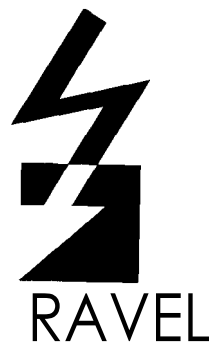


Messen von Betriebsparametern elektrischer Antriebe



Impulsprogramm RAVEL
Bundesamt für Konjunkturfragen

Trägerschaft

IEM/ETH Institut für Elektrische Maschinen
Eidgenössische Technische
Hochschule, Zürich

Autoren

- Konrad Reichert, Prof. Dr.-Ing.habil.
- Raimund E. Neubauer, Dr.-Ing.
Institut für Elektrische Maschinen
ETH Zürich
- Andreas Binder, Dr.-Ing.habil.
Siemens AG, Bad Neustadt
- Werner Hirschi
EMC Fribourg
- Max Thalmann
Regatron AG, Steinach
- Hans Reiche, Dr.-Ing.habil.
Thyssen Maschinenbau GmbH, Dresden

Text und Grafik

Institut für Elektrische Maschinen, ETH Zürich

- Raimund E. Neubauer
- Giuseppe Pasquarella
- Konrad Reichert

Copyright Bundesamt für Konjunkturfragen
3003 Bern, März 1996

Auszugsweiser Nachdruck mit Quellenangabe erlaubt. Zu beziehen bei der Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern (Bestell-Nr. 724.336 d)

Form. 724.336 d 4.96 1000 U30219

Vorwort

Das Aktionsprogramm des Bundesamtes für Konjunkturfüragen ist auf sechs Jahre befristet (1990-1995) und setzt sich aus den drei Impulsprogrammen zusammen:

- 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 Energien sowie abnehmende Umweltbelastung, dafür gesteigerten Einsatz von 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 Tragen. Entsprechend vielfältig sind die angesprochenen Zielgruppen: Sie umfassen Fachleute auf allen Qualifikationsstufen und Entscheidungsträger, die über stromrelevante Abläufe und Investitionen zu befinden haben.

Kurse, Veranstaltungen, Publikationen, etc.

Umgesetzt werden die Ziele von RAVEL - aufbauend auf Untersuchungsprojekten zur Verbreiterung der Wissensbasis - durch Aus- und Weiterbildung sowie Informationen. Die Wissensvermittlung ist auf die Verwendung in der täglichen Praxis ausgerichtet. Sie baut hauptsächlich auf Publikationen, Kursen und Veranstaltungen auf. Jährlich wird eine RAVEL-Tagung durchgeführt, 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 Konjunkturfüragen, 3003 Bern, gratis erhältlich.

Jedem Kurs- und Veranstaltungsteilnehmer wird jeweils eine Dokumentation abgegeben. Diese besteht zur Hauptsache aus der für den entsprechenden Anlass erarbeiteten Fachpublikation. Die Publikationen können auch unabhängig von Kursbesuchen bei der Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ) 3003 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 Stromanwendung 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 Programmes 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 verantwortlich. Die Sachbearbeitung wird im Rahmen von Ressorts durch Projektgruppen erbracht, die inhaltlich, zeitlich und kostenmässig definierte Einzelaufgaben zu lösen haben.

Dokumentation

Allen Antriebsfachleuten, die sich mit der Planung, der Herstellung und dem Betrieb von elektrischen Antrieben beschäftigen, soll die vorliegende Dokumentation helfen die Fähigkeit zu erlangen, charakteristische Parameter für die energie-optimale Antriebsauslegung zu identifizieren und messtechnisch zu erfassen.

In der Absicht, die elektro-mechanische Energie-wandlung zu verbessern und die bei diesem Pro-zess entstehenden Verluste zu vermindern, wird zunächst auf die Voraussetzungen für den energie-optimalen Einsatz von elektrischen Antrieben ein-gegangen. Dabei stehen systemtechnische Be-trachtungen im Vordergrund.

Danach werden praktische Messverfahren vorge-stellt mit dem Ziel, mechanische Prozessparame-ter zu ermitteln und die Belastung des Antriebs-motors zu erfassen. Die Identifikation elektri-scher und thermischer Betriebskenngrößen wird schwerpunktmässig behandelt. Dabei ist die neue Möglichkeit der Drehmomentbestimmung aus rein elektrischen Betriebsgrößen einer der interessantesten Aspekte.

Es wird ausserdem darüber informiert, wie die verfügbare Wärmekapazität eines Antriebsmotors für die verschiedenen Belastungsfälle optimal ge-nutzt werden kann. Dem Umrichterbetrieb und sei-nen bekannten Problemen, wie Oberschwingungen oder elektromagnetische Verträglichkeit, kommt dabei besondere Bedeutung zu.

Diese Dokumentation ist auch Arbeitsgrundlage für einen gleichnamigen RAVEL-Kurs in dem mit-tels Fallstudien an modernen Testanlagen der ETH Zürich die praktische Bestimmung von Antriebspa-rametern demonstriert wird, und mit Hinweisen zu

Anwendungsmöglichkeiten moderner PC-Software das Vorgehen bei der Auslegung praxisnah trainiert wird. Mit der selbständigen Durchführung von La-borversuchen soll zusätzliche Erfahrung gewonnen werden. Dabei ist ein fachlicher Austausch zwis-chen den Teilnehmern beabsichtigt und Diskus-sionen sollen angeregt werden.

Nach einer Vernehmlassung und dem Anwendungs-test in einer Pilotveranstaltung ist die vorlie-gende Dokumentation sorgfältig überarbeitet wor-den. Die Autoren hatten dennoch freie Hand, un-terschiedliche Ansichten über einzelne Fragen nach eigenem Ermessen zu beurteilen und zu berück-sichtigen. Sie tragen denn auch die Verantwortung für die Texte. Unzulänglichkeiten, die sich aus der praktischen Anwendung ergeben, können bei einer allfälligen Überarbeitung behoben werden. Anre-gungen nehmen das Bundesamt für Konjunkturfra-gen oder der verantwortliche Redaktor/Kursleiter entgegen.

Für die wertvolle Mitarbeit zum Gelingen der vor-liegenden Publikation sei an dieser Stelle allen Be-teiligten bestens gedankt.

Oktober 1995 Prof. B.Hotz-Hart
Vize-Direktor des Bundesamtes
für Konjunkturfragen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Übersicht	8
1.2	Antriebs-Messtechnik	9
2	Messtechnik	10
2.1	Einführung	10
2.2	Grundbegriffe	11
2.3	Messfehler	11
2.4	Wahl der Messeinrichtung	12
3	Messen an Elektrischen Antriebe	13
3.1	Aufbau von Antriebssystemen	13
3.2	Beurteilungsschwerpunkte	14
3.3	Messverfahren und Methoden	15
3.4	Ermittlung der Motorbelastung und des Motorverhaltens	16
3.5	Ermittlung der Lastverhältnisse (Arbeitsmaschine)	17
3.6	Ermittlung der Netzverhältnisse (Beeinflussungsprobleme)	17
4	Praktische Messverfahren	18
4.1	Massenträgheitsmoment	18
4.1.1	Messung von Trägheitsmomenten	18
4.1.2	Berechnung von Trägheitsmomenten	20
4.1.3	Motor-Beschleunigungsmoment	20
4.2	Drehmomentmessung	21
4.2.1	Reaktionskraft am Hebelarm	21
4.2.2	Verformung im Wellenstrang	21
4.2.3	Einbau von Drehmomentmesswellen	22
4.2.4	Indirekte Drehmomentbestimmung	23
4.3	Drehzahlmessung	23

4.3.1 Mechanisch-elektrische Geber	24
4.3.2 Indirekte Drehzahlbestimmung	25
4.4 Bestimmung der elektrischen Maschinenparameter	25
4.4.1 Leerlaufmessung	25
4.4.2 Kurzschlussmessung	26
4.5 Bestimmung der thermischen Maschinenparameter	26
4.5.1 Messmethoden	27
5 Erfassung der Motorbelastung	28
5.1 Elektrische Beanspruchung	28
5.1.1 Leistungsmessung	28
5.1.2 Wirkungsgradbestimmung	29
5.1.3 Oberschwingungsanalyse	30
5.2 Mechanische Beanspruchung	30
5.3 Thermische Beanspruchung	32
5.3.1 Thermische Ersatzbilder	32
5.3.2 Identifizierung thermischer Parameter	33
6 Modellgestützte Messtechnik	35
6.1 Parameteridentifikation	36
6.2 Signalanalyse	36
6.3 Geräuschanalyse	37
6.4 Lernendes Diagnose-System	37
7 Einsatzprobleme stromrichter gespeister Antriebe	38
7.1 Anwendungsbereiche stromrichter gespeister Antriebe	38
7.2 Elemente und Schaltungen der Stromrichterantriebstechnik	39
7.3 Stromrichter	42
7.4 Systemtechnische Aspekte	47
7.5 Motor- und Kabelbelastungen durch Umrichter	48
7.6 Entwicklungstendenzen	52

8 Projektierung und Einsatz stromrichter gespeister Antriebe	53
8.1 Vorgehen beim Einsatz stromrichter gespeister Antriebe	53
8.2 Auswahl, Dimensionierung und Programmierung von Frequenzumrichtern	55
8.3 Energiesparen mit umrichter gespeisten Antrieben	59
9 Elektromagnetische Verträglichkeit	60
9.1 Übersicht	60
9.2 EMV Kopplungsmechanismen.,,	61
9.3 Gegentakt- und Gleichtaktstörung	62
9.4 EMV und Antriebstechnik	64
9.5 Installationshinweise,	65
9.6 EMV-Normen	66
10 Laborversuche zur Antriebsmesstechnik	71
10.1 Laborversuch L1- Parameteridentifikation einer Asynchronmaschine ...	71
10.2 Laborversuch L2 - Bestimmung mechanischer Antriebskenngrößen	73
10.3 Laborversuch L3 - Netz/Umrichterbetrieb von Asynchronmaschinen ...	75
10.4 Demonstration D1 - ASM Leistungsvergleich Kreiselpumpe	80
10.5 Demonstration D2 - EMV Elektromagnetische Verträglichkeit	81
Literatur	82

1 Einleitung

1.1 Übersicht

Die ersten Projekte des RAVEL Impulsprogrammes befassten sich mit der energieökonomischen Analyse von Prozessen, die in den Haushalten und der gesellschaftlichen Infrastruktur, aber auch in den für die Schweiz typischen Industriezweigen wie der Lebensmittel- oder Textilindustrie ablaufen. Diese Analysen verfolgten hauptsächlich drei Ziele. Erstens, sollten aus der energieökonomischen Betrachtung der einzelnen Prozess-Stufen Rückstände in einer möglichen Effektivität des Einsatzes von Energie und Material aufgedeckt und sogenannte Sparpotentiale identifiziert werden. Zweitens, sollten Verallgemeinerungen abgeleitet werden, hinsichtlich der Überdimensionierung der einzelnen technischen Antriebskomponenten und hinsichtlich der Bedeutung der Rolle des Einsatzes der Antriebstechnik. Und drittens, sollten Massstäbe für den produktbezogenen Einsatz von Energie in der Industrie ermittelt werden. Heute können wir uns an den Ergebnissen dieser Analysen, so zum Beispiel an Energie-Einsatzwerten wie

Zement	97.00kWh pro Tonne
Bier	18.001kWh pro Hektoliter
Kläranlage	0.16kWh pro m^3 Abwasser
Textildruck	0.30kWh pro m Stoffbahn

orientieren und damit Argumente für die Berücksichtigung der Energieökonomie in der Phase der Planung und des Entwurfs kompletter Anlagen finden. Damit könnte erreicht werden, dass schon bei der Auswahl von Erzeugnissen, die als Komponenten im Prozess wirken, der energieökonomische Aspekt beachtet wird. Gerade die Ergebnisse der Analyse der schweizerischen Zementindustrie [1] haben für internationales Aufsehen gesorgt, weil sie nachgewiesen haben, dass durch eine gewissenhafte Erforschung der Energiesparpotentiale gegenüber dem internationalen Wettbewerb entscheidende Vorteile erzielt werden, die dann auch immer von innovativen Lösungen bei der Gestaltung der Prozesse und dem Entwurf von Erzeugnissen begleitet werden.

Energieverbrauch der Zementindustrie

Schweiz	97kWh pro Tonne
Deutschland	110kWh pro Tonne
United States	200kWh pro Tonne

Ein allgemeines Ergebnis der Analysen des Elektrizitätsbedarfs in der Industrie war auch die Tatsache, dass etwa 60% der verfügbaren elektrischen Energie für elektrische Antriebe verbraucht werden. Als Schlussfolgerung ergab sich die Veranstaltung eines insgesamt achtmal durchgeführten zweitägigen Seminars [2] 'Elektrische Antriebe energie-optimal auslegen und betreiben'. Schwerpunkte des Seminars waren

- das grundsätzliche Vorgehen bei der Lösung von Antriebsproblemen aus energieökonomischer Sicht,
- der optimale Einsatz von Antriebskomponenten hinsichtlich gutem Prozesswirkungsgrad,
- die gezielte Auswahl von Erzeugnissen mit grossem Wirkungsgrad und
- die Nutzung von Entwicklungstendenzen in der Antriebstechnik und von innovativen Erzeugnisprinzipien.

Konnten durch dieses Seminar alle prinzipiellen Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieökonomie aufgezeigt werden, so wurde aber auch sichtbar, dass heute die Eigenschaften der Arbeitsmaschinen und der wichtigsten Antriebselemente, die für einen möglichst genau bemessenen Einsatz im Prozess notwendig sind, zu wenig bekannt und ausgewiesen sind.

Das grosse Energiesparpotential bei Antrieben besteht darin, den Arbeitspunkt der Anlage mit den Nennbedingungen des Motors, für den normalerweise höchste Werte des Wirkungsgrades und Leistungsfaktors ausgewiesen werden, in Übereinstimmung zu bringen.

1.2 Antriebs-Messtechnik

Für die vorhandenen Projektierungsmittel muss man sowohl die Betriebsparameter der Arbeitsmaschine als auch die Parameter der Antriebselemente, wie zum Beispiel thermische und mechanische Zeitkonstanten oder die für die Betriebsdynamik wichtigen elektrischen Parameter, nicht nur genau kennen sondern diese auch vom Hersteller garantiert bekommen. Das vorliegende Handbuch soll deshalb hauptsächlich darüber informieren wie charakteristische Antriebsparameter gemessen werden können.

Die zunehmende Nutzung von elektronischen Stell- und Regelgeräten, setzt sowohl die Kenntnis drehzahlvariabler und frequenzabhängiger Parameter als auch die Kenntnis der dadurch bedingten zusätzlichen Verluste und Beeinflussungen im Motor und im speisenden Netz voraus. Der projektierende Ingenieur sollte daher in der Lage sein, diese auch messtechnisch zu bestimmen. Zudem sind heute Möglichkeiten zur Nutzung der Lebensdauerreserven durch die Anwendung neuer Auslegungsprinzipien bekannt, die wiederum die Kenntnis des nutzbaren Motor-Wärmepotentials voraussetzen.

Die Nutzung elektronischer Elemente zur Gestaltung energieökonomisch effektiver Antriebssysteme bringt auch Nebeneffekte, wie die Störung der Anlagen durch elektromagnetische Kopplungen, das

Wirken von hohen Schaltspannungen und zusätzlichen Geräuschen mit sich. Diese müssen erkannt und beherrscht werden. Und schliesslich werden auch an die Leistungs- und Energiemesstechnik unter dem Einfluss der Elektronik wesentlich höhere Ansprüche gestellt.

Das konstruktive Know-how reicht in der Regel meist nicht aus, um zeitabhängige Beanspruchungen von Antriebskomponenten wie Motor, Getriebe, Kupplung oder spezielle Prozessvorgänge im Sinne einer energie-optimalen Antriebs-Problemlösung zu bestimmen. Die gezielte Verwendung der Ergebnisse messtechnischer Untersuchungen, sowie der dadurch bedingte Zwang zu neuen Vorgehensweisen bei der Analyse von elektrischen Antriebssystemen sind heutzutage notwendige Werkzeuge, die ständig steigenden Anforderungen an dynamisch beanspruchte Antriebselemente in Maschinen, Anlagen und Fahrzeugen zu meistern.

Es ist deshalb die Absicht der folgenden Ausführungen, die für eine gezielt gute Ausnutzung von Antriebskomponenten notwendigen Projektierungsparameter zu identifizieren und messtechnisch zu erfassen, um damit die Grundlage für den Betrieb elektrischer Antriebe unter befriedigenden energieökonomischen Bedingungen zu schaffen.

2 Messtechnik

Grundsätzliches:

- Die Antriebsmesstechnik soll die Modellbildung verbessern helfen, die Antriebsdiagnose unterstützen und der Schadensfrüherkennung dienen.
- Die Messkosten hängen entscheidend von den Anforderungen an die Messfühler ab und steigen mit enger werdenden Toleranzen für die zulässigen Messfehler stark an.
- Da jede Messung grundsätzlich mit Fehlern behaftet ist, sollten die vorgeschriebenen Eich- und Einsatzvorschriften der Messmittel stets genau befolgt werden.

2.1 Einführung

Die Antriebsmesstechnik [3], [4] umfasst die Messung der mechanischen, der elektrischen und der thermischen Beanspruchung und Parameter von Maschinen- und Antriebskomponenten unter Berücksichtigung der zeitabhängigen Erregerquellen, wie Antriebsmotor oder lastabhängige Prozessvorgänge. Sie dient im Sinne einer vorausschauenden Instandhaltung der Schadensfrüherkennung und ist ein notwendiges Werkzeug zur Unterstützung der Antriebsdiagnose und der Systemanalyse.

Ein wichtiges Ziel der Antriebsmesstechnik ist die Verbesserung der Modellbildung, um das dynamische Betriebsverhalten von Antriebselementen auf das Gesamtverhalten der Maschine oder der Anlage, unter den Gesichtspunkten des Fertigungs- und Materialaufwandes sowie der Energie- und Kostenoptimierung, zu untersuchen.

Bestimmte Antriebs-Messverfahren und auch Parametervariationen sind aufgrund der konstruktiven Vorgaben des Antriebssystems jedoch nur sehr schwer ausführbar, da sich die im Betrieb befindlichen Antriebsanlagen nicht immer leicht umrüsten lassen. Der mit Messtechnik gekoppelten Antriebs-simulation [5] gemäss **Tabelle 2.1** kommt deshalb besondere Bedeutung zu.

Analyse des stationären und dynamischen Betriebsverhaltens	Methoden
• Konfiguration und Optimierung von elektrischen Antrieben	• Messtechnik
• Maschinendiagnose • Schadensanalyse	• Messtechnik Auswertung • Simulation
• Prüfung von Antriebs-Elementen • Messstellenplanung • Überwachungsstrategien	• Kombiniertes Vorgehen (Messtechnik+Simulation)

Tabelle 2.1: Einsatzmöglichkeiten für Messtechnik und Simulation

Ob analoge oder digitale Messmittel eingesetzt werden hängt davon ab, mit welcher Genauigkeit, Geschwindigkeit und Kontinuität die Messgrößen erfasst und weiterverarbeitet werden müssen. In **Bild 2.1** ist die prinzipielle Struktur einer Messeinrichtung dargestellt.

