inbetriebnahme, Einrichten, Testlauf, Störungssuche oder Instandhaltung. In diesen Betriebsarten ist denn auch meist die Anwesenheit von Personen im Gefahrenbereich gegeben. In derartigen Situationen muss das Sicherheitskonzept den Menschen vor negativen Ereignissen schützen.

- Normalbetrieb: Die Maschine erfüllt ihren Einsatzauftrag, für welchen sie vorgesehen und gebaut worden ist. Für automatische Maschinen gilt: Die Maschine erfüllt ihren Einsatzauftrag, für welchen sie vorgesehen und gebaut worden ist, ohne weiteres Zutun des Menschen.
- Sonderbetriebsarten: Sonderbetriebsarten sind Arbeitsabläufe, die den Normalbetrieb erst ermöglichen. Dazu zählen beispielsweise Werkstück- oder Werkzeugwechsel, Beheben einer Störung im Produktionsablauf, Beheben einer Maschinenstörung, Einrichten, Programmieren, Testlauf, Reinigen und Instandhalten.
- Personen: Bei der Gefahrenanalyse wie bei der Auswahl der geeigneten Schutzmassnahme müssen die in den verschiedenen Betriebsarten tätigen Personen sowie Dritte berücksichtigt werden.

Unter Dritten sind auch indirekt von der Maschine betroffene Personen wie Vorgesetzte, Kontrolleure, Logistik-Mitarbeiter, Besucher etc. zu verstehen.

Sicherheitsmassnahmen

Normalbetrieb

Durch die Vorgabe von Schutzzielen wird einerseits der technische Fortschritt nicht eingeeengt und andererseits können angepasste Lösungen gewählt werden. Nachfolgend sind einige Schutzziele für Maschinen näher umschrieben.

Schutzziel: Das Greifen oder Treten in Gefahrenstellen von Bewegungen muss verhindert werden.

Lösungsmöglichkeiten: Folgende Sicherheitsmassnahmen stehen zur Verfügung:

- Durch mechanische Umwehungen Zutritt oder Zugriff in Gefahrenstellen verhindern.

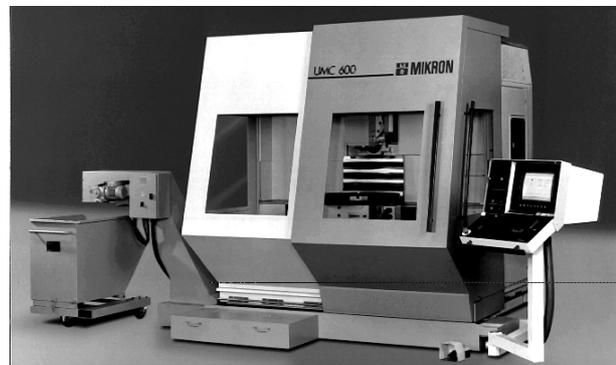


Bild 1) Absicherung des Normalbetriebs einer CNC-Fräsmaschine mit einer Vollschutzkabine (Mikron AG, 2501 Biel).

- Durch auf Annäherung wirkende Schutzeinrichtungen (z.B. Sicherheitslichtschranken, -trittmatten) bei Eingriff oder Eintritt sicher abschalten.
- Eintritt oder Eingriff nur erlauben, wenn sich das Gesamtsystem im sicheren Zustand befindet. Dies kann beispielsweise durch Verriegelungseinrichtungen mit Zuhaltung an den Zutrittsstüren erreicht werden.

Schutzziel: Durch Energieaustritt (wegfliegende Teile oder Energiestrahle) dürfen keine Personen verletzt werden.

Lösungsmöglichkeit: Energie am Austritt aus dem Gefahrenbereich hindern zum Beispiel durch ein entsprechend dimensioniertes Schutzverdeck (Bild 1).

Die Schnittstellen zwischen Normalbetrieb und Sonderbetriebsarten (z.B. Türverriegelungs-Schalteneinrichtungen, Sicherheitslichtschranken, Sicherheitstritmatten) sind notwendig, damit die Sicherheitssteuerung die Anwesenheit von Personen automatisch erkennen kann.