Der Messfühler MF (Geber, Aufnehmer) erfasst den zeitlichen Verlauf der Messgrösse x (Weg, Drehzahl, Strom etc.) und wandelt es in das Abbildungssignal S_A um (Strom-, Spannungsamplitude, Widerstandswert).

Ein Messwandler MW (Verstärker, AD-Umsetzer) erzeugt dann das Einheitssignal S_E für einen standardisierten Wertebereich (z.B. 0...10V).

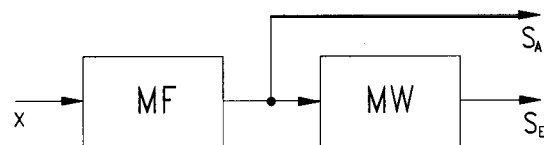


Bild 2.1: Struktur Messeinrichtung

Detaillierte Angaben zu antriebstechnischen Gebern und Messeinrichtungen für die physikalischen Größen

- Weg, Drehwinkel
- Drehzahl, Drehbeschleunigung
- Kräfte, Drehmomente
- Ströme, Spannungen
- Temperaturen

sind in den **Kapiteln 4, 5** und **6** angegeben.

2.2 Grundbegriffe

Eine physikalische Grösse G ist als das Produkt eines Zahlenwertes Z und einer Einheit E definiert.

$$G = Z \cdot E$$

Unter **Messen** wird die Tätigkeit verstanden, G experimentell zu bestimmen. Dabei ist E zu wählen und der Vergleich mit der linken Seite der obigen Gleichung vorzunehmen. Danach lässt sich Z bestimmen.

Unter **Messprinzip** versteht man das charakteristische physikalische Phänomen, das bei der Messung benutzt wird.

Der **Messwert** ist das Produkt aus gemessenem Zahlenwert Z und der gewählten Einheit E .

Das **Messergebnis** ist entweder gleich dem Messwert oder es wird aus einem oder mehreren Messwerten ermittelt.

Mit **Messgrösse** wird eine physikalische Grösse, wie z.B. Drehzahl, Drehmoment, Strom oder Temperatur bezeichnet.

Die **Anzeige** ist bei analogen Messgeräten durch den an einer Skala abgelesenen Stand der Marke gegeben.. Die Anzeige kann als Zahlenwert, in Einheiten der Messgrösse, in Skalenteilen, in Längeneinheiten oder in Ziffernschritten angegeben werden.

Der **Anzeigebereich** einer Messeinrichtung ist der Bereich der Messwerte, die am Anzeigeinstrument abgelesen werden können.

Der **Messbereich** ist der Teil des Anzeigebereiches, für den der Fehler innerhalb der garantierten oder vorgeschriebenen Fehlergrenzen liegt.

Die **Messeinrichtung** ist die Gesamtheit der zum Zweck der Messung benutzten Elemente. Darin sind Fühler zur Erfassung der Messgrösse, Rechengeräte, Verstärker und die Ausgabegeräte zur Darstellung der angezeigten Grösse mit eingeschlossen.

Die **Empfindlichkeit** ist der Zeigerweg in mm auf der Skala pro Einheit der Messgrösse. Bei digital anzeigenden Geräten ist die Empfindlichkeit gleich der Anzahl der Ziffernschritte pro Einheit der Messgrösse.

2.3 Messfehler

Aufgrund der unterschiedlichen und unkontrollierbaren Einsatzbedingungen für eine Messeinrichtung [6] kann ein **zufälliger Fehler** resultieren. Weicht jedoch das effektive Übertragungsverhalten einer Messeinrichtung vom gewünschten ab, so liegt ein **systematischer Fehler** vor der sich auch durch Wiederholen der Messung nicht eliminieren lässt.

Als **absoluter Fehler** F wird der Unterschied zwischen angezeigtem Wert A (Istwert) und dem wahren Wert S (Sollwert) definiert.

$$F = A - S$$

Der **relative Fehler** F_{rel} ist der auf den Sollwert S bezogene absolute Fehler

$$F_{rel} = \frac{A - S}{S}$$

Ist $F_{rel} \ll 1$, so wird meist der leichter zu bestimmende Ausdruck

$$F_{rel} \approx \frac{A - S}{A}$$

angegeben.

Ein arithmetischer **Mittelwert** $\bar{x}$ (lineares Mittel) wird aus n Messungen der Einzelwerte $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, gemäss

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

berechnet.

Den **durchschnittlichen Fehler** δ_D erhält man aus den Abweichungen der Einzelwerte $\delta_1 = x_1 - \bar{x}$, $\delta_2 = x_2 - \bar{x}$, a....

$$\delta_D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\delta_i|$$

Wird eine Messung mit denselben Messgeräten und unter den gleichen Messbedingungen wiederholt, so können die Messergebnisse durch zufällige Fehler voneinander abweichen. Diese zufälligen Schwankungen der Einzelwerte um ihren Mittelwert werden als **Standardabweichung** S bezeichnet.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Hinweis

Im Zusammenhang mit der Weiterverarbeitung von Messwerten, z.B. beim Einsetzen verschiedener Messwerte in eine Formel zur Berechnung des Messergebnisses, ist der **Fehlerfortpflanzung** besondere Beachtung zu schenken.

2.4 Wahl der Messeinrichtung

Steht die Messgrösse fest, so ist zunächst das bestgeeignete Messverfahren auszuwählen. Ob eine mechanische oder elektrische Messmethode zum Einsatz kommt, kann z.B. mit Hilfe einer Gegenüberstellung der charakteristischen Merkmale gemäss **Tabelle 2.2** beurteilt werden

Elektrische Verfahren	Mechanische Verfahren
Fernmessverfahren (Messzentrale möglich)	Entfernungen schwer zu überbrücken
Verstärkerschaltung -Hohe Empfindlichkeit -Messbereichsumschaltung	—
Hohe obere Grenzfrequenz	Niedrige obere Grenzfrequenz
Rechenoperationen möglich	—
Mögliche Messwertspeicherung und Datenverarbeitung	—
Kleine Rückwirkung auf das Messobjekt	Rückwirkung auf das Messobjekt
Fachwissen nötig	Einfach, überschaubar
Grosser Aufwand und teuer	Kleiner Aufwand und billig
Überwachung und Nacheichung nötig	Meist zeitlich gut konstant

Tabelle 2.2: Merkmale elektrischer und mechanischer Messverfahren

Eine einfache, billige und übersichtliche Messeinrichtung ist einer aufwendigen und damit teuren Messeinrichtung stets vorzuziehen.

Aus der allgemeinen Aufzählung der **Tabelle 2.3** sind gemäss den Anforderungen die Gebereigenschaften festzulegen. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass eine einfache, billige und übersichtliche Messeinrichtung einer aufwendigen und damit teuren Messeinrichtung stets vorzuziehen ist.

Die Vorgabe enger Fehlergrenzen lassen die Messkosten stark ansteigen. Dagegen führt das Akzeptieren einer erweiterten Fehlertoleranz, z.B. $\pm 10\%$ oft zu Messergebnissen mit hinreichend guter Genauigkeit.

• Untere Grenzfrequenz • Obere Grenzfrequenz • Messbereiche • Fehlergrenzen • Rückwirkung auf das Messobjekt • Kosten des Gebers • Installationskosten • Installationszeit	• Raumbedarf • Zulässige Entfernung zwischen Geber und Zwischenschaltung • Zulässiger Temperaturbereich • Zulässige mechanische und elektrische Störgrössen • Lieferzeit
---	--

Tabelle 2.3: Allgemeine Gebereigenschaften

Sind die Gebereigenschaften definiert, und das physikalische Wandlerprinzip des Messfühlers bestimmt [7], so kann der Geber aus Listen und Datenblättern der einschlägigen Lieferfirmen ausgewählt werden.

Die Zwischenschaltungseigenschaften müssen denen des Gebers entsprechen. Gefordert sind eingangsseitige **Rückwirkungsfreiheit** auf den Geber und die ausgangsseitige Fähigkeit, Anzeige- oder Registriergeräte zu betreiben.

Danach können die Eigenschaften der zu verwendenden Anzeigegeräte

- analog oder digital
- Einzelwerte (Maximalwerte)
- Anzeige kontinuierlich
- EDV Forderungen
- Service Lieferfirma
- Kompatibilität
- Fachkenntnisse Messpersonal

abgestimmt werden.

Obwohl sich mit einer **Digitalanzeige** im allgemeinen eine grössere Genauigkeiten in der Messwert-erfassung als in der Analogtechnik verwirklichen lässt, muss der Ablesende die Fähigkeit aufbieten gegebenenfalls zu interpolieren. Der Vorteil einer **Analoganzeige** liegt deshalb in der besseren Übersichtlichkeit z.B. bei der Überwachung von kritischen Industrieprozessen.

3 Messen an Elektrischen Antrieben

Grundsätzliches:

- Die Messung physikalischer Antriebskenngrößen kann meist direkt erfolgen, während die Bestimmung von Parametern für Antriebsmodelle ein komplexeres Vorgehen verlangt.
- Der Energiebedarf einer Arbeitsmaschine wird nicht direkt gemessen sondern indirekt bestimmt, wobei der Antrieb selbst als Messgerät dient.
- Im oberen Frequenzbereich ist der Messmittel-Einsatz problematisch. Die Einflüsse von äusseren Störquellen können nicht leicht von den Störeinflüssen des Antriebssystems unterschieden werden.

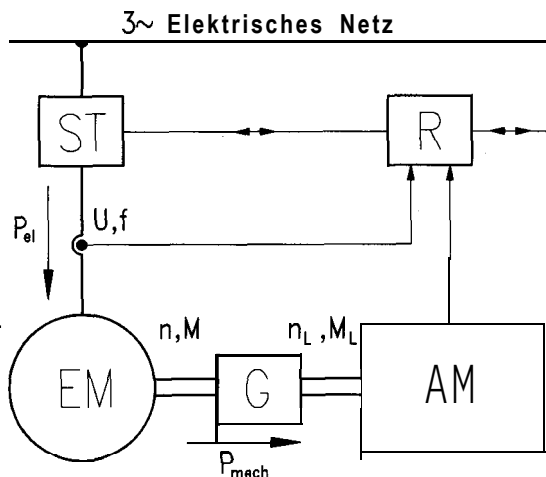
Wie im **Bild 3.1** schematisch dargestellt, übernimmt ein Elektromotor *EM* die Aufgabe der Energiewandlung. Die mechanische Leistung P_{mech} wird über ein mechanisches Element; d.h. über eine Kupplung oder über ein Getriebe, wenn eine Drehzahlanpassung erforderlich ist, an die Arbeitsmaschine *AM* weitergegeben.

Die erforderliche elektrische Energie entnimmt der Motor einem Drehstromnetz über einen Leistungsteller *ST* welcher im einfachsten Falle nur aus einem Schalter besteht.

In komplexeren Systemen unterstützt der Steller als Anlasser den Anlaufvorgang oder ermöglicht als Umrichter eine flexible Anpassung der Drehzahl n und des Drehmomentes M an die Aufgabenstellung. Abhängig von der Komplexität der Aufgabenstellung und des Stellers kann dieser neben einer Schalt-, Stell- und Regelfunktion auch Schutz- und Optimierungsaufgaben übernehmen.

3.1 Aufbau von Antriebssystemen

Die Aufgabe der elektrischen Antriebstechnik [3] ist es, einen geplanten Bewegungsvorgang mit Hilfe der elektromechanischen Energiewandlung zu realisieren, zu steuern, zu regeln und zu überwachen.



ST = Schalter/Anlasser/Umrichter
EM = Elektr. Maschine (Energiewandler)
G = Kupplung/Getriebe
AM = Arbeitsmaschine/Prozess
R = Steuerung/Schutz/Regelung

Bild 3.1: Aufbau eines Antriebssystems

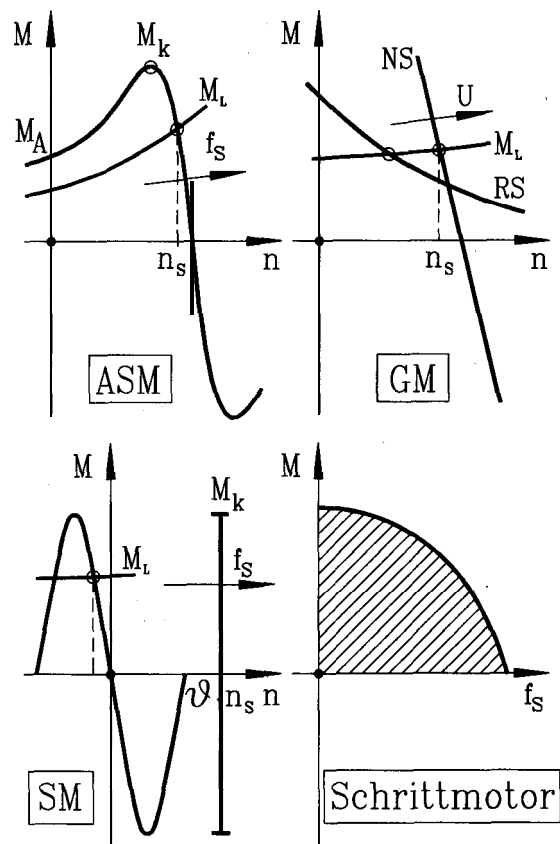


Bild 3.2: Gestellter Betrieb

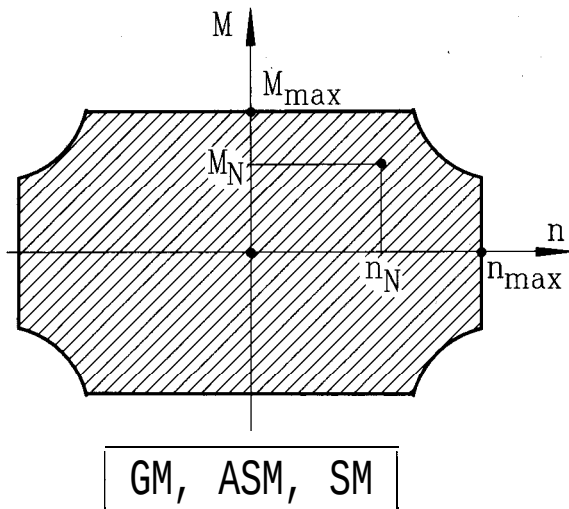


Bild 3.3: Geregelter Betrieb

Soll der Energiefluss vom elektrischen Netz über den Steller, Elektromotor zur Arbeitsmaschine in beiden Richtungen erfolgen, man spricht dann von einem Zwei- oder Vier-Quadrantenbetrieb, so muss der Steller entsprechende Funktionen aufweisen.

Bezüglich der Steuerbarkeit unterscheidet man

- den **gestellten Betrieb (Bild 3.2)**, bei welchem der Elektromotor entsprechend seinem eigenen Drehzahl/Drehmoment-Verhalten auf die Belastung durch die Arbeitsmaschine reagiert und
- den **geregelten Betrieb (Bild 3.3)**, bei welchem innerhalb des schraffierten Bereiches ein beliebiger Arbeitspunkt (M, n) geregelt und überwacht werden kann.

Bedeutung der in den Bildern verwendeten Abkürzungen:

ASM	=	Asynchronmotor
GM	=	Gleichstrommotor
SM	=	Synchronmotor
M	=	Drehmoment
n	=	Drehzahl
M_A	=	Anlaufmoment
M_K	=	Kippmoment
M_L	=	Lastmoment
NS	=	Nebenschluss
RS	=	Reihenschluss
6	=	Lastwinkel

3.2 Beurteilungsschwerpunkte

Der Entwurf und die Auslegung eines elektrischen Antriebssystems wird von den Anforderungen der anzutreibenden Arbeitsmaschine, vom Arbeitsprozess, vom speisenden Netz und von den Umgebungsbedingungen bestimmt.

Die **Tabelle 3.1** zeigt die Einsatzgebiete, Anwendungsgrenzen und -probleme verschiedener Antriebsmotoren. Damit können im Sinne einer Synthese gewisse Vorentscheide getroffen und eine gezielte Systemauswahl vorgenommen werden. Dabei muss den Anschlussbedingungen an das Energiesystem, der Beeinflussung anderer Systeme, der Energieökonomie sowie der Kompatibilität mit übergeordneten Automatisierungsebenen eine besondere Bedeutung beigemessen werden.

Schwerpunkte bei der Beurteilung eines bestehenden Antriebssystems und bei der Erstellung des Pflichtenheftes für ein neues System sind

- **bei der Arbeitsmaschine:**
 - Drehzahl-Drehmoment Verhältnisse, Prozessverhalten, Prozesswirkungsgrad, Anforderungen an den Stell- oder Regelbetrieb
- **beim Antrieb und Steller:**
 - Betriebsverhalten, Belastungsverhältnisse und Auslastung, Schutz-, Stell- und Regelverhalten, Prozesswirkungsgrad
- **bei der Netzeinspeisung:**
 - Spannungs-, Strom-, Wirk- und Blindleistungsverhältnisse

Allgemein ausgedrückt sollen damit sowohl die Anlagen bewertet, d.h. ihre Belastungsverhältnisse, ihr Betriebsverhalten und ihre Energiebilanz ermittelt werden, als auch deren Komponenten beschrieben werden.

Das Ziel dabei kann entweder

- die Verbesserung des Betriebes sein, d.h. eine Senkung der Kosten und des Energieverbrauches und eine Verbesserung der Funktion, oder
- die Beschaffung von Planungsunterlagen für ein neues oder verbessertes Antriebssystems sein.

Bei den Merkmalen muss unterschieden werden zwischen

Motorarten:	Einsatzgebiete:	Anwendungsgrenzen und -probleme
Asynchron-Motor mit Käfigläufer	Einfache Antriebe, Stellgetriebe	Natürliches Verhalten: I_A , M_A , $\cos\varphi$, M_K direktes Einschalten
Asnchron-Motor mit Schleifringläufer	Einfache Antriebe, Schweranlauf, begrenzter Stellbereich	Schleifringe Verschleiss
Asynchron-Motor von Drehstromsteller gespeist	Einfache Antriebe Schweranlauf, regel bar	Schlechter Wirkungsgrad Stabilität
Asynchron-Motor von U- oder I-Umrichter gespeist	Regelbare Antriebe mit beschränkter Dynamik,	Pendelmomente, Verluste, Geräusche, Umrichterleistung
Asynchron-Motor von PWM-Umrichter gespeist	Regel bare Antriebe mit beschränkter Dynamik U/f- und Vektorregelung	Stillstandsbetrieb, Verluste, Geräusche, Umrichterleistung
Gleichstrom-Motor von Gleich-/Wechselrichter gespeist	Regelbare Antriebe mit grossem Stellbereich, guter Dynamik	Stromwender des Gleichstrommotors
Synchron-Motor Reluktanz-Motor	Antriebe mit konstanter Drehzahl, gutem Leistungsfa ktor	Anlaufprobleme, Eigenschwingungen, Stabilität
Schrittmotor von Umrichter gespeist	Verstellantriebe kleiner Leistung ohne Regelung	Stabilität, Schrittverlust, Anlauf, Eigenschwingungen
Synchron-Motor von I-Umrichter	Regelbare Antriebe grosser Leistung	Pendeldrehmomente Anlauf, Stellbereich
Synchron-Motor von U-Umrichter gespeist	Regelbare Antriebe kleiner Leistung (Elektronik-Motor)	Pendeldrehmomente, Stellbereich, Feldschwäcbereich

Tabelle 3.1: Einsatzgebiete, Anwendungsgrenzen und -probleme von Motoren

- technischen und physikalischen Grössen, wie z.B. elektrische Spannungen und Ströme, Wirk- und Blindleistung, Drehzahl, Drehmoment, Temperatur usw.
- allgemeinen Merkmalen, wie z.B. dem Energieverbrauch in einem Betrachtungszeitraum, der Ausnutzung, der Lebensdauer der Wicklungen usw.
- Modellen für die Beschreibung des mechanischen, elektrischen und thermischen Verhaltens des Systems bzw. seiner Komponenten.

Während die physikalischen Grössen mehr oder weniger direkt gemessen und ermittelt werden können und im allgemeinen Durchschnitts- bzw. Momen-

tanwerte sind, erfordern die Ermittlung der Modelle und Merkmale ein komplexeres Vorgehen.

3.3 Messverfahren und Methoden

Bei den Messverfahren und Methoden, welche zur Ermittlung der Antriebsmerkmale und -parameter verwendet werden, unterscheidet man:

- **Direkte Messverfahren**, z.B. für Spannungen, Ströme, Leistungen, Drehmomente, Drehzahlen und Temperaturen,
- **Indirekte Messverfahren**, z.B. für die Drehmomentbestimmung, die Wirkungsgradbestim-

mung aus der aufgenommenen Leistung, dem Drehmoment und der Drehzahl oder aus den Verlusten,

- **Parameteridentifikation** aufgrund einer Reihe von Messgrößen und einer Modelldarstellung,
- **Modellidentifikation** aufgrund von Messungen und Modellkonzepten, z.B. für das Erwärmungsverhalten einer elektrischen Maschine bei Belastung, bei einer Änderung der Umgebungsverhältnisse, usw.

Die folgenden Abschnitte geben Hinweise, wie hier in einzelnen vorgegangen werden kann.

3.4 Ermittlung der Motorbelastung und des Motorverhaltens

Bei der Ermittlung der Motorbelastung im stationären oder dynamischen Betrieb und bei der Ermittlung der Motorkenngrößen durch gezielte Versuche (siehe **Kapitel 5**) müssen sowohl elektrische, als auch mechanische und thermische Größen gemessen werden.

Kenngrößen	Probleme
• <u>Elektrotechnik</u> Spannung U, Strom I Wirk- und Blindleistung P, Q Frequenz f_s	keine keine keine
• <u>Mechanik</u> Drehmoment M Drehzahl n, Schlupf s Schwingungen, Geräusche	ja ja ja
• <u>Kühlung, Erwärmung</u> Temperatur Kühlmittelfluss	ja ja
• <u>Energieverbrauch</u> Wirkungsgrad	ja keine

Bild 3.4: Ermittlung der Motorkenngrößen

Während beim Betrieb am Netz, mit sinusförmigen Spannungen und Strömen die Messung der elektrischen Größen mit analogen und digitalen Messgeräten sehr genau erfolgen kann, kann bei Umrichterspeisung mit der üblichen Technik nur noch auf der Netzseite gemessen werden.

Zur Messung an den Motorklemmen können bei Umrichterspeisung nur noch Geräte verwendet werden welche analog bzw. digital mit einer geeigneten Abtastfrequenz Augenblickswerte verarbeiten und daraus Effektiv- und Mittelwerte bilden.

Die üblichen Definitionen für die Wirk- und Blindleistung

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi \quad Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$$

sind nur für zeitlich sinusförmig verlaufende Vorgänge gültig.

Bei nichtsinusförmiger Speisung kann nur eine mittlere Leistung

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{\nu=1}^m \sum_{n=1}^N u_{\nu n} i_{\nu n} \, dt$$

über die m Phasen und die N Oberschwingungen bestimmt werden.

Für eine direkte Messung des Drehmomentes wird ein Drehmomentaufnehmer entweder zwischen dem Motor und der Arbeitsmaschine oder am Aufstellungsort des Motors, zwischen Fundament und Stator benötigt.

Indirekt kann man das Drehmoment M_i der Gleichstrom- und Drehfeldmaschinen aus der inneren Leistung P_i und der Winkelgeschwindigkeit Ω_s des Drehfeldes bestimmen.

$$M_i = \frac{P_i}{\Omega_s}$$

An der Welle steht das um die Lager-, Reibungs- und Lüftermomente M_R verminderte Drehmoment

$$M = M_i - M_R$$

zur Verfügung. Die innere Leistung P_i erhält man, wenn man von der gemessenen Aufnahmeleistung P die Statorverluste V_s abzieht

$$P_i = P - V_s$$

Die Statorverluste bestehen im wesentlichen aus den Stromwärmeverlusten in den Stator- bzw. Ankerwicklungen

$$V_s = 3I_s^2 R_s \text{ bei Drehfeldmaschinen}$$

$$V_s = I_a^2 R_a \text{ bei Gleichstrommaschinen}$$

Diese Überlegungen gelten auch für transiente

und dynamische Vorgänge. Dafür müssen aber laufend die Augenblickswerte der inneren Leistung P_i und der Verluste berechnet werden. Für diese Aufgabe stehen heute Messgeräte zur Verfügung, welche im **Kapitel 4** behandelt werden.

3.5 Ermittlung der Lastverhältnisse (Arbeitsmaschine)

Die Kenntnis der Belastungsverhältnisse, d.h. die Abhängigkeit des Lastmomentes M_L der Arbeitsmaschine von der Drehzahl n , der Zeit t und vom Massen-Trägheitsmoment J ist für die Auslegung des Antriebes von grosser Bedeutung.

Darüberhinaus interessieren aber auch energetische Kenngrössen, wie z.B. der Prozesswirkungsgrad, der spezifische Energieverbrauch und die Verluste gemäss **Tabelle 3.2**.

Kenngrössen	Probleme
<u>Mechanik</u> -Lastmoment $M(t)$ -Drehzahl $n(t)$ -Massen+Trägheitsmomente -Schwingungen	ja ja ja ja
<u>Energetik</u> -Prozessverbrauch (kWh) -Verluste im Einzelnen	ja ja

Tabelle 3.2: Probleme Arbeitsmaschine

Die Messung des Last-Drehmomentes M_L und des Energieverbrauchs kann im allgemeinen nur indirekt erfolgen, wobei der Antrieb als Messgerät verwendet und das Drehmoment M des Motors, wie in **Kapitel 3.4** beschrieben, indirekt bestimmt wird. Die Ermittlung des Trägheitsmomentes J hingegen kann durch das Auswerten von dynamischen Vorgängen ermittelt werden

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M - M_L$$

wenn das Antriebsmoment M bekannt ist.

3.6 Ermittlung der Netzverhältnisse (Beeinflussungsprobleme)

Elektrische Antriebe belasten das speisende Netz und die Umgebung durch:

- Betriebsfrequente Grössen, wie Ströme, Wirk- und Blindleistungen
- Oberschwingungen, wobei der Antrieb als Oberschwingungsstrom- oder Spannungsquelle wirkt
- Hochfrequente, leitungsgebundene elektrische Spannungen
- Hochfrequente, elektromagnetische Felder
- Geräusche und Schwingungen

Kenngrössen	Probleme
<u>Niederfrequente Grössen</u> U, I, P, Q <u>-Oberschwingungen:</u> I_n, U_n	Nein
<u>Hochfrequente Grössen</u> $-U, E, H$ (Felder)	ja
<u>Geräusche, Schwingungen</u>	ja

Tabelle 3.3: Problem der Netzeinspeisung

Diese Grössen (siehe **Tabelle 3.3**) sind abhängig von der Belastungssituation und vom Netzzustand. Abhängig von den Kopplungsverhältnissen können sie andere Einrichtungen stören oder beschädigen, wie im **Kapitel 9** ausführlich beschrieben wird.

Die zu ihrer Erfassung erforderliche Messtechnik ist anspruchsvoll, jedoch verfügbar. Problematisch bei ihrem Einsatz, insbesondere im mittel- und hochfrequenten Bereich, ist die Berücksichtigung der äusseren Quellen, d.h. die Unterscheidung zwischen den Auswirkungen des Antriebssystems und des Netzes. So wird z.B. eine Filter- und Kompensationseinrichtung, bestehend aus einer Kondensatoranlage mit Drosselspulen, sowohl die Oberschwingungen des Antriebes als auch die Oberschwingungen des Netzes aufnehmen.

4 . Praktische Messverfahren

Grundsätzliches:

- Die Antriebsdynamik hängt ausser von der sich zeitlich ändernden Drehmomentsituation auch noch von den Massenträgheitsmomenten des Motors und der angetriebenen Arbeitsmaschine ab.
- Motor-Trägheitsmomente werden in Datenblättern der Hersteller angegeben. Dagegen müssen Last-Trägheitsmomente berechnet oder experimentell bestimmt werden.
- Dem klassischen Drehmoment-Mess-Prinzip liegt die mechanische Verformung des Wellenstranges zugrunde. Dagegen kann bei neuen elektronischen Drehmoment-Messeinrichtungen auf mechanische Messwellen vollständig verzichtet werden.
- Die elektrischen und thermischen Parameter einer elektrischen Maschine können aufgrund einer Leerlauf-, Last- und Kurzschlussmessung und eines Last-Temperaturlaufes identifiziert werden.

4.1 Massenträgheitsmoment

Eine generelle Übersicht, welche die Abhängigkeit der Trägheitsmomente von Asynchronmotoren mit Kurzschlussläufern von der Nennleistung darstellt, ist in **Bild 4.1** gezeigt. Aus der Tatsache, dass das Trägheitsmoment stärker ansteigt als die Nennleistung erklärt sich, dass sich die Anlaufzeiten, mit der Typenleistung vergrössern und dass das Abführen der Verlustleistung beim Anlauf problematischer wird. Ein Vergleich zu Gleichstrom-Nebenschlussmaschinen zeigt weiter, dass bei kleinen Nennleistungen die Trägheitsmomente der Asynchronmotoren um ca. 30% kleiner sind, was sich aufgrund notwendiger Zusatzeinrichtungen für die Stromwendung (Kommutator) bei der Gleichstrommaschine erklären lässt.

Die Trägheitsmomente von Arbeitsmaschinen dagegen sind meist unbekannt und müssen entweder

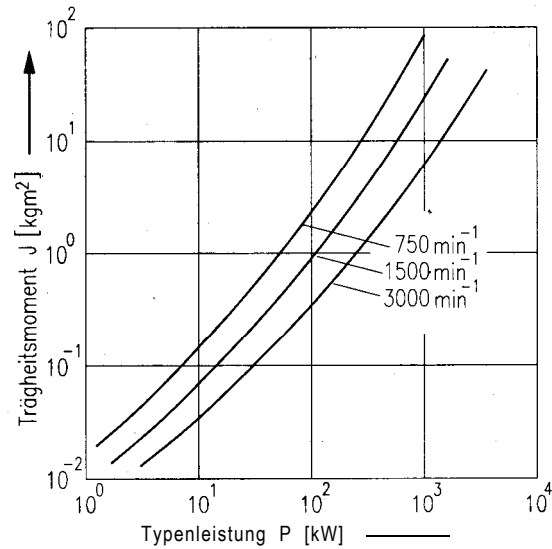


Bild 4.1: ASM Trägheitsmomente

berechnet oder experimentell ermittelt werden [8]. Nachfolgend werden verschiedene Verfahren angegeben, Lastträgheitsmomente zu bestimmen.

4.1.1 Messung von Trägheitsmomenten

Anlaufversuch

Beim normalen Anlaufversuch, also dem Bewegungsvorgang vom Stillstand des Antriebsmotors bis zum Erreichen der Nenndrehzahl n innerhalb der Zeit t_a , gilt für das gesamte Trägheitsmoment J die Gleichung

$$J = J_L + J_M = \frac{M_{bmi} t_a}{2\pi n}$$

wobei J_L dem Lastträgheitsmoment, J_M dem Motorträgheitsmoment und M_{bmi} dem mittleren Beschleunigungsmoment entspricht. Um das Ende des Anlaufs exakt feststellen zu können, muss für die Ermittlung der Anlaufzeit t_a die Drehzahl n oder der Strom I überwacht werden. Das mittlere Beschleunigungsmoment M_{bmi} kann aufgrund von Herstellerangaben bestimmt werden. Die Ermittlung des Lastmomentes M_L und auch des Reibungsmomentes M_R hingegen muss messtechnisch erfolgen.

Beim Anlaufversuch mit Hilfsschwungmasse, im Vergleich zum normalen Anlaufversuch, ist es er-

laubt das mittlere Beschleunigungsmoment M_{bmi} zu eliminieren, wenn man es in beiden Fällen als gleich gross voraussetzt.

Man stellt zunächst die Anlaufzeit t_a des normalen Anlaufversuches fest. Danach befestigt man auf der rotierenden Welle eine Hilfsschwungmasse mit bekanntem Trägheitsmoment J_{hi} und stoppt die neue Anlaufzeit t_{ahi} . Drehzahlmesser oder Amperemeter dienen dazu, das Ende des Anlaufvorganges festzuhalten.

Das Gesamt-Trägheitsmoment $J = J_L + J_M$ erhält man dann nach folgender Gleichung

$$J = J_{hi} \frac{t_a}{t_{ahi} - t_a}$$

Auslaufversuch

Beim 'normalen Auslaufversuch', also dem Bewegungsvorgang nach dem Abschalten der Stromzufuhr bis zum Stillstand des Antriebsmotors innerhalb der Bremszeit t_{br} , gilt für das Gesamt-Trägheitsmoment J die Gleichung

$$J = \frac{M_{br} t_{br}}{2\pi n}$$

wenn das Bremsmoment M_{br} als bekannt vorausgesetzt wird.

Bei einem unbekannten Bremsmoment wird ein Auslaufversuch mit Hilfsschwungmasse von bekanntem Trägheitsmoment J_{hi} durchgeführt. Dazu koppelt man den Drehkörper mit dem Antrieb, lässt ihn ganz auslaufen und erhält so die Auslaufzeit t_{bhi} . Ein zweites Auslaufen ohne Hilfsschwungmasse ergibt die Auslaufzeit t_b . Wenn bei beiden Ausläufen zu Beginn die Drehzahlen gleich sind und sich das Reibungsmoment durch die Hilfsschwungmasse nicht ändert, gilt für das Trägheitsmoment J die Gleichung

$$J = J_{hi} \frac{t_b}{t_{bhi} - t_b}$$

Kombination Anlauf-/Auslaufversuch

Kombiniert man den Anlauf- und den Auslaufversuch, dann lässt sich das Last- bzw. Reibungsmoment eliminieren. Damit erhält man

$$J = \frac{M_{mi} t_a t_b}{2\pi n(t_a + t_b)}$$

wenn vorausgesetzt wird, dass diese Momente während des Hochlaufs und des Auslaufs gleich bleiben, was meistens der Fall ist.

Schaltversuch

Mit dem Schaltversuch kann das Trägheitsmoment schwieriger Körper aber auch ganzer Maschinen verhältnismässig einfach bestimmt werden. Er beruht darauf, dass die Beschleunigungsarbeit dem Trägheitsmoment direkt proportional ist. Über einen ausreichenden Zeitraum wird zunächst die Beschleunigungsarbeit für den leer laufenden Motor und dann für den leer laufenden Gesamtantrieb bestimmt. Für beide Fälle stellt man dazu die für z Umschaltungen von Rechts- auf Linkslauf benötigte Energie fest und zieht davon die Leerlaufenergie ab. Das durch die Arbeitsmaschine bedingte Zusatzträgheitsmoment lässt sich dann nach folgender Gleichung berechnen

$$J = J_M \left(\frac{W_z - W_o}{W_{zM} - W_{oM}} - 1 \right)$$

in die die Grössen

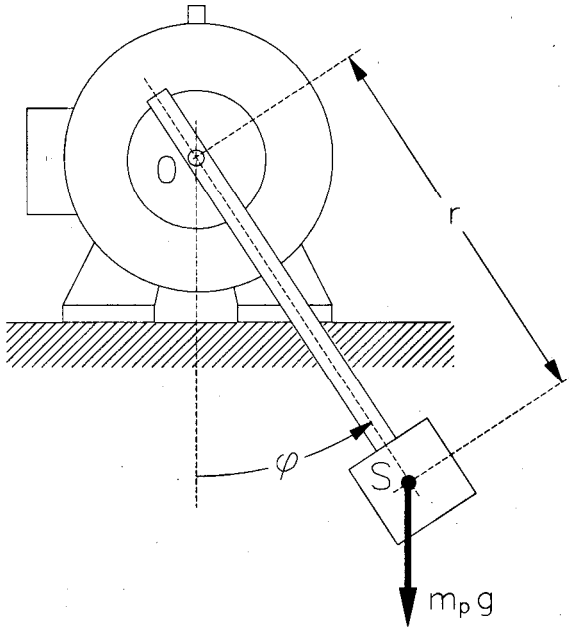
- W_z = Leerlaufenergie des Gesamtantriebes nach z Umschaltungen
- W_o = Leerlaufenergie des Gesamtantriebes ohne Umschaltungen
- W_{zM} = Leerlaufenergie des Motors nach z Umschaltungen
- W_{oM} = Leerlaufenergie des Motors ohne Umschaltungen

eingesetzt werden müssen. Am einfachsten lässt sich die für die Schaltvorgänge aufgewendete Energie mit einem Elektrizitätszähler messen.

Drehkörper mit Pendel

Mit dieser Methode kann auch das Trägheitsmoment von unregelmässig geformten, schwierig zu berechnenden und nicht im Schwerpunkt aufgehängten Körpern bestimmt werden. Wie in **Bild 4.2** gezeigt, muss man dazu ein Pendel herstellen, wofür der fast reibungslos gelagerte Rotor einer elektrischen Maschine normalerweise geeignet ist.