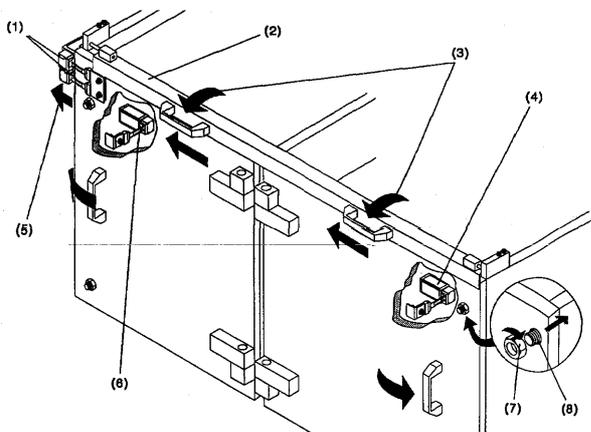


Bild 2) Absicherung des Bearbeitungsraum einer Durchlauf-Schleifanlage durch eine zweikanalige Verriegelungseinrichtung mit Zuhaltung (Linear Abrasive SA, 2074 Marin).

Sonderbetrieb

Gewisse Sonderbetriebsarten (z.B. Einrichten, Programmieren von CNC-Bearbeitungsmaschinen) erfordern Bewegungen, die unmittelbar am Ort des Geschehens ausgelöst werden müssen.

Schutzziel: Bewegungen dürfen nur so ablaufen, dass sie für die betroffenen Personen keine Gefährdung darstellen:

- nur in der vorgesehenen Art und Geschwindigkeit,
- nur so lange wie befohlen,
- nur wenn gewährleistet ist, dass sich keine Körperteile im Gefahrenbereich befinden.

Lösungsmöglichkeit: Sonderbetriebssteuerung, welche nur kontrollierbare und führbare Bewegungen in Tippschaltung über Zustimmungstaste (Bild 3) zulässt. Die Geschwindigkeit der Bewegungen wird dabei sicher reduziert, z.B.

durch Energiereduktion, Schaltung von Trenntrafos oder Einsatz von fehlersicheren Zustandsüberwachungsgeräten. Damit ist wiederum die Gemeinsamkeit von Schutzmassnahme und Energieeinsparung aufgezeigt.



Bild 3) Dreistufiger Zustimmungsschalter für sicheres Arbeiten im Sonderbetrieb (Mattle Industrieprodukte, Hinwil).

Sicherheitssteuerungen

Als Merkmal einer Sicherheitssteuerung gilt, dass bei Auftreten von irgendwelchen Fehlern die Sicherheitsfunktion trotzdem gewahrt bleibt. Überall da, wo Prozesse schnell vom gefährlichen in den sicheren Zustand überführt werden können, genügt die Betrachtungsweise eines Fehlers. Bei den meisten Industriemaschinen mag diese Vereinfachung zutreffen.

Schutzziele:

- Ein Fehler in der Sicherheitssteuerung darf keinen gefährlichen Zustand auslösen.
- Ein Fehler in der Sicherheitssteuerung muss entdeckt werden (sofort oder intervallmässig).

Lösungsmöglichkeiten:

- Redundante und diversitäre Auslegung von elektromechanischen Sicherheitssteuerungen inklusive Testkreise.
- Redundanter und diversitärer Aufbau von Mikroprozessorsteuerungen entwickelt durch unterschiedliche Teams. Dieser moderne Lösungsansatz gilt heute beispiels-

weise bei Sicherheitslichtgittern als Stand der Technik.

EG-Maschinenrichtlinie

Richtlinie des Rates vom 14. Juni 1989 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Maschinen (89/392/EWG). Richtet sich an jeden EG-Einzelstaat: Diese müssen die Richtlinie in ihr Gesetzeswerk einbinden (in der Schweiz freiwillige Anpassung über «Swisslex» und Bundesgesetz STEG).