Dazu verbindet man den Körper, dessen Trägheitsmoment J bestimmt werden soll, mit dem Wellenende des Antriebsmotors und befestigt daran auch ein Pendel vom Gewicht $m_p g$ mit dem Abstand r

**Bild 4.2:** Drehkörper mit Pendel

seines Schwerpunktes von der Motorachse. Durch das bei der Auslenkung des Pendels entstehende Drehmoment werden die trägen Massen bewegt. Das Zusatzträgheitsmoment J lässt sich dann nach der Formel

$$J = m_p g r \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 - J_M - J_P$$

berechnen wobei J_M das Motorträgheitsmoment, $J_P = r^2 m_p$ (m_p = Pendelmasse) das Trägheitsmoment des Pendels, T die mittlere Schwingungsdauer und $g = 9.81 [ms^{-2}]$ die Erdbeschleunigung ist.

4.1.2 Berechnung von Trägheitsmomenten

Wie in **Bild 4.3** dargestellt, tritt bei einer ungleichförmigen Translationsbewegung eine Beschleunigungskraft F_b auf während man bei einer ungleichförmigen Rotationsbewegung von einem Beschleunigungsmoment M_b spricht.

Nach **Bild 4.4** überträgt sich das Trägheitsmoment einer rotierenden Arbeitsmaschine bei einem zwischengeschalteten Getriebe (Übersetzungsverhältnis $i = n_1/n_2$) mit $1/i^2$ auf die Motorseite. Für das an der Motorwelle auftretende Beschleunigungs-Verzögerungsmoment ist die Energieflussrichtung massgebend. Dabei ist die Winkelgeschwindigkeit

und das Beschleunigungsmoment auf die Motorwelle bezogen.

Translation

$$F_b = m \frac{dv}{dt}$$

Rotation

$$M_b = J \frac{d\omega}{dt}$$

m = Bewegte Masse

$\frac{dv}{dt}$ = Geschwindigkeitsänderung

J = Gesamtträgheitsmoment

$\frac{d\omega}{dt}$ = Winkelgeschwindigkeitsänderung

Bild 4.3: Ungleichförmige Bewegung

EM = Elektrische Maschine

G = Getriebe

AM = Arbeitsmaschine

Energiefluss	Beschleunigungs-Verzögerungsmoment
EM → G → AM	$M_b = J_{AM} \frac{1}{\eta_g} \frac{1}{i^2} \frac{d\omega}{dt}$
EM ← G ← AM	$M_b = J_{AM} \eta_g \frac{1}{i^2} \frac{d\omega}{dt}$

J_{AM} = Trägheitsmoment Arbeitsmaschine

η_g = Getriebewirkungsgrad

i = Getriebeübersetzung

Bild 4.4: Energiefluss bei Antrieben

4.1.3 Motor-Beschleunigungsmoment

Um das Motor-Beschleunigungsmoment M_b einer Antriebsmaschine zu ermitteln wird zunächst die Drehwinkeländerung $\varphi_2 - \varphi_1$ mit Hilfe eines digitalen Decoders am Rotor-Wellenende gemessen. Um dabei Störeinflüsse weitgehend auszuschalten, wird die Anzahl der Pulse und deren absolute Zeitdauer mit elektronischen Hilfsmitteln sehr genau fixiert wobei die Rotorgeschwindigkeit innerhalb des Zeitintervalls Δt aus zwei Eingangs-Pulspaaren bestimmt wird. Die zeitliche Änderung der Geschwindigkeit wird mit einem Kalman-Filter gewonnen. Mit diesen beiden Messwerten kann das Motor-

Beschleunigungsmoment

$$M_b = J_R \frac{d\omega}{dt} = J_R \frac{d^2\varphi}{dt^2}$$

sehr einfach berechnet werden, da das Massenträgheitsmoment des Rotors J_R vom Hersteller meist angegeben wird.

4.2 Drehmomentmessung

Wirkt, wie im Falle rotierender Arbeitsmaschinen, eine Kraft zirkular um eine Rotationsachse, so spricht man von einem 'Drehmoment'. Das präzise Messen von Drehmomenten rotierender Körper, z.B. für die Wirkungsgradbestimmung von Arbeitsmaschinen, stellt in der Regel hohe Anforderungen. Viele Drehmoment-Messprobleme sind nur bei klar definierter Aufgabenstellung und Einbeziehung aller Parameter lösbar. Nachfolgend werden prinzipielle Möglichkeiten beschrieben, Drehmomente zu messen und dabei ihre charakteristischen Eigenschaften genannt.

4.2.1 Reaktionskraft am Hebelarm

Die Methode, die Reaktionskraft an einem Hebelarm zu messen wird sehr häufig zur Drehmomentbestimmung angewendet. **Bild 4.5** zeigt schematisch eine Messanordnung mit pendelnd aufgehängtem Stator einer Antriebsmaschine was in den meisten Fällen durch aufwendige Mechanik realisiert wird. Die am Ende des Hebelarmes a wirkende Kraft F wird mit einem Kraftaufnehmer gemessen.

Anwendungsfälle

- Leistungsermittlung bei Wirbelstrombremsen
- Viskositätsbestimmung eines Rührwerkes über die Motor-Abstützkraft
- Reaktionsmoment Elektroschrauber

Störeinflüsse

- Langzeit-Veränderung der Lagerreibung
- Ausdehnung des Hebelarmes bei Temperaturänderungen
- Unterschiedliche Betriebsarten

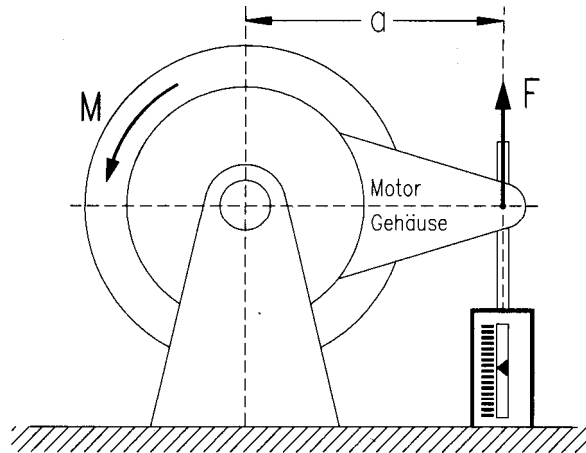


Bild 4.5: Reaktionskraft am Hebelarm

Probleme

- Dynamische Untersuchungen sind problematisch wegen der Trägheit der bewegten grossen Massen.

4.2.2 Verformung im Wellenstrang

Bei dieser Methode wird die durch Torsionsbeanspruchung in der Welle auftretende elastische Verformung unmittelbar gemessen, wodurch Störgrössen weitgehend eliminiert werden. Die Signalgewinnung kann nach verschiedenen physikalischen Prinzipien, wie z.B. hydraulisch oder pneumatisch, erfolgen. Eine Verformung kann aber auch in eine Kapazitäts-, Induktivitäts-, Widerstands-, Permeabilitäts- oder Phasenlagenänderung umgesetzt werden. Am gebräuchlichsten sind die zwei folgenden Typen von Drehmomentenaufnehmern.

DMS-Drehmomentenaufnehmer

Wesentlicher Teil eines DMS-Drehmomentenaufnehmers ist ein zylindrischer Messkörper, der durch ein auf ihn wirkendes Torsionsmoment M_t verdreht wird. Die dabei auftretenden mechanischen Spannungen und Dehnungen sind ein Mass für das Drehmoment. Diese werden mit Dehnungsmess-Streifen (DMS) erfasst, die gemäss **Bild 4.6** unter 45° zur Längsachse aufgeklebt und zu einer Wheatstone-Messbrücke zusammengeschaltet sind.

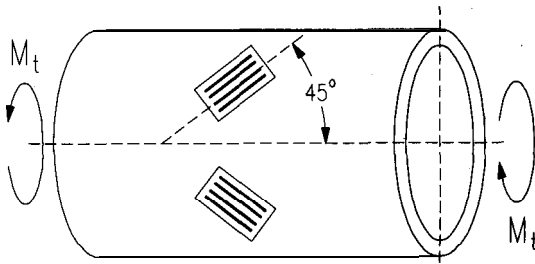


Bild 4.6: DMS-Drehmomentaufnehmer

Die Übertragung der Speisung und der Mess-Signale erfolgt über Schleifringe oder eine Telemetrieanlage. Für DMS-Drehmomentaufnehmer können folgende charakteristische Eigenschaften angegeben werden.

- Messbereich 10Nm - 100kNm
- Hohe Messgenauigkeit 0.2 - 1.0%
- Für dynamische Vorgänge geeignet
- Störgrößen, z.B. Temperatureinflüsse, durch Schaltungsmassnahmen kompensierbar
- Messfehler durch Driften der DMS-Verklebungen möglich
- Elastisches Element zwischen Motor und Arbeitsmaschine (kann zu Resonanzproblemen führen)

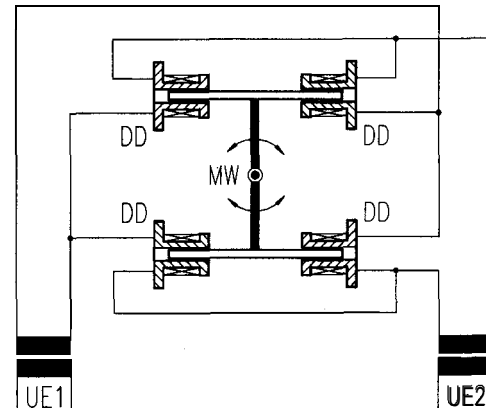
Induktive Drehmomentaufnehmer

Ihr Einsatzgebiet entspricht prinzipiell dem der DMS-Drehmomentaufnehmer. Sie haben jedoch eine grössere Empfindlichkeit und die Messung sehr kleine Drehmomente ($10^{-6} Nm$) ist möglich.

Kernstück des induktiven Drehmomentaufnehmers ist ein Torsionsstab, dessen Verdrehung durch ein induktives Spulensystem gemäss **Bild 4.7** erfasst wird. Wirkprinzipien: Tauchankerverschiebung in einer Spule verstimmt eine Brückenschaltung oder bewegte Spule beeinflusst eine Trafoschaltung.

In jedem Fall entsteht am Ausgang eines Spulensystems eine elektrische Spannung die der Verdrehung des Torsionsstabes und damit dem Drehmoment proportional ist. Charakteristische Eigenschaften des induktiven Drehmomentaufnehmers sind:

- Messbereichsumfang 0.001Nm - 100kNm



MW = Messwelle
DD = Differentialdrossel
UE1 = Übertrager für Speisung 8kHz
UE2 = Übertrager für Messwerte

Bild 4.7: Induktive Drehmomentaufnehmer

- Hohe Genauigkeit 0.2% - 0.5% vom Maximalwert
- Statische und dynamische Drehmomentmessung möglich
- Schleifringlos, deshalb wartungsfrei

4.2.3 Einbau von Drehmomentmesswellen

Drehmomentmesswellen werden vorzugsweise mit Ausgleichskupplungen in einen Wellenstrang eingebaut. Ausgleichskupplungen dienen primär dazu, geometrische Fehlanpassungen und damit Fehlbelastungen von der Drehmomentmesswelle fernzuhalten. Zu den geometrischen Fehlanpassungen gehören Richtungs-, Fluchtungs-, Abstands- oder Winkelfehler [9].

Beim starrten Einbau von Drehmomentmesswellen müssen Fehlbelastungen durch exaktes Ausrichten der Wellenenden ausgeschlossen werden. Bei Messwellen mit Lagern darf dabei keinesfalls das Gehäuse starr befestigt werden.

Im praktischen Betrieb darf nicht übersehen werden, dass zum Teil stark überhöhte Drehmomentwerte bei Anfahr-, Brems-, oder Schaltvorgängen auftreten was bei der Auslegung von Drehmomentmesswellen berücksichtigt werden muss. Hohe, stossförmige Drehmomentbelastungen treten z.B. auch bei Stern/Dreieck Umschaltungen oder nicht-synchronisiertem Schalten eines Generators auf.

4.2.4 Indirekte Drehmomentbestimmung

Neuerdings werden elektronische Messeinrichtungen zur indirekten Drehmomentbestimmung genutzt [10], [11]. Dabei wird nicht nur das innere elektrische Drehmoment einer Antriebsmaschine bestimmt, sondern auch die Wirk- und Blindleistung des Motors. Dieser kann sowohl in Stern als auch in Dreieck geschaltet sein. Das Messprinzip beruht auf der von der Fachliteratur her bekannten Raumzeigertheorie [12] und setzt eine gewisse räumliche Feldverteilung im Luftspalt voraus.

Laut Messprinzip bleiben dabei die in den technischen Spezifikationen angegebenen Genauigkeitsklassen bei beliebiger Speisung gültig, d.h. die Genauigkeit der Messung ist davon unabhängig, ob die Speisung sinusförmig ist oder mit einem Frequenzumrichter (hoher Oberwellenanteil) erfolgt. Damit kann das elektrische Drehmoment auch bei transienten Vorgängen bestimmt werden.

Für Motoren mit räumlich sinusförmiger Feldverteilung im Luftspalt gewährleistet diese Methode die genauesten Resultate. Da gemäss **Bild 4.8** die Zeitwerte der Klemmenspannungen und Ströme gemessen werden, muss die Drehmomentanzeige wegen zu berücksichtigender Statorstrom-Wärmeverluste korrigiert werden. Auf den elektronischen Printplatten wird dies mit extern zu bestückenden Widerständen realisiert.

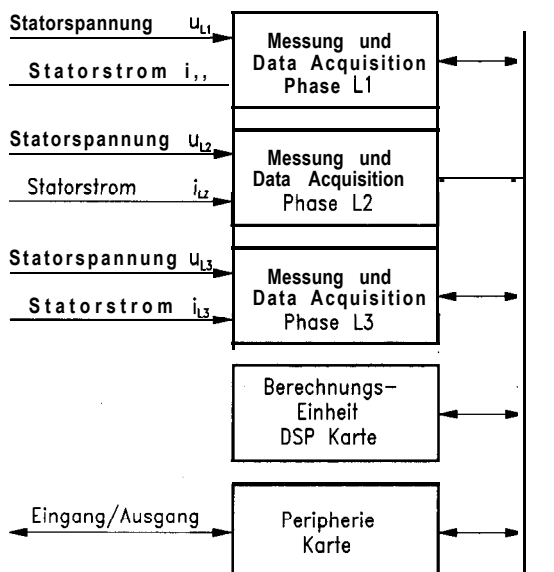


Bild 4.8: Elektronische Drehmomentmessung

Der entscheidende Vorteil dieser neuen Drehmoment-Messmethode ist einfach die Tatsache, dass auf eine Drehmoment-Messwelle vollständig verzichtet werden kann und die mechanische Kopplung zwischen Antriebsmotor und Arbeitsmaschine nicht mehr unterbrochen werden muss. Die Bestimmung des Drehmomentes fest eingebauter Antriebssysteme aber auch von mobilen Anlagen wird dadurch wesentlich vereinfacht.

Als Anwendungsbeispiel der indirekten Drehmomentmessung ist im **Bild 4.9** das elektrische Drehmoment und die Drehzahl während der Anlaufphase eines 2.2kW Asynchronmotors gezeigt.

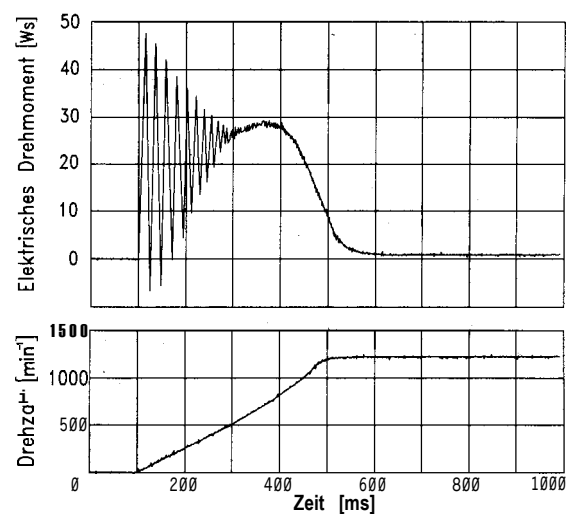


Bild 4.9: Drehmomentmessung ASM-Anlauf

4.3 Drehzahlmessung

Für die Überwachung oder Steuerung von Antriebssystemen ist die genaue Kenntnis der Drehzahl unerlässlich. Unter Drehzahl n wird im allgemeinen die Anzahl der Umdrehungen U eines rotierenden Maschinenteiles in der Zeiteinheit t verstanden. Die Winkelgeschwindigkeit ω wird in diesem Zusammenhang als der Quotient des von einem radialen Strahl überstrichenen Winkels φ in der Zeitspanne t definiert.

Da für die Drehzahlmessung verschiedene physikalische Effekte genutzt werden können, wird eine Vielzahl verschiedener Ausführungsformen von Drehzahlmessern angeboten. Deren mechanisch-elektrische Gebereigenschaften werden nachfolgend im Überblick aufgezählt.

4.3.1 Mechanisch-elektrische Geber

Tachometerdynamo

Diese Art von Drehzahlgeber kann je nach Verwendungszweck der Messwerte als Gleich- oder Wechselstromgenerator ausgelegt sein. Wie im **Bild 4.10** gezeigt, ist eine möglichst lineare Charakteristik des elektrischen Mess-Signals $U = f(n)$ dabei die Hauptforderung.

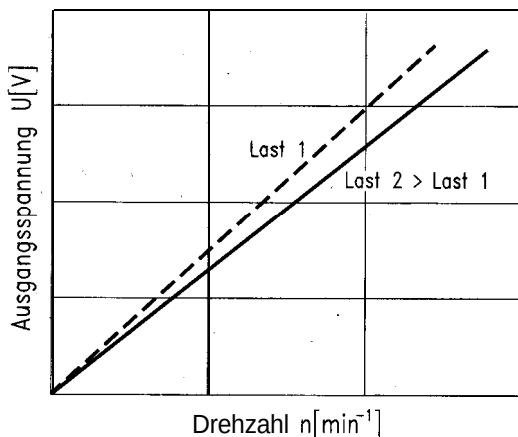


Bild 4.10: Dynamo-Charakteristik

Im kritischen Bereich, um den Nullpunkt, werden kompensierte Gleichrichter eingesetzt. Die Hersteller solcher Maschinen garantieren Fehlergrenzen unterhalb 1% selbst wenn die Ausgangsspannung U mit mehreren Messinstrumenten belastet wird.

Stroboskop

Ein mit der Frequenz f_x umlaufender Körper trägt auf einem konzentrischen Kreis m_x gleichartige Marken mit gleichem Teilungsabstand voneinander. Eine Blitzlampe beleuchtet die Marken mit kurzen Lichtblitzen deren Frequenz f eingestellt werden kann. Für $f = f_x$ scheinen die Marken stillzustehen was jedoch auch der Fall ist, wenn der Körper nur während jeder i -ten Umdrehung angeblitzt wird. Unter Berücksichtigung dieser Mehrdeutigkeit lässt sich die unbekannte Frequenz nach $f_x = if/m_x$ berechnen. Technische Geräte besitzen Frequenzbereiche von 5Hz - 5kHz. Die Hauptvorteile von Stroboskopen sind deren Rückwirkungsfreiheit und minimale Einsatzzeit.

Impulsverfahren

Werden am Umfang einer rotierenden Welle Impulsgeber angebracht, so ist die Impulsfrequenz proportional der Umlaufgeschwindigkeit und damit der Drehzahl. Solche Impulse können mechanisch, magnetisch, induktiv, kapazitiv oder photoelektrisch gegeben werden. Je grösser die Impulszahl pro Umdrehung ist, desto kleiner ist die kleinste noch messbare Drehzahl. Die erreichbare Genauigkeit wird dabei umso grösser, besonders bei sich schnell ändernden Drehzahlen. Dabei werden die Impulse entweder pro Zeiteinheit gezählt oder man bildet deren Mittelwerte, um ein kontinuierliches Signal zu erhalten.

Für Photoelektrische Impulsgeber werden Photozellen, Photoelemente, Photodioden, Photowiderstände oder Photohalbleiter verwendet. Passive photoelektrische Impulsgeber verändern bei Beleuchtung ihren Durchgangswiderstand während aktive Elemente bei Beleuchtung eine Spannung abgeben. Die Geber können als Reflexionsgeber durch schwarze Markierungen auf der Welle ausgebildet sein. Durch eine Optik muss allerdings dafür gesorgt werden, dass die Markierung genau auf der lichtempfindlichen Stelle abgebildet wird. Für Schattengeber ist weiterer mechanischer Aufwand in Form einer Lochscheibe nötig. In **Bild 4.11** ist das Impulsgeber-Messprinzip dargestellt.

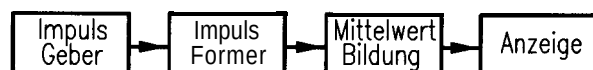


Bild 4.11: Impulsgeber-Signalverarbeitung

Für die weitere Verarbeitung der Impulse ist nur die Folgefrequenz und nicht die Impulsform wichtig. Diese wird mit Hilfe einer Begrenzerschaltung in gleichartige Rechteckimpulse umgeformt, die wiederum einen Kondensator aufladen. Der mittlere Ladestrom ist dabei ein Mass für die Drehzahl.

Beim elektromechanischen **Resolver**, gemäss Wirkprinzip des **Bildes 4.12**, induziert ein mit der Motorwelle gekoppelter Dauermagnet DM oder eine mit hochfrequentem Strom gespeiste Spule in einem orthogonalen Spulensystem Spannungen u_1, u_2 , die sinusförmig bzw. kosinusförmig vom Drehwinkel φ abhängen. Die Periodendauer ist durch eine vollständige Umdrehung der Motorwelle festgelegt. Die Augenblickswerte dieser Signale

werden abgetastet und dem Umrichter-Prozessor als Steuersignal zugeführt.

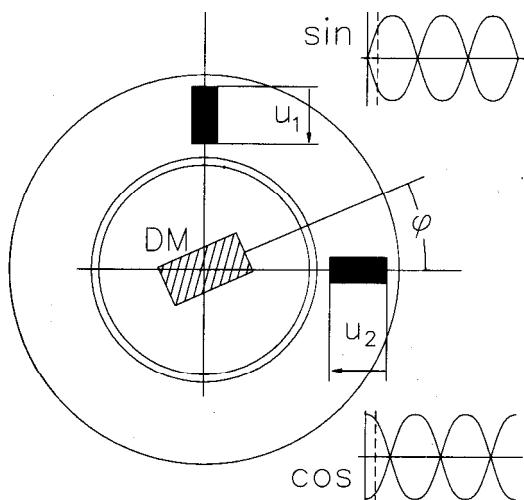


Bild 4.12: Elektromechanischer Resolver

Für hochdynamische Regelvorgänge jedoch werden optische **Inkrementalgeber** eingesetzt deren Funktionsprinzip im **Bild 4.13** dargestellt ist. Die Geber-Ausgangssignale verlaufen

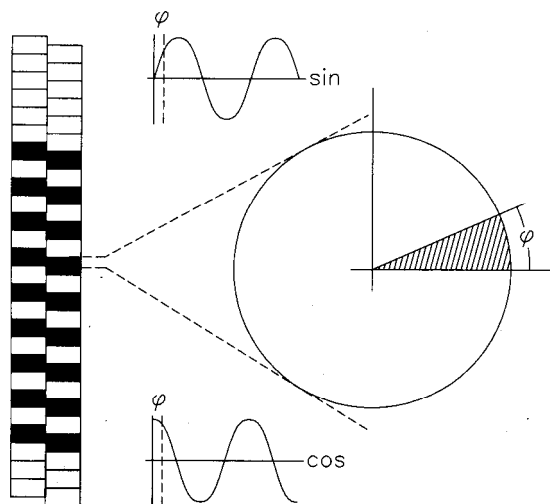


Bild 4.13: Optischer Inkrementalgeber

sinusförmig in Abhängigkeit des Drehwinkels φ . Die Basis für die Periodendauer ist aber nicht die vollständige Umdrehung der Motorwelle, wie beim elektromechanischen Resolver, sondern das ohnehin schon sehr kleine Winkelinkrement. Die Auswerte-Elektronik des Umrichters zählt die abgegebenen Inkremente der Geberspannung, zusätzlich interpoliert sie aber auch mehrere tausend Zwischenwerte für den Drehwinkel aus Augenblickswerten des abgetasteten Signals.

	Auflösung [Inform./Umdrehung]
Resolver	typisch 1024
Inkrementalgeber	8192 (4096) Schritte x 4096 Zwischenwerte = ca. 32 (16) Mio.

Bild 4.14: Vergleich Geber-Auflösungen

4.3.2 Indirekte Drehzahlbestimmung

Zur Bestimmung der Motordrehzahl werden neuerdings die leicht messbaren Klemmengrößen Motorspannung und Motorstrom herangezogen. **Bild 4.15** zeigt das gefilterte Ankerstromsignal eines

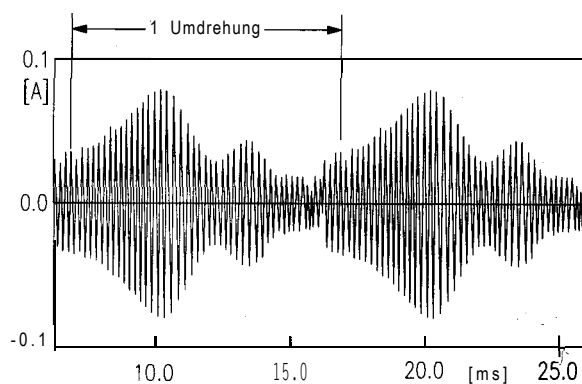


Bild 4.15: Drehzahlmessung mit Kalman-Filter

Universalmotors. Die 50Hz-Netzfrequenz und deren Harmonische wurden mit Hilfe eines Hochpass-Filters vom Mess-Signal getrennt. Der verbleibende Signalanteil ist durch die magnetischen Leitwertschwankungen des Ankers als Folge der Nutung geprägt. Diese Polfühligkeit ist von der Amplitude des Stromes abhängig. Bei bekannter Ankernutzahl kann deshalb aus der Nutfrequenz die Drehzahl des Motors bestimmt werden.

4.4 Bestimmung der elektrischen Maschinenparameter

Das grundsätzliche Vorgehen sei am Beispiel der Asynchronmaschine erklärt.

4.4.1 Leerlaufmessung

Mit Hilfe des Leerlaufversuches können für Asynchronmaschinen die wichtigsten Kenngrößen des magnetischen Kreises und die Verluste bestimmt

werden. Der Leerlaufversuch wird bei Nennspannung, Nennfrequenz und Nenndrehzahl durchgeführt. Dabei wird dem Netz bei unbelasteter Maschine der Magnetisierungsstrom und die für die Eisen- und Reibungsverluste benötigte elektrische Leistung entnommen. Aus der gemessenen Leerlaufspannung U_o , dem Leerlaufstrom I_o und der Leerlaufleistung P_o kann der Leistungsfaktor $\cos \varphi_o = P_o / (U_o I_o)$ errechnet werden. Der Magnetisierungsstrom einer Asynchronmaschine wird nach $I_\mu = I_o \sin \varphi$ rechnerisch ermittelt. Gemäss **Bild 4.16** ergeben sich die Eisenverluste V_{Fe} und die Reibungsverluste V_R aus der Differenz $P_o - V_{Cu}$ wobei sich die Kupferverluste V_{Cu} aus dem gemessenen Strangwiderstand R_{St} und dem Leerlaufstrom I_o errechnen lassen.

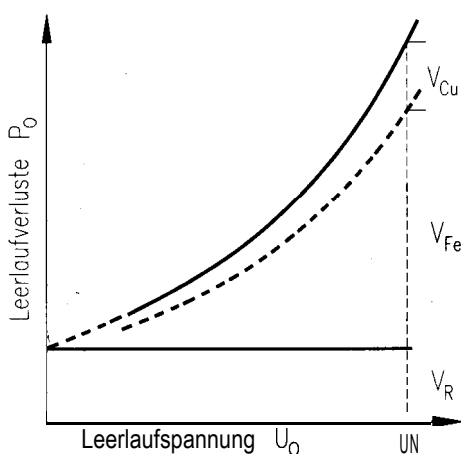


Bild 4.16: ASM Leerlaufverluste

4.4.2 Kurzschlussmessung

Der Kurzschlussversuch wird bei blockiertem ASM Rotor durchgeführt und dient der Bestimmung der Streureaktanzen und der Kurzschlussverluste. Dieser Versuch wird bei reduzierter Spannung U_k durchgeführt, wobei der Dauerkurzschlussstrom I_k auf die Höhe des Nennstromes begrenzt wird. Die Höhe des Kurzschlussstromes nach **Bild 4.17** hängt ab vom magnetischen Leitwert der Streuwege. Je grösser die Streureaktanz ist, umso geringere Kurzschlussströme treten auf. Eine weitere Messgrösse ist die dem Netz entnommene Kurzschlussleistung P_k mit der sich der Leistungsfaktor $\cos \varphi_k = P_k / (U_k I_k)$ berechnen lässt

Mit diesen Grössen können die Parameter der Ersatzschaltung einer Asynchronmaschine (vgl. **Bild 5.8**) identifiziert werden [13].

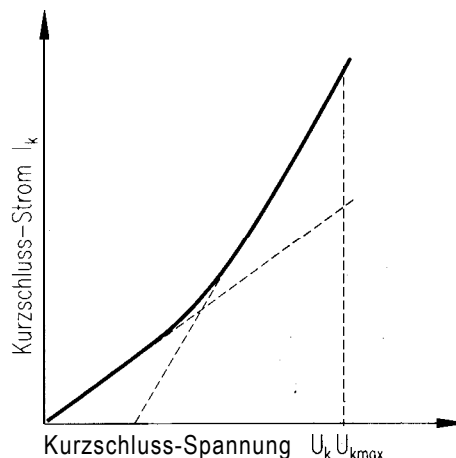


Bild 4.17: ASM Kurzschlusskennlinie

4.5 Bestimmung der thermischen Maschinenparameter

Die Erwärmung einer Antriebsmaschine darf zu keiner Zeit zu einer Gefährdung der Betriebssicherheit führen. Für die Statorwicklung und für die benachbarten Eisenteile sind dafür bestimmte Grenztemperaturen vorgeschrieben, die von den verschiedenen Isolationsklassen, wie im **Bild 4.18** gezeigt, abhängen.

Klasse	Höchstzulässige Dauertemperatur	Isolierstoffe
Y	90°C	Baumwolle, Naturseide, Zellwolle, Kunstseide, Polyamidfaser, Papier, Pressspan, Vulkanfaser, Holz, Formaldehyd-Kunstharz
A	105°C	Wie bei Klasse Y, jedoch nach dem Einbau mit Natur- oder Kunstharzlacken, Schellack usw. getränkt, lackbehandelte Textilien, Drahtlacke auf Ölharzbasis
E	120°C	Drahtlacke verschiedener Art, Pressteile mit Zellulosefüllstoff, Papierschichtstoffe
B	130°C	Glasfaser, Asbest, Glimmerprodukte, Pressteile mit mineralischen Füllstoffen
F	155°C	Glasfaser, Asbest, Glimmerprodukte, Drahtlacke auf Imid-Polyesterbasis
H	180°C	Glasfaser, Asbest mit Silikon-Harzen behandelt, Silikon-Kautschuk
C	über 180°C	Glimmer, Porzellan, keramische Stoffe, Glas, Quarz

Bild 4.18: Isolationsklassen

Die genaue Kenntnis der maschineninternen Temperaturvorgänge ist im Zusammenhang mit der thermischen Grenzleistung von Bedeutung, d.h. um wieviel eine vorgesehene Maschinenleistung heraufgesetzt werden kann bis eine zulässige Grenzerwärmung erreicht wird. Diese liegt bei mittleren Maschinen normalerweise weit unterhalb der Kippleistung.

4.5.1 Messmethoden

Die Messung der Temperaturen an interessierenden Maschinenteilen geschieht in der Regel mit Thermoelementen oder temperaturabhängigen Widerständen. Für eine einwandfreie Messung ist ein guter Wärmekontakt unerlässlich. Dieser kann durch Verwendung von Wärmeleitpaste verbessert werden. Meist ist das Hauptaugenmerk auf die schnellveränderliche Wicklungserwärmung und die damit gekoppelte Lebensdauerabschätzung gerichtet. Die Erfassung der Rotorerwärmung, auf die im nächsten Paragraphen eingegangen wird, stellt dabei eine besondere Herausforderung dar.

Praktischer Temperaturlauf

Vor Beginn des Temperaturlaufes wird die Maschine an verschiedenen Stellen mit Thermoelementen oder temperaturabhängigen Widerständen ausgerüstet. Dabei kann die Gehäusetemperatur bei geschlossenen Maschinen an der Kran-Öse oder anderen geeigneten Schrauben abgegriffen werden. Die Temperatursensoren in den Wickelköpfen sollen dagegen möglichst tief eingeführt werden. Wegen der unterschiedlich hohen Verluste der Eisenteile und Wicklungen erreichen beide die Enderwärmung zu verschiedenen Zeiten. Für die automatische Aufzeichnung der Maschinenerwärmung bei unterschiedlichem Lastspiel werden Temperaturschreiber eingesetzt. Der Temperaturlauf ist dann abgeschlossen wenn sich die Erwärmung der Maschinenkomponenten gegenüber Raumtemperatur nicht mehr ändert.

Telemetrieanlage

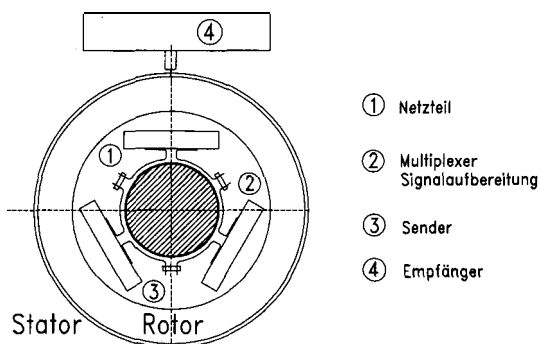


Bild 4.19: Telemetrieanlage

Für die Erfassung der Rotortemperaturen werden ebenfalls Thermoelemente oder temperaturabhängige Widerstände eingesetzt. Die Über-

tragung der Messwerte von den rotierenden Maschinenteilen kann mit Schleifringen erfolgen, was in der Regel jedoch mit erhöhtem mechanischen Aufwand verbunden ist. Heutzutage stehen Telemetrieanlagen zur Verfügung deren Funktionsprinzip auf elektromagnetischer Strahlung oder einer Infrarot-Übertragungstechnik beruht. In den **Bildern 4.19** und **4.20** ist die Wirkungsweise einer Telemetrieanlage schematisch dargestellt.

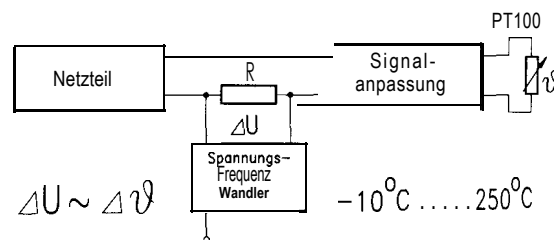
Komponenten der Telemetrie-Anlage

Netzteil $U = 5...12VDC$

$I \approx 40mA$ (abhäng.: Spannung, Kanalzahl)

Option: Spannungsquelle durch HF-Einspeisung

Multiplexer (8 Kanäle maximal)



Trägerfrequenz-Tastung

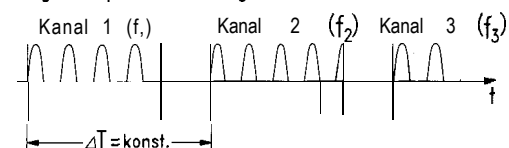


Bild 4.20: Funktionsprinzip Telemetrieanlage

HF Sender (433MHz), Trägerfrequenz-Tastung

HF Sendeleistung ($\approx 40mW$)

Option: Infrarot-Signalübertragung

Empfänger (Ausgangsspannung $10mV/^{\circ}C$)

Frequenz/Spannungs Wandler, Multiplexer
Kanalaufteilung, Anzeige, PC Interface

Messung des Statorwiderstandes

Der Motor wird kurzzeitig vom Netz getrennt und die Statorwicklung mit einer Widerstandsmessbrücke verbunden. Es wird der zeitliche Verlauf des Widerstandes gemessen und durch Extrapolation erhält man den temperaturabhängigen Widerstand der Statorwicklung. Nachdem der Strangwiderstand gemessen wurde wird der Motor wieder ans Netz geschaltet. Dieser Vorgang wird nach einer angemessenen Zeitdauer wiederholt.

5 Erfassung der Motorbelastung

Grundsätzliches:

- Die Energiekosten eines Antriebssystems werden nach der elektrischen Wirkleistungsaufnahme berechnet, die deshalb genau gemessen werden sollte.
- Ein Mass für die Effizienz der elektromechanischen Energiewandlung ist der Wirkungsgrad, den man entweder direkt oder über die rechnerische Berücksichtigung der Einzelverluste ermittelt.
- Mechanische Beanspruchungen wie Lagerkräfte und Vibrationen, die durch die Ansteuerung oder das dynamische Lastverhalten bedingt sind, verkürzen die Lebensdauer von Antriebsmotoren.
- Um das thermische Speichervermögen von Antriebsmotoren besser zu nutzen, werden Temperaturen gemessen. Dabei muss für die Erhöhung des Wirkungsgrades ein Verlust an Lebensdauer in Kauf genommen werden.