Wichtigste Botschaft daraus:

- Gültig ab 1. Januar 1993.
- Fordert vom Hersteller bereits in der Entwicklungsphase eine Gefahrenanalyse mit Risikobetrachtung.
- Fordert vom Hersteller die Einhaltung von Stand der Technik.
- Der Hersteller muss zuerst eine technische Dokumentation ausarbeiten, die über alle grundlegenden Aspekte der Sicherheit und der Gesundheitsvorsorge Auskunft gibt. Der Hersteller kann erst dann die EG-Konformitätserklärung unterzeichnen und das CE-Zeichen an der Maschine anbringen
- Kann die vollständige technische Dokumentation auf Verlangen einer staatlichen Kontrollstelle nicht vorgelegt werden, bedeutet dies ein Nichterfüllen der Maschinenrichtlinie. Ein EU-weites Verkaufsverbot könnte die Folge sein.

Schlusswort

Um fortschrittliche Lösungen zu ermöglichen, werden neue Richtlinien in Form von Schutzzielen geschrieben. Diese Zielsetzung ermöglicht es dem Konstrukteur einerseits, für den konkreten Fall die optimale Lösung zu wählen. Andererseits kann er auf verhältnismässig einfache Art den Sicherheitsnachweis für seine Maschine erbringen, indem er eine Lösung für jedes Schutzziel beschreibt. Diese Lösung kann man dann mit anderen bestehenden und akzeptierten Lösungen vergleichen: Ist sie besser oder mindestens gleichwertig, kann auch eine neue Lösung gewählt werden. Auf diese Weise wird der Fortschritt nicht durch zu eng gefasste Vorschriften behindert. Werden zudem Sicherheit und Energiesparen

bereits in die Konzeptionsphase des Produktes einbezogen, resultieren praxisfreundliche, effiziente und auch kostengünstige Lösungen.

8. EMV im Maschinenbau

Autor: Bertil Wallertz

Was nützt eine energetisch optimierte Maschine mit Frequenzumrichterantrieb, wenn sie am Einbauort nicht gut funktioniert und die umgebenden Systeme stört? Wir alle haben schon Effekte von elektromagnetischer Beeinflussung beobachtet, sei es, dass der Fernseher durch Blitzeinschlag ausgefallen ist oder, dass sich das Licht in einer Wohnung kurz verdunkelte, als der Kühlschrankkompressor eingeschaltet hat oder, dass der Radioempfang von einem anderen Sender mit ähnlicher Frequenz gestört wurde. Solche und viele andere Störungen sind Beispiele elektromagnetischer Umweltstörungen.

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) liegt vor, wenn ein Gerät:

1. Andere Geräte nicht stört.
2. Nicht von anderen Geräten gestört wird.

Gute EMV ergibt statistisch eine bessere Zuverlässigkeit der Anlage und der umgebenden Geräten. Ab 1996 sind die Maschinenhersteller, welche in den EG-Raum exportieren, zur Einhaltung der EMV-Normen verpflichtet. Wie in vielen anderen Feldern der Technik ist es wichtig, die EMV-Problematik früh in der Entwicklungsphase zu berücksichtigen, damit die Kunden zufrieden bleiben und die Kosten tief gehalten werden.

Grundbegriffe der EMV

Eine Störquelle gibt elektromagnetische Störungen ab (Emission). Diese Störungen können durch elektrische Leitungen übertragen werden (Leitungsgebunden) oder direkt durch den Raum abgestrahlt werden. Eine Störsenke nimmt einen Teil der

Störungen auf (Immission). Ihre Funktion wird dabei unter Umständen

den beeinflusst. In manchen Fällen wird das Gerät sogar gestört. Falls in einer gewissen Umgebung keine Funktionsstörungen auftreten sagt man, dass das Gerät störfest ist. In der Praxis emittiert jedes elektrische Gerät elektromagnetische Störungen. Es ist auch mehr oder weniger empfindlich für Immision. Jedes Gerät ist also grundsätzlich Störquelle und Störsenke.