Zwei-Wattmeter Leistungsmessung

Betrachtet man ein Drehstrom-Dreileitersystem als Stromversorgung mit zwei Leitern und einen gemeinsamen Rückleiter, so reichen zwei Wattmeter aus um den Zeitwert der gesamten Drehstrom-Wirkleistung anzuzeigen (Aronschialtung). Bei symmetrischer Last gilt das Zeiger-Diagramm des **Bildes 5.1**. Das trifft auch für unsymmetrische Belastung zu. Dabei können P_1 und P_2 auch negative Werte annehmen.

$$P_1 = UI \cos(\varphi + 30^\circ) \quad P_2 = UI \cos(\varphi - 30^\circ)$$

$$P_1 + P_2 = P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

Zusätzlich lässt sich aus der Differenz der beiden Wattmeter-Anzeigen die Blindleistung und damit der Phasenwinkel ermitteln.

$$Q = \sqrt{3}(P_2 - P_1)$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} = \sqrt{3} \frac{P_2 - P_1}{P_1 + P_2}$$

5.1 Elektrische Beanspruchung

Die Wirkleistungsaufnahme elektrischer Antriebssysteme muss besonders genau gemessen werden, weil danach nicht nur die Energiekosten bemessen werden, sondern weil sie auch zu den Garantiedaten elektrischer Maschinen gehört, wonach sich wiederum die elektrischen Verluste und der Wirkungsgrad richten.

5.1.1 Leistungsmessung

In einem Drehstromsystem mit beliebiger Belastung der drei Phasen ist die gesamte Wirkleistungsaufnahme gleich der Summe der in jeder Phase umgesetzten Wirkleistung. Deshalb ist eine Leistungsmessung grundsätzlich mit drei Leistungsmessern möglich. Dabei fließt der zur Leistung gehörige Strom stets durch den Strompfad des Leistungsmessers während die zugehörige Spannung am Spannungspfad des Wattmeters liegt.

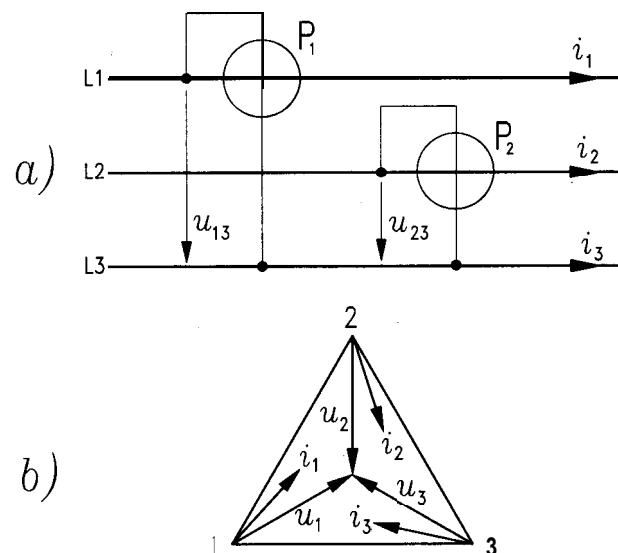


Bild 5.1: Zwei-Wattmeter Leistungsmessung

Bei veränderlichem Phasenwinkel φ aber konstanter Scheinleistung $S = \sqrt{3} UI$ kann darüberhinaus bei symmetrischer Last die Energierichtung eindeutig bestimmt werden.

Moderne Leistungsmessgeräte

Breitbandige Leistungs-Analyse-Geräte werden als Einphasen- und Dreiphasen Spannungs-, Strom- und Leistungsmesser angeboten [14], [15]. Optimale Messgenauigkeit über einen grossen Frequenzbereich (1Hz...500kHz), auch bei extremen Kurvenformen, wird durch abtastende Messverfahren und digitale Berechnung der gewünschten Grössen aus den Strom- und Spannungs-Momentanwerten sichergestellt. Zur Minimierung der Winkelfehler und zur Gleichtaktunterdrückung über den gesamten Frequenzbereich erfolgt die Strommessung über Breitband-Shunts mit programmierbaren Shunt-Faktoren.

Aus Abtastwerten (bis 12 Kanäle) können

- Spitzen-, Mittel-, Effektiv- u. Gleichrichtwert
- Wirk-, Blind- und Scheinleistung, Leistungsfaktor, Phasenwinkel
- Wirk-, Blind- und Scheinwiderstand
- Effektiv- und Gleichrichtwerte verketteter Spannungen (mehrere Kanäle)
- Zeit-Messwertsummierung (Wh, Ah, etc.)
- (+, -, *, /) Verknüpfungen beliebiger Grössen

berechnet werden, die nach entsprechender Mittelwertbildung über optische Anzeigen oder Drucker ausgegeben werden können. Häufig werden weitere Optionen wie

- Effektivwerte der verketteten Spannungen im Drehstromnetz und der Grundwellenanteile von Strom, Spannung und Wirkleistung in den drei Phasen
- Klirrfaktoren von Spannungen und Strömen
- Oberwellenanalyse bis zur 50. Harmonischen
- Leistungskorrektur für kornorientierte Bleche

angeboten. Leistungsfähige Geräte verfügen heute über grafikfähige Benutzeroberflächen und sind deshalb mittels Bildschirm-Menüsteuerung einfach zu bedienen. Der vielfältige Einsatz ist durch Analog/Digital- Ausgänge, eingebaute Drucker- und Datenspeicher-Module und anderen komfortablen Ein- und Ausgabehilfen gewährleistet.

5.1.2 Wirkungsgradbestimmung

In der elektrischen Antriebstechnik versteht man unter dem Wirkungsgrad das Verhältnis der nutzbaren, abgegebenen Leistung P_{ab} zur insgesamt zugeführten Leistung P_{zu} gemäss $\eta = P_{ab}/P_{zu}$. Die verschiedenen Verfahren den Wirkungsgrad zu bestimmen, können dabei grundsätzlich den zwei nachfolgenden Gruppen zugeordnet werden.

1. Direkte Wirkungsgradbestimmung

Bei diesem Verfahren wird der Wirkungsgrad η von Antriebsmotoren aus der gemessenen, abgegebenen mechanischen Leistung P_{ab} und der gemessenen zugeführten elektrischen Leistung P_{zu} direkt bestimmt. Die Messgrössen zur Ermittlung der mechanischen Leistung sind dabei das Drehmoment M und die Drehzahl n und auf der Seite des speisenden Netzes, die zugeführte elektrische Gesamtleistung P_{zu} . Bei der Bestimmung der Messgrössen für die elektrische Spannung, Strom, Leistung, Drehzahl und Drehmoment liegen die Messfehler meist zwischen 0.2% 0.5% wobei sich der totale Messfehler aus der Summe der Einzelfehler ergibt. Damit kann die Genauigkeit des Verfahrens auf höchstens 1% abgeschätzt werden. Die Methode der direkten Wirkungsgradbestimmung wird meist bei kleinen Maschinen mit erwartungsgemäss schlechtem Wirkungsgrad eingesetzt.

2. Indirekte Wirkungsgradbestimmung

Bei der indirekten Wirkungsgradbestimmung ist die rechnerische Ermittlung der Einzelverluste von besonderer Bedeutung. Die Einzelverluste werden unterschieden in

- **Leerlaufverluste** P_{Le}
 - Eisenverluste (Ummagnetisierung, Wirbelströme)
 - Reibung (Lager- und Luftreibung)
- **Erregerverluste** P_{Er}
 - Stromwärmeverluste der Erregerwicklung
- **Lastverluste** P_{La}
 - Stromwärmeverluste durch Lastströme
- **Zusatzverluste** P_{Zu}
 - Strom- oder spannungsabhängige Verluste durch Maschinenkonstruktionsteile

Bei der Ermittlung dieser Verluste geht man davon aus, dass im Leerlauf ausser den meist sehr geringen Stromwärmeverlusten durch den Leerlaufstrom keine Lastverluste vorliegen. Dagegen sind im Kurzschlussversuch nur die Last- und die Zusatzverluste zu berücksichtigen. Der Wirkungsgrad kann somit gemäss der Zusammenhänge

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{ab} + (P_{Le} + P_{Er} + P_{La} + P_{Zu})}$$

oder

$$\eta = \frac{P_{zu} - (P_{Le} + P_{Er} + P_{La} + P_{Zu})}{P_{zu}}$$

rechnerisch bestimmt werden. Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist wesentlich höher als bei den direkten Verfahren, da die Unsicherheit und Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Verluste nur als Sekundär-Fehler, in Erscheinung tritt.

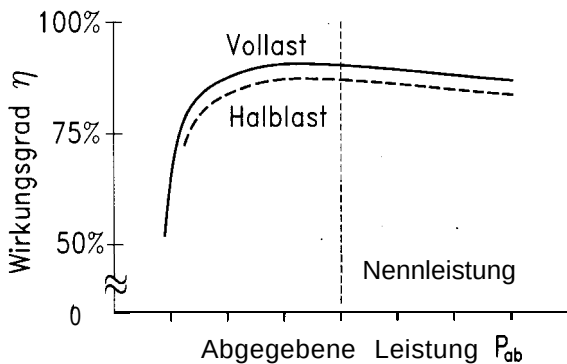


Bild 5.2: Wirkungsgrad-Kennlinie

Wie im **Bild 5.2** gezeigt, werden die zu den einzelnen Lastpunkten ermittelten Wirkungsgrade normalerweise über der abgegebenen Leistung dargestellt.

5.1.3 Oberschwingungsanalyse

Für die Oberschwingungsanalyse umrichter gespeister Antriebssysteme stehen heute Messgeräte und umfangreiche Software von verschiedenen Firmen zur Verfügung [16] welche Spannungen und/oder Ströme verarbeiten.

Als Beispiel einer Oberwellenanalyse werden hier Test-Ergebnisse [17] für einen umrichterbetriebenen Asynchronmotor angegeben der über einen

3 /450kVA Netz-Transformator betrieben wird und dessen Oberschwingungsverhalten bei Nennlast mit und ohne Netzdrossel untersucht wurde. **Bild 5.3** zeigt die Ergebnisse im Vergleich zu den nach SEV Norm 3600 vorgegebenen Werten.

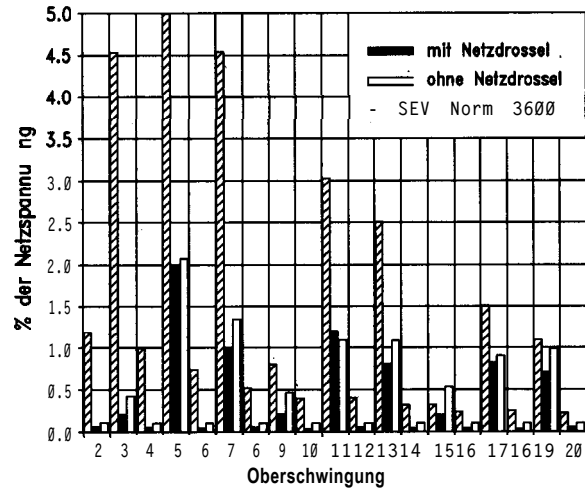


Bild 5.3: Netztrafo Oberschwingungsanalyse

Die Testergebnisse zeigen, dass für diese Anwendung bei genügend grosser Scheinleistung des Netztransformators, die nach Norm zulässigen Höchstwerte der Oberschwingungs-Spannungen [18] massiv unterschritten werden.

Eine Netzdrossel ist immer dann notwendig, wenn das Verhältniss Netzscheinleistung zu Scheinleistung des Frequenzumrichters kleiner als 1:10 ist. Es ist jedoch empfehlenswert immer eine Netzdrossel einzusetzen um die Zwischenkreiskondensatoren vor schnellen Änderungen der Netzspannung zu schützen.

5.2 Mechanische Beanspruchung

Auf die Lebensdauer elektrischer Maschinen wirken sich besonders die nachfolgend aufgeführten Betriebs- und Umgebungsbedingungen aus

- Belastungsspiele, Schalzhäufigkeit
- Drehzahländerungen, Reversiervorgänge
- Wellenbelastung (axial und radial)
- Thermische Überlastung, Temperaturspiele
- Verschmutzung, Feuchtigkeit, Erschütterung

die hauptsächlich die folgenden mechanischen Beanspruchungen bewirken:

Lagerbeanspruchung

Die weitaus meisten Ausfälle elektrischer Maschinen sind auf Lagerschäden zurückzuführen. Für einen gesicherten Betrieb ist deshalb eine Lagerschadenfrüherkennung wünschenswert.

Vibrationen und Geräusche

Im Zuge von Umweltschutzmassnahmen kommt der Lärmkontrolle eine immer bedeutendere Rolle zu. Lärmschutzmassnahmen werden gefordert, um Antriebsanwender vor all zu hohen Lärmemissionen zu schützen. Für Maschinenhersteller bedeutet das, die Lärmquellen ihrer Antriebsmaschinen zu identifizieren und geeignete Massnahmen zu ergreifen, diese zu eliminieren. Die für Maschinenlärm

verantwortlichen Vibrationen können zu einem Grossteil reduziert werden wenn verhindert wird, dass die während des Betriebes produzierten Kräfte nicht zu Resonanzeffekten führen. Die Laufeigenschaft und die damit verbundene Geräuschentwicklung verschlechtert sich drastisch, wenn eine Maschinen-Eigenfrequenz mit der erregenden Frequenz nahezu übereinstimmt. Für Maschinenhersteller ist deshalb die genaue Kenntnis der in Antriebsmaschinen wirkenden Kräfte und das mögliche Resonanzverhalten von sehr grosser Bedeutung. Die Übersicht des **Bildes 5.4** zeigt typische Lärmquellen elektrischer Maschinen und deren Entstehungsursache [19].

Schlechtes Auswuchten des Rotors, magnetische Unsymmetrien oder auch schnelle Lastwechsel können zu unerwünschten Vibrationen und damit zu einem gestörten Laufverhalten einer Antriebsmaschine führen. Die objektive Anzeige von Schwingungen kann mit Vibrographen oder Tastschwingungsschreibern erfolgen.

Kategorie	Ventilation			elektromagnetisch	mechanisch
	Breitband	Sirene	Heulen		
Wie der Lärm entsteht?	rotierende Motorteile in Luft Luftwirbel nicht-periodische Änderung des Luftdruckes	Relativbewegung zwischen rotierenden und stationären Motorteilen periodische Änderung des Luftdruckes	Resonanzanregung in Hohlräumen periodische Änderung des Luftdruckes	durch Eisen bedingte magnetische Fluss-Pulsationen	Rotor nicht ausgewuchte Lagergeräusche
Lärmart	Geräusch	reine Töne	reine Töne	reine Töne	reine Töne
Frequenz		drehzahlabhängig	drehzahlabhängig	Nutzfrequenz Netzfrequenz Drehzahl	drehzahlabhängig

Bild 5.4: Entstehung von Maschinengeräuschen

5.3 Thermische Beanspruchung

Thermische Überbeanspruchung von Antriebsmotoren wird meist durch rechtzeitiges Abschalten vermieden bevor kritische Motorbauteile, wie zum Beispiel die Statorwicklung, unzulässig hohe Temperaturen erreichen. Die vorgegebenen Grenztemperaturen sind für verschiedene Motorkomponenten unterschiedlich hoch und liegen je nach Isolationsklasse in der Regel zwischen 100°C und 200°C.

Für den Normalbetrieb ist die kurzzeitige Überlastung der Isolation durch schnelle Erwärmungsvorgänge, wie zum Beispiel während des Anlaufes von Asynchronmotoren, von Bedeutung. Innerhalb gewisser Grenzen erlauben Motorhersteller solche **Übertemperaturen** die jedoch auf Kosten der Wicklungs-Lebensdauer gehen. Diesem Aspekt sollte bei der Projektierung von Antrieben die gleiche Priorität zukommen wie zum Beispiel Auslegungskriterien im Zusammenhang mit der Bestimmung der Nennlast.

Ob jedoch das durch den Maschinentyp vorgegebene thermische Speichervermögen, besonders bei den höheren Betriebsarten, voll ausgenutzt wird bleibt heute in der Praxis meist nur einer Abschätzung, bestenfalls einer groben Überschlagsrechnung vorbehalten. Die optimale Ausnutzung des vorhandenen Wärmespeichervermögens von Antriebsmaschinen bis zu den erlaubten thermischen Grenzwerten führt zu einer besseren Maschinen-Ausnutzung und unter Umständen zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades, was durch die Anwendung geeigneter thermischer Modelle simuliert werden kann. Dafür ist eine auf Messresultate gestützte Identifizierung relevanter Modellparameter vorzunehmen.

5.3.1 Thermische Ersatzbilder

Eine elektrische Maschine hat mehrere Wärmequellen. Deren Wärmeströme können sich auf verschiedene Wege aufteilen und dabei auch noch gekoppelt sein, wodurch ein vermaschtes Wärmequellen-Netz entsteht. Je mehr Stützstellen ein Wärmequellen-Netz aufweist, umso höher ist der Aufwand diese zunächst unbekannten Knoten-Temperaturen zu berechnen. Für die meisten An-

wendungsfälle genügt ein Zwei-Körpermodell (Stator, Rotor). Bessere Simulationsergebnisse liefert ein Drei-Körper Modell (Stator, Statorwicklung, Rotor) mit dem bereits ein gute Übereinstimmung von simulierten und gemessenen Temperaturverläufen, auch für die höheren Betriebsarten, erzielt werden kann.

Wärmewiderstände

Die Berechnung der Erwärmung elektrischer Maschinen erfolgt in Analogie zum elektrischen Strömungsfeld und wird meist für die Nennleistung P_N der elektrischen Maschine durchgeführt. Entsprechend der Definition des ohmschen Widerstandes im elektrischen Strömungsfeld kann man einen thermischen Widerstand

$$R_{th} = \frac{\text{Temperaturdifferenz}}{\text{Verlustleistung}} = \Delta\vartheta / P_v$$

definieren. Bei Wärmeleitung innerhalb eines Querschnittes Q der Länge l und der Wärmeleitfähigkeit ρ_{th} berechnet sich der thermische Widerstand zu

$$R_{th} = \frac{l}{Q\rho_{th}}$$

Für die Wärmeabgabe über eine Oberfläche O kann der thermische Widerstand

$$R_{th} = \frac{1}{O\alpha_{th}}$$

mit der Wärmeübergangszahl $\alpha_{th}[W/(m^2K)]$ angegeben werden.

Wärmekapazitäten

Die elektrischen Verluste P_v und somit die Wärmequellen entstehen in der Maschine räumlich verteilt und unterliegen je nach Betriebszustand einer dynamischen Änderung. Die in den verschiedenen Motorkomponenten gespeicherte Wärmeenergie ist den jeweiligen Wärmekapazitäten

$$C_{th} = \frac{\text{Wärmemenge}}{\text{Temperaturdifferenz}} = \frac{Q}{\Delta\vartheta}$$

und der Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ proportional. Die nach aussen abgeführte Wärmemenge ist eine Funktion der Wärmeabgabefähigkeit λ und der

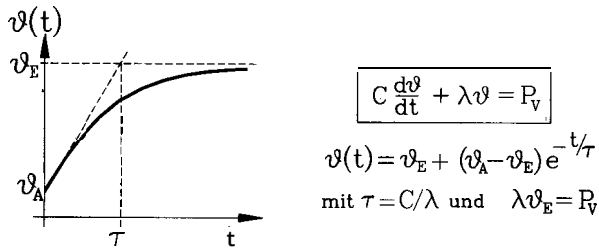


Bild 5.5: Temperatursimulation

Temperatur ϑ des Körpers, so dass nach dem Energiesatz der Zusammenhang des Bildes 5.5 hergestellt werden kann. Die Zeitkonstante eines Motors τ , die durch seine Wärmekapazität und Wärmeabgabefähigkeit bedingt ist, hängt von der Konstruktion und den Kühlungsverhältnissen ab.

5.3.2 Identifizierung thermischer Parameter

Eine Methode der thermischen Parameteridentifizierung soll hier an einem bewusst einfach gewählten Modell erläutert werden. Zum Beispiel kann dem Rotor einer Asynchronmaschine das thermische Modell des Bildes 5.6, bestehend aus einem Wärmeleitwert λ_R und einer Wärmekapazität C_R , zugeordnet werden.

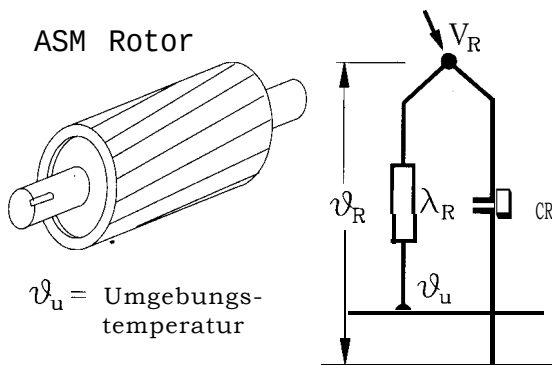


Bild 5.6: Thermisches Rotormodell

Mit den im Rotor erzeugten elektrischen Verlusten V_R kann damit, bei Betrachtung der über ein Zeitintervall $t_1 \leq t \leq t_2$ integrierten thermischen Vorgänge, die Beziehung

$$C [\vartheta(t_2) - \vartheta(t_1)] + \lambda \int_{t_1}^{t_2} \vartheta dt = \int_{t_1}^{t_2} V_R dt$$

abgeleitet werden, in der die Integrale messbare Größen darstellen. Die unbekannten Parameter

λ_R und C_R können bei einer dynamischen Rechnung, durch Anwendung dieser Betrachtung, aus zwei verschiedenen Zeitintervallen bestimmt werden. Die andere Möglichkeit der statischen Rechnung geht von der Annahme $d\vartheta/dt = 0$ aus.

Das im Bild 5.7 gezeigte reduzierte Wärmequellenetz, ein sogenanntes Dreikörper-Temperatur-Simulationsmodell [20], garantiert bei richtiger Wahl der Modellparameter Temperaturverläufe, die innerhalb sehr hoher Genauigkeitsanforderungen liegen.

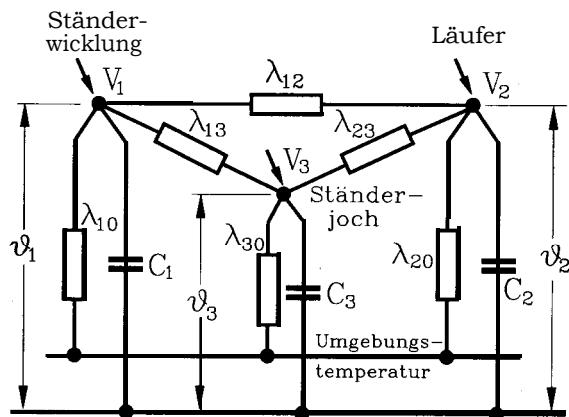


Bild 5.7: Dreikörper-Temperaturmodell

Generell muss das für die Simulation der Asynchronmaschine verwendete elektrische Ersatzschaltbild Bild 5.8 die in Wärme umgesetzten Verlustleistungen der am Netz betriebenen Maschine dem Temperaturmodell des Bildes 5.7 möglichst genau als Eingangsgrößen zur Verfügung stellen.

Für die Berechnung der Verlustleistungen werden zunächst die benötigten Größen Hauptfeldspannung U_h und Läuferstrom I'_2 bestimmt. Aus dem elektrischen ASM-Ersatzbild können dann die Stromwärmeverluste der Ständerwicklung P_{V1} und der Läuferwicklung P_{V2} sowie die Ummagnetisierungsverluste für das Hauptfeld ermittelt werden.

Die Verlustleistungen werden mit Hilfe der Beziehungen

$$P_{V1} = R_1(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)$$

$$U_h = \text{Spannung die das Hauptfeld erzeugt}$$

$$P_{V3} = 3 U_h I_{Fe}(U_h^2) - k_{2U} U_h^2$$

$$I_{Fe}(U_h^2) = \text{Abhängigkeit der Eisenverluste}$$

$$P_{V2} = s(P_1 - P_{V1} - P_{V3})$$

$$k_{2U} = \text{Zusatzverluste durch Flusspulsation}$$

berechnet, wobei P_1 der an den Klemmen eingespeiste Leistung entspricht. Danach werden diese aufgrund der Zusammenhänge

$$V_1 = P_{V1}$$

$$V_2 = P_{V2} + k_{2U} U_h^2$$

$$V_3 = 3U_h I_{Fe} + k_{3I} I_1^2 - k_{2U} U_h^2$$

mit k_{3I} = Faktor für stromabhängige Zusatzverluste

dem Differentialgleichungssystem des Temperatur-Simulationsmodelles $[\lambda] \cdot [\vartheta] = [V]$ mit

$$\begin{bmatrix} \lambda_1^* & -\lambda_{12} & -\lambda_{13} & -\lambda_{10} \\ -\lambda_{20} & \lambda_2^* & -\lambda_{23} & -\lambda_{20} \\ -\lambda_{13} & -\lambda_{23} & \lambda_3^* & -\lambda_{30} \end{bmatrix} : \begin{bmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vartheta_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_U \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \lambda_1^* &= \lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + C_1 \frac{d}{dt} \\ \text{und } \lambda_2^* &= \lambda_{20} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + C_2 \frac{d}{dt} \\ \lambda_3^* &= \lambda_{30} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + C_3 \frac{d}{dt} \end{aligned}$$

zur Berechnung der Maschinentemperaturen ϑ_1, ϑ_2 und ϑ_3 zugeführt.

Als Beispiel werden gemessene und die mit dem Dreikörper-Modell berechneten Temperaturwerte eines 10kW Induktionsmotors gegenübergestellt. Die fast identischen Temperaturverläufe des **Bildes 5.9** beweisen die hohe Güte des verwendeten Modelles für die praktische Berechnung von Motortemperaturen.

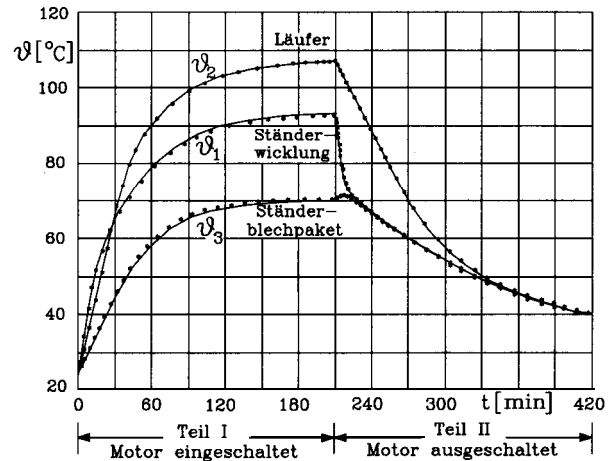


Bild 5.9: Gemessene (.....) und berechnete (—) Temperaturverläufe

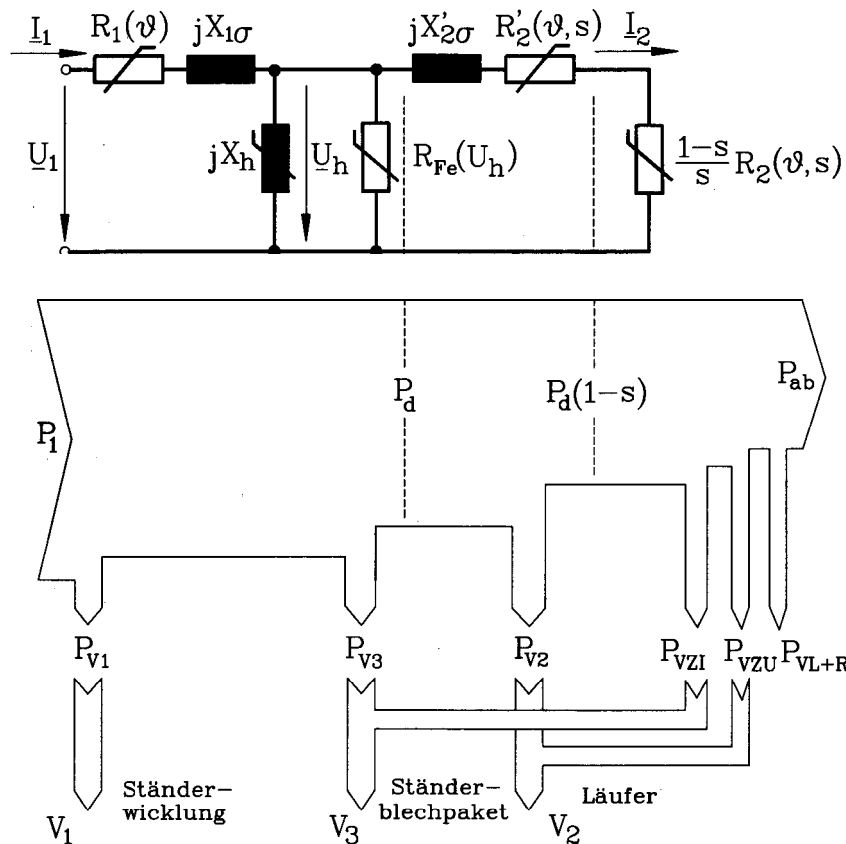


Bild 5.8: Verlustleistungs-Simulationsmodell

6 Modellgestützte Messtechnik

Grundsätzliches:

- In den Konstruktionsprozess von Antriebssystemen werden immer mehr Ergebnisse der modellgestützten Messtechnik einbezogen.
- Die Parameteridentifikation von Antriebsmodellen dient der Vorausberechnung des dynamischen Verhaltens und der Bestimmung der durch Messung weniger leicht zugänglichen Kenngrößen.
- Betriebsprobleme und Motorfehler werden mit einem lernenden Diagnosesystem zuverlässig erkannt. Dabei steigt die Fähigkeit der Schadensfrüherkennung proportional mit der Erweiterung der System Knowledge-base an.

Die Einbindung der Antriebssimulation [21], [22] in den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess hängt entscheidend von der modellgestützten Antriebsmesstechnik ab und wird immer häufiger zu einer zwingenden Voraussetzung bei der Antriebsplanung. **Bild 6.1** zeigt das generelle Vorgehen bei der Antriebsrealisierung. Dabei werden sowohl die an definierten Orten durchgeführten Messungen als auch Antriebs-Erfahrungswerte berücksichtigt. So lassen sich z.B. bereits in der Planungs- und Konzeptphase mit Hilfe der Antriebssimulation relativ präzise Angaben über die zeitabhängigen Vorgänge machen.

Mit dem Problem, wie man aus leicht messbaren Größen wie Betriebsstrom oder Klemmenspannung eines Antriebsaggregates zusätzliche Informationen, z.B. über mechanische Systemparameter

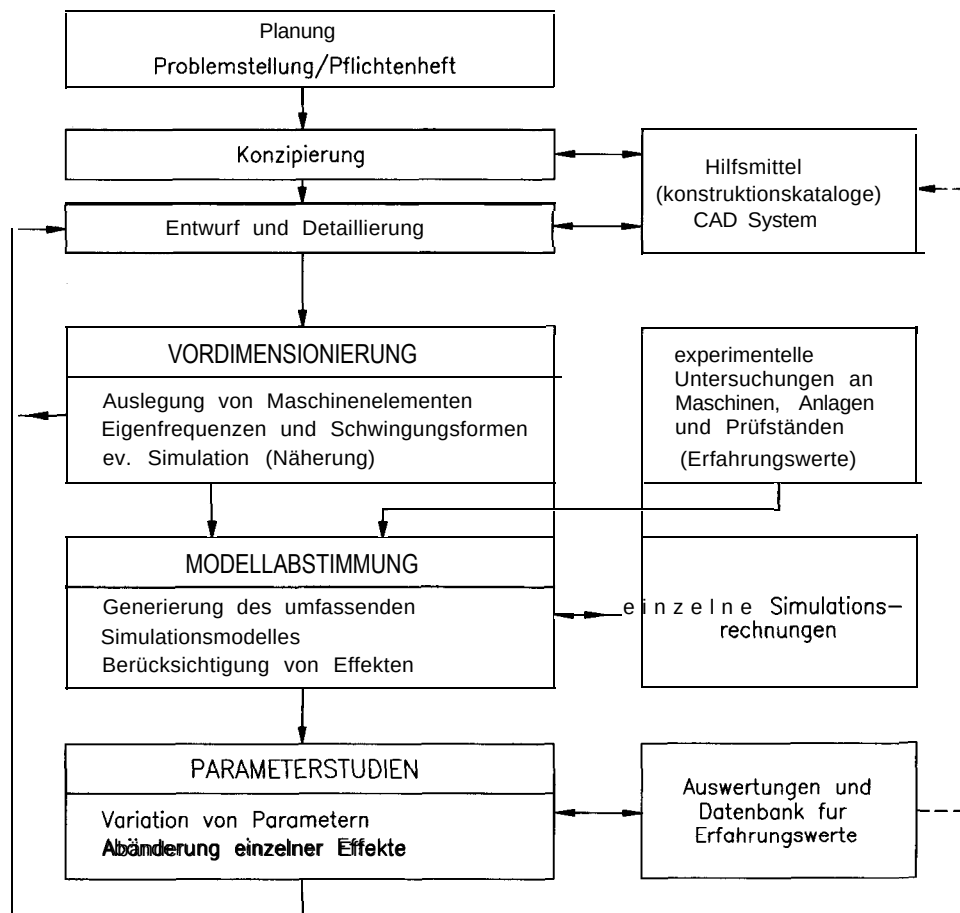


Bild 6.1: Antriebsentwicklungsprozess

gewinnen kann, befasste man sich schon vor etwa zehn Jahren. Das erstrebenswerte Ziel war die Realisierung eines kostengünstigen Prüf- oder Diagnose-Systems für elektrische Antriebe, z.B. zur Sicherung der Qualität von Kleinmotoren am Ende eines Massen-Fertigungsvorganges. Dabei hoffte man, auf herkömmliche Hilfsmittel wie Belastungsmaschine, Drehzahl- und Drehmoment-Messeinrichtung verzichten zu können. Prüfsysteme dieser Art sind heute schon realisiert, nicht zuletzt wegen erhöhter Rechnerleistungen und der vielfältigen Möglichkeiten moderner Techniken in der Datenverarbeitung.

Die Lösung dieses Messproblems wurde unter Einbeziehung des Wissens über die einzelnen Antriebsmaschinen in Form von mathematischen Modellen gefunden. Der Anwendungsbereich ist jedoch noch auf Antriebe mit besonders hohem Sicherheitsrisiko oder hohen Zuverlässigkeitsforderungen beschränkt.

6.1 Parameteridentifikation

Das Verfahren der modellgestützten Parameteridentifizierung besteht darin, Koeffizienten eines geeigneten, von der Struktur des Prüflings abhängigen, mathematischen Modells so zu bestimmen, dass bei gleicher Eingangsanregung die Modellausgangsgrösse möglichst gut mit der Prüflingausgangsgrösse übereinstimmt. Diese Modellparameteranpassung ist in **Bild 6.2** verdeutlicht und basiert auf der Differenz der Ausgangsgrößen von Prüfling und Modell.

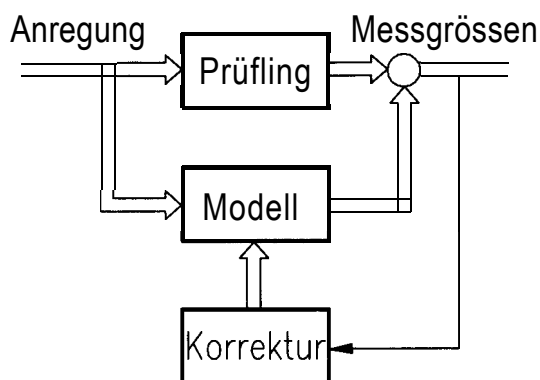


Bild 6.2: Prozessmodell-Parameteranpassung

Die Modellkoeffizienten haben dabei einen direkten Bezug auf die physikalischen Parameter des

Prüflings, wie z.B. Reibmoment, Wicklungswiderstand oder magnetischer Fluss. Das Ziel dieses Verfahrens ist es, diese durch Messung weniger leicht zugänglichen Grössen auf rechnerischem Wege zu ermitteln. Bis auf die wenigen direkt benötigten Messwerte, z.B. Strom und Spannung an den Anschlussklemmen werden die übrigen Parameter indirekt über das mathematische Modell identifiziert. Zum Beispiel lässt sich das Betriebsverhalten eines Universalmotors mit Hilfe der Gleichungen

$$u = Ri + \frac{d\Psi}{dt} + \Psi\Omega \quad \Psi i = J \frac{d\Omega}{dt} + M_r$$

und den 5 Modellparametern

R	= elektrischer Widerstand
Ψ	= magnetischer Fluss
Ω	= Winkelgeschwindigkeit
J	= Trägheitsmoment
M_r	= Reibmoment

mathematisch formulieren. Linearisiert man die nichtlineare Magnetisierungskennlinie $\Psi(i)$ im Arbeitspunkt für einen definierten Motorstrom, so können die übrigen Modellparameter aus elektrischen Messwerten identifiziert werden. Die Anpassung der Modellparameter geschieht im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate nach Gauss. Bei Beschleunigungsvorgängen stellt das Testobjekt durch seine Massenträgheit eine dynamische Last dar, so dass sämtliche im normalen Betrieb vorkommenden Betriebspunkte durchlaufen werden können.

Es existiert natürlich eine Vielzahl von Modellansätzen, die jedoch alle nur ein Ziel verfolgen, nämlich zusätzliche Informationen über die inneren Zusammenhänge eines Prozesses zu gewinnen.