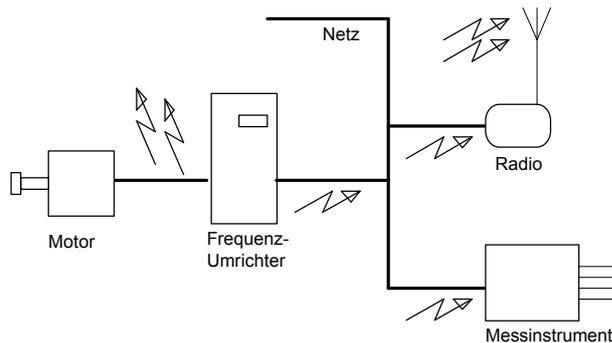


Bild 1) Störquellen und Störsenken bei einem Frequenzumrichterantrieb.

EMV-Normen und das CE-Zeichen

Ob EMV während einer Zeitperiode vorliegt kann im Prinzip nur am Aufstellungsort und nur mit gewisser Wahrscheinlichkeit festgestellt werden (ein direkter Blitzeinschlag zerstört jeden Fernseher, PC-Abstürze durch Netztransienten passieren dann und wann, usw.). Damit der Benutzer mit hoher Wahrscheinlichkeit keine schwerwiegenden EMV-Probleme bekommt, werden in Normen Grenzwerte für Emissionen und Störfestigkeit festgelegt. Die Einhaltung dieser Normen können durch Messungen überprüft werden, zum Beispiel in einem EMV-Messlabor. Weltweit legt die IEC Normen fest. Für den EG- und EFTA-Raum sind die europäischen Normen (EN), welche von der CENELEC definiert werden, massgebend.

Normenarten

Man unterscheidet drei Arten von Normen:

Basic-Normen Die Grundnormen definieren Mess- und Prüfverfahren für verschiedene EMV-Phänomene.

Generic-Normen Die Fachgrundnormen legen minimale Anforderungen für Geräte in einer gewissen Umgebung fest. Sie definieren nach welchen Basic-Normen getestet wird und bei welchen Prüfgrößen.

Produktnormen Für spezifische Produkte (zum Beispiel «Informationstechnische Einrichtungen») gibt es Produktnormen, welche die Prüfanforderungen angeben. Die Produktnorm hat vor der Generic-Norm Vorrang.

CE-Zeichen

Das CE-Zeichen ist obligatorisch für alle Produkte die unter eine der elf EG-Richtlinien fallen. Es gibt an, dass die in den Richtlinien angegebenen Anforderungen erfüllt werden, und dass ein in der Richtlinie vorgesehene Konformitätsbewertungsverfahren durchgeführt wurde.

Ausser für Sendefunkgeräte kann der Hersteller selber eine CE-Konformitätserklärung ausstellen. Der Hersteller muss vor der Abgabe der Erklärung eine Dokumentation ausarbeiten, die Angabe darüber enthält, wie die sicherheitstechnischen Anforderungen der Richtlinien sichergestellt wurden. In der Praxis sind grundsätzlich zwei Konformitätsbewertungsverfahren möglich (Bild 2).

Gültigkeit der schweizerischen Akkreditierstellen in EG-Raum

Grundsätzlich sind im EG-Raum die Messungen einer schweizerischen akkreditierten

Prüfstelle nicht verbindlich. Die Messungen werden aber von den im EG-Raum akkreditierten Prüflabors anerkannt. Ein Messprotokoll von einer schweizerischen akkreditierten Prüfstelle ist ein Ausweis darüber, dass der Hersteller seine Konformitätserklärung auf Messungen eines anerkannten Prüflabors baut.

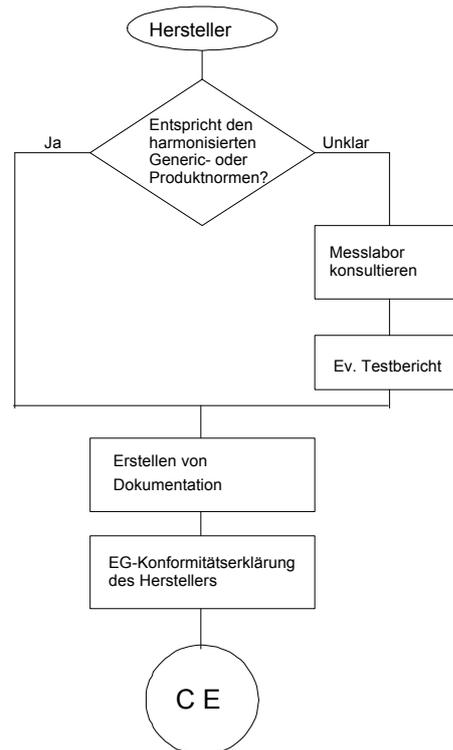


Bild 2) Konformitätsbewertungsverfahren für CE-Zeichen im Bereich EMV.

EMV-Technik

Als Beispiel der EMV-Technik wählen wir die Entstörung von Frequenzumrichtern. Wir werden hauptsächlich die Emissionen betrachten. Prinzipiell gilt aber, dass ein Gerät, das kleinere Emissionen aufweist, auch für Immision weniger empfindlich ist (und umgekehrt). Wenn wir also die Emissionen begrenzen können, haben wir meistens auch die Störfestigkeit erhöht!

Frequenzumrichter haben üblicherweise sehr grosse Störemissionen. Ohne Entstörung werden die Normen verletzt und Systeme in

der Umgebung werden oft in der Funktion gestört. In dieser Sektion wird gezeigt wie eine Anlage installiert werden kann, damit die EMV in einer möglichst günstigen Weise erreicht wird.

Schaltschrankes).

2. Schirmung

- Auch der Schirm muss grossflächig kontaktiert werden (Bild 4).
- Der Schirm des Motorkabels soll sowohl am Umrichter als auch am Motorgehäuse kontaktiert werden (beidseitige Masseverbindung)!

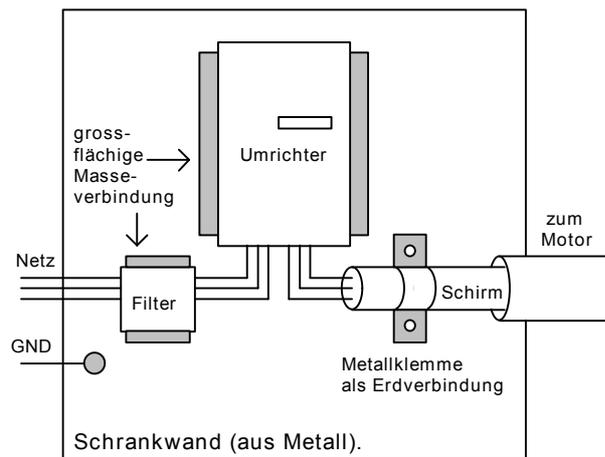


Bild 4) EMV-gerechte Platzierung und Masseverbindung im Schaltschrank. Weitere (Masse-) Verbindungen sind aus Sicherheitsgründen nötig!

3. Filter

- Ein EMV-Filter ist grundsätzlich ein Tiefpass aus Drossel und Kondensatoren.
- Das Kabel zwischen Filter und Umrichter sollte kürzer als 30 cm sein, sonst muss

ein geschirmtes, beiderseitig grossflächig kontaktiertes Kabel eingesetzt werden.

- Die gefilterte Leitung vom Versorgungsnetz zum Filter muss räumlich getrennt vom Motorkabel verlegt werden (Bild 4).

4. Ableitstrom

- Die meisten Netzfilter erhöhen den 50/60 Hz Ableitstrom des Systems, Datenblatt beachten!
- In einem dreiphasigen System mit symmetrischer Last ist der Ableitstrom theoretisch Null, durch Bauteiltoleranzen im Filter kann aber trotzdem ein nennenswerter Ableitstrom fließen.
- Beim Einschalten kann kurzzeitig ein hoher Ableitstrom fließen, welcher einen FI-Schutzschalter auslösen kann.

Zusammenfassung

Die EMV-Problematik im Umrichterbetrieb ist keine «Hexerei». Durch einfache Massnahmen, können sowohl die Anforderungen für die CE-Konformität als auch ein zuverlässiger Einsatz am Einbauort erreicht werden. Um Kosten zu sparen ist es wichtig, die EMV-Problematik wie die Sicherheitsanforderungen und die Energieeffizienz früh im Entwicklungsvorgang zu berücksichtigen.