6.2 Signalanalyse

Die Analyse von gemessenen Signalen dient dem Zweck, Merkmale zu gewinnen, mit denen sich Prüflingeigenschaften beschreiben lassen [23]. Besonders kritische Motorfehler, wie Wicklungsschlüsse, erhöhte Reibungsverluste, Bürstenfeuer, Vibrationen, Geräusche oder unzureichende Drehmomentproduktion sollen dabei zuverlässig erkannt werden. Auf Körperschallsignale angewendet sollen damit z.B. die mechanischen Fehler lokalisiert

werden die zu einem charakteristischen Schwingverhalten führen. Die Analyse des Stromsignales gibt zum Beispiel Hinweise auf elektrische Fehler, wie das Kommutierungsverhalten einer Gleichstrommaschine. Wie im **Kapitel 4.3** gezeigt, kann mit hoher Genauigkeit aus dem gemessenen Stromsignal auch die Motordrehzahl ermittelt werden.

6.3 Geräuschanalyse

Konventionelle Motorprüfstände verfügen oft nicht über ein System zur Geräuschemessung. Bei Bedarf wird dann meist nur mit einer Pegelmesseinrichtung gearbeitet. Oftmals jedoch ist der Umgebungslärm dabei so hoch, dass eine Prüfung besondere Massnahmen erfordert, wie z.B. schalltote Kammern. Für den Anwender ist es jedoch weniger interessant welche störenden Geräusche ein Prüfling auf einem Prüfstand produziert, sondern vielmehr welche Geräusche er im eingebauten Zustand (z.B. als Lüfter) erzeugt.

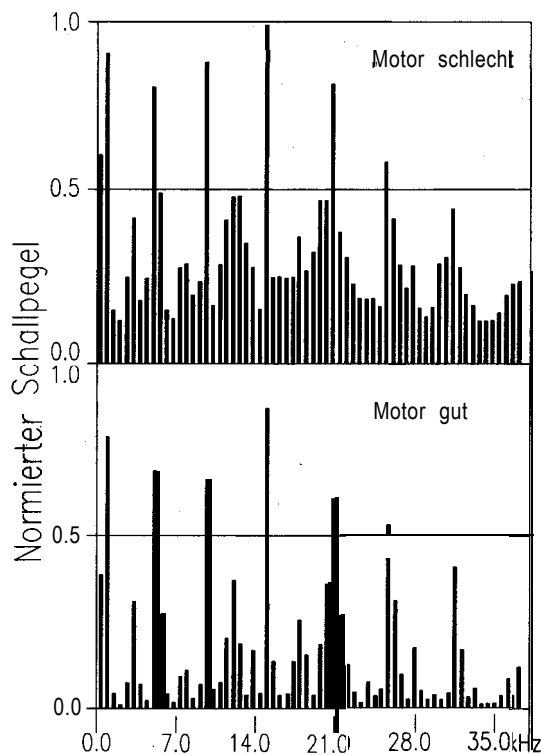


Bild 6.3: Motor Körperschallsignale

Das Geräuschbild des Prüflings wird mit zuvor gemessenen Fehlerbildern verglichen und beurteilt. **Bild 6.3** zeigt Körperschallsignale eines guten Motors und eines Motors mit 'Kommutator-Rattern'.

Mit speziellen, nichtlinearen Filtern für die Amplitudenmodulation wird die Tonmodulation stark hervorgehoben, so dass die Fehlererkennung besonders einfach wird.

6.4 Lernendes Diagnose-System

Bei der Qualitätsprüfung von Elektromotoren werden elektrische und akustische Signale des laufenden Motors analysiert. Dabei ermittelt das System im Falle eines schadhafte Motors

- die **Fehlerart**,
- den **Fehlerort** und
- die **Fehlerursache**

womit das Prüfsystem zu einer kompletten Diagnose-Einrichtung [24] wird. Es wird ein Vergleich mit vorher durchgeführten Trainingsmessungen geeigneter Referenzmotoren unternommen. Zur Lösung dieser Aufgabe eignen sich klassische Mustererkennungsverfahren, insbesondere die statistische und die geometrische Klassifikation.

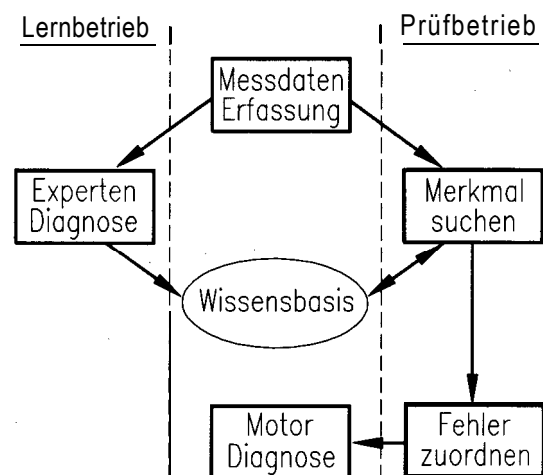


Bild 6.4: Lernendes Motor Diagnose-System

Die statistische Klassifikation nutzt die Verteilungsdichte der Referenzklassen, um ein vorliegendes Muster der Klasse mit grösster Wahrscheinlichkeit zuzuordnen. Die geometrische Klassifikation beruht auf einem Vergleich der geometrischen Anordnung von Merkmalsmustern im sogenannten Merkmalsraum. Neuerdings werden auch neuronale Netze zur Lösung dieser Mustererkennungsaufgaben angewendet.

7 Einsatzprobleme stromrichter gespeister Antriebe

Grundsätzliches:

- Der ständig wachsende Einsatz von Frequenzumrichtern verlangt die genaue Kenntnis der verschiedenen Umrichterschaltungen, deren Anwendungsmöglichkeiten und Einflüsse auf die Motoren und das speisende Netz.
- Der stromrichter gespeiste Asynchronmotor wird durch zusätzliche Schaltbeanspruchungen belastet. Dabei treten frequenzabhängige Zusatzverluste und drehzahlabhängige Geräusche auf.
- Zusätzliche Verluste und Netzbelastungen können durch den gezielten Einsatz von Filtern und Saugkreisen reduziert werden.

Durch die Möglichkeit, die Drehzahlen und die Antriebsmomente den Belastungsänderungen anpassen und Schwankungen der Netzspannung ausgleichen zu können, wird eine hohe Qualität des Prozesses erreicht.

Antreiben und Bremsen bei wechselnden Drehrichtungen, d.h. Vierquadrantenbetrieb, ermöglicht eine effiziente Ausnutzung der Energie und die Rückführung der in den rotierenden Massen gespeicherten Energie beim Bremsen ins elektrische Netz.

Grundsätzlich können Motoren in Gruppen oder einzeln gespeist werden. Bei der Einzelspeisung ist es möglich, mit Hilfe der Stromrichtertechnik den exakten Gleichlauf bezüglich der Drehzahl und der Winkellage zwischen verschiedenen Antrieben zu erreichen.

Die Besonderheiten drehzahlveränderbarer Antriebe stellen aber auch sehr vielfältige Anforderungen an die Antriebstechnik:

Die Belastung und Beanspruchung des Motors durch den Stromrichter muss minimiert werden. Der Stromrichter darf nicht zu Drehmomentpulsationen und zu einer Vergrößerung des Motorgeräusches führen. Die Belastung des Netzes durch die Blindleistung und durch die Oberschwingungen des Stromrichters muss möglichst klein sein. Stromrichterspeisungen müssen eine hohe elektromagnetische Verträglichkeit aufweisen, damit sie sich nicht gegenseitig stören oder andere elektronische Einrichtungen beeinflussen.

Im folgenden wird der Begriff "Stromrichter" als Überbegriff für die Gleich-, Wechsel- und Umrichtung verwendet. Gleichrichter erzeugen aus Wechselspannungen eine Gleichspannung. Wechselrichter wandeln eine Gleichspannung in Wechselspannungen um. Umrichter setzen ein Wechselspannungssystem mit einer Frequenz f_1 und einer Phasenzahl m_1 in ein Wechselspannungssystem mit einer Frequenz f_2 und einer Phasenzahl m_2 um. Gleich- oder Wechselstromsteller verändern nur die Ausgangsspannung.

7.1 Anwendungsbereiche stromrichter gespeister Antriebe

Drehzahlveränderbare, stromrichter gespeiste Antriebe [25], [26] werden heute in allen Bereichen der Industrie, in der Kraftwerkstechnik und in Transport- und Verkehrssystemen eingesetzt. Der Leistungsbereich geht dabei von einigen mW bei Uhren bis zu einigen 10 MW bei Pumpen und Kompressoren. Der Drehzahlbereich erstreckt sich von einigen Umdrehungen bei Walzwerk-Hauptantrieben bis zu einigen $100'000 \text{ min}^{-1}$ bei Ultrazentrifugen.

Bei einer direkten Speisung des Motors aus dem Drehstromnetz ist nur eine stufige Anpassung der Drehzahl an den Arbeitsprozess möglich.

Ein drehzahlveränderbarer Antrieb erlaubt eine optimale Anpassung der Antriebsdrehzahlen an die Erfordernisse der Arbeitsmaschine. So können Produkte wirtschaftlich erzeugt werden, wie z.B. bei der Zerspanung in Werkzeugmaschinen. Der Antriebsprozess kann energiesparend betrieben werden, wie z.B. bei der Anpassung der Drehzahl einer Pumpe oder eines Ventilators an die Bedürfnisse des Prozesses, Getriebe zwischen Antrieb und Arbeitsmaschine können entfallen.

7.2 Elemente und Schaltungen der Stromrichterantriebstechnik

Elektrische Maschinen für Stromrichterantriebe

Für drehzahlveränderbare Antriebe werden Gleichstrom-, Drehfeld- und Reluktanz-Maschinen eingesetzt. Im einzelnen:

- Fremderregte Gleichstrommaschinen mit Leistungen bis zu 2000 kW,
- Dauermagneterregte Gleichstrommaschinen mit Leistungen bis zu 100 kW,
- Drehstrom-Asynchronmaschinen mit Käfigläufern mit Leistungen bis zu 20 MW,
- Drehstrom-Asynchronmaschinen mit Schleifringläufern mit Leistungen bis zu 12 MW,
- Drehstrom-Synchronmaschinen mit Erregung über externe Stromrichter oder rotierende Gleichrichter mit Leistungen bis zu 80 MW,
- Dauermagneterregte Drehstrom-Synchronmaschinen von Leistungen bis zu 100 kW, mit Rotorlagegeber: *Elektronikmotoren, Brushless-DC-Motoren*
- Drehstrom-Synchronmaschinen mit Reluktanzrotoren und Anlaufkäfigen mit Leistungen bis zu 10 kW,
- Reluktanzmaschinen, mit und ohne Dauermagneterregung, mit Leistungen bis zu 1 kW, ohne Rotorlagegeber: *Schrittmotoren*, mit Rotorlagegeber: *Switched-Reluctance -Motoren, Magnetmotoren*.

Damit lassen sich im Prinzip alle Aufgaben der Antriebstechnik lösen. Dabei stellt sich aber bei der Stromrichterspeisung gegenüber dem Betrieb an einem Gleich- oder Drehstromnetz mit konstanten, idealen Spannungs- und Stromverhältnissen, ein verändertes Betriebsverhalten ein.

Betriebsverhalten, Regelung

Beim Betrieb der Maschinen mit Stromrichterspeisung [27] ist zu unterscheiden zwischen dem *gestellten* und dem *geregelten* Betrieb.

Im *gestellten Betrieb* zeigt der Antrieb sein inhärentes Verhalten, welches bei den Gleichstrom-

und Asynchronmaschinen als Nebenschlussverhalten gekennzeichnet wird. Dabei geht die Drehzahl bei einer Belastung abhängig von der Steigung der Drehmoment-Drehzahlkennlinie zurück. Das Kippmoment wird durch die Spannungs- / Frequenzverhältnisse, bzw. durch die Begrenzung des Maschinenstromes bestimmt (vgl. **Bild 7.1**).

Im *geregelten Betrieb* wird dagegen die Drehzahl durch die Regelung in einem grossen Bereich konstant gehalten bzw. den Sollwerten angepasst, die Strombelastung, bzw. das Drehmoment des Motors wird überwacht, so dass der Motor auch beim Hochfahren nicht überlastet werden kann.

Für den *Schutz* des Antriebs ist eine Strom- und Spannungserfassung erforderlich. Die *Regelung* benötigt, abhängig von der Aufgabenstellung eine Drehzahl- und Lagemessung. Nur der Elektronikmotor, die vektorgeregelte Asynchronmaschine und der Reluktanzmotor haben eine eingebaute Rotorlageerfassung zur lagegerechten Einprägung der Statorströme durch den Stromrichter.

Der *Drehzahlbereich* eines Antriebs wird im Falle der Gleichstrommaschine durch die maximale Spannung und im Falle der Drehfeldmaschinen durch die maximale Frequenz festgelegt.

Durch *Feldschwächung*, d.h. durch eine Verminderung des magnetischen Flusses in der Maschine, welche bei der Gleichstrommaschine durch eine Verminderung des Erregerstromes und bei den Drehfeldmaschinen durch eine Vergrösserung der Speisefrequenz bei konstanter Maschinenspannung hervorgerufen wird, kann der Drehzahlbereich grundsätzlich erweitert werden. Bei Feldschwächung bleibt die Leistung der *Gleichstrommaschine* konstant, wenn der Ankerstrom und die Ankerspannung konstant gehalten werden. Das Drehmoment nimmt dann umgekehrt proportional zur Drehzahl ab.

Dagegen muss bei den *Drehfeldmaschinen* wegen der quadratischen Abhängigkeit des Drehmomentes vom magnetischen Fluss bei Feldschwächung mit einem überproportionalen Abfall des Drehmomentes gerechnet werden.

Bei Gleichstrommaschinen kann daher ein Feldschwächbereich von 1:10 bei den Drehfeldmaschinen nur ein Bereich 1:3 realisiert werden, wenn

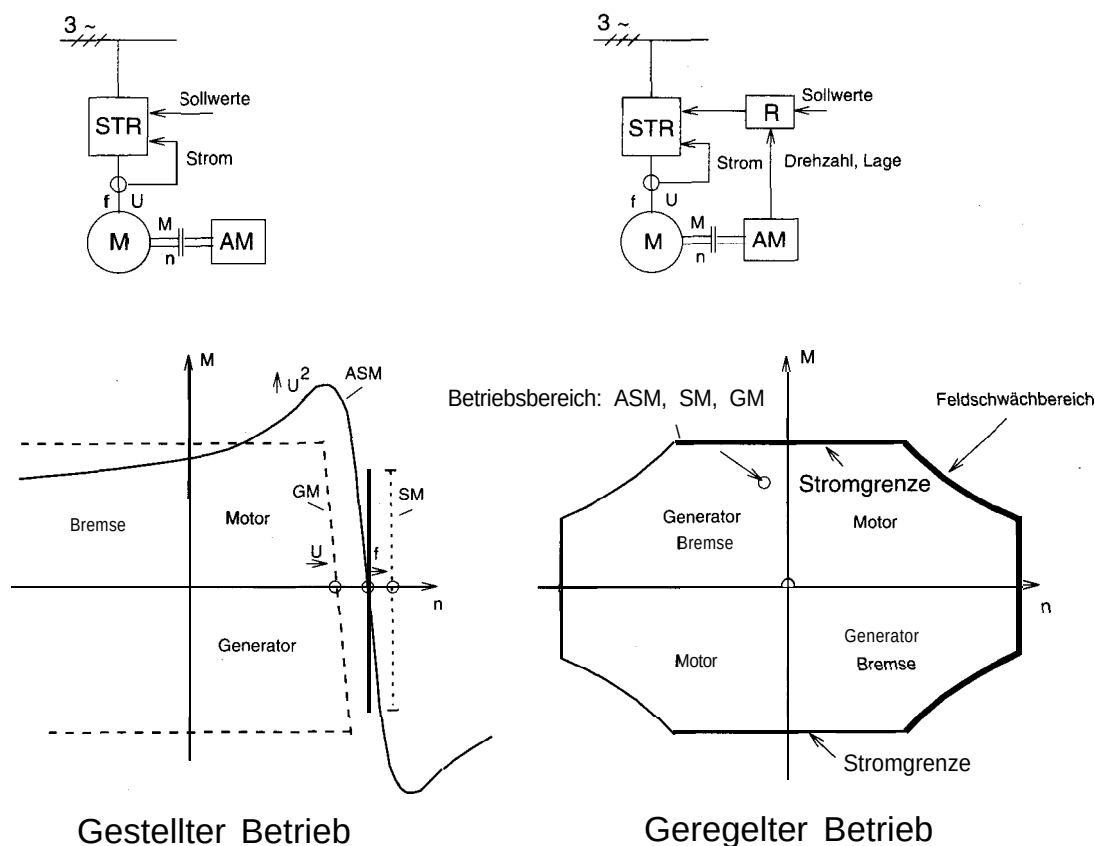


Bild 7.1: Drehmoment-Drehzahlverhältnisse im gestellten und im geregelten Betrieb

nicht besonders streuarne Drehfeldmaschinen eingesetzt werden. Bei einer Dauermagneterregung ist der Fluss grundsätzlich vorgegeben und nur in einem sehr eingeschränkten Bereich zu vermindern.

Sowohl im gestellten als auch im geregelten Betrieb muss zwischen der *Spannungs-* und der *Stromeinprägung*, bzw. -begrenzung unterschieden werden.

Bei der *Spannungseinprägung* werden Speisespannung und Frequenz vom Umrichter proportional vorgegeben (U/f – Regelung). Der magnetische Fluss ist in diesem Fall annähernd konstant, wobei bei kleinen Frequenzen noch der ohmsche Spannungsabfall an der Statorwicklung zu kompensieren ist. Die Maschinen zeigen dann unterhalb ihrer Stromgrenze ihr "natürliches" Verhalten.

Bei der *Stromeinprägung* wird dieses 'natürliche' Verhalten aufgehoben. Gibt man den Speisestrom und die Speisefrequenz vor, so stellt sich der Fluss und die Speisespannung abhängig vom Belastungszustand ein. Damit in diesem Fall die Maschine flussmässig nicht überlastet wird, muss zusätzlich durch eine Vorgabe des Winkels der Magneti-

sierungsstrom eingeprägt werden (feldorientierte Regelung).

Leistung, Ausnützung, Grenzen

Die *Leistungsfähigkeit* einer elektrischen Maschine wird begrenzt durch:

- Die elektrische Beanspruchung (Spannung, Strom, Frequenz, bzw. Induktion B , Strombelag A , Wicklungsfaktor ξ), welche sich durch eine Ausnutzungsziffer C (Drehmoment / Volumeneinheit):

$$C = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \xi A \hat{B}_\delta \eta \cos \varphi$$

bzw. durch den Drehschub f_S (Kraft / Oberfläche):

$$f_S = 2C$$

ausdrücken lässt.

Übliche Werte für die Ausnutzungsziffer C sind:

- $2 \div 7 \text{ kW min/m}^3$ für Gleichstromasch.,
- $1 \div 4 \text{ kW min/m}^3$ für Asynchronmaschinen,
- $3 \div 8 \text{ kW min/m}^3$ für Synchronmaschinen.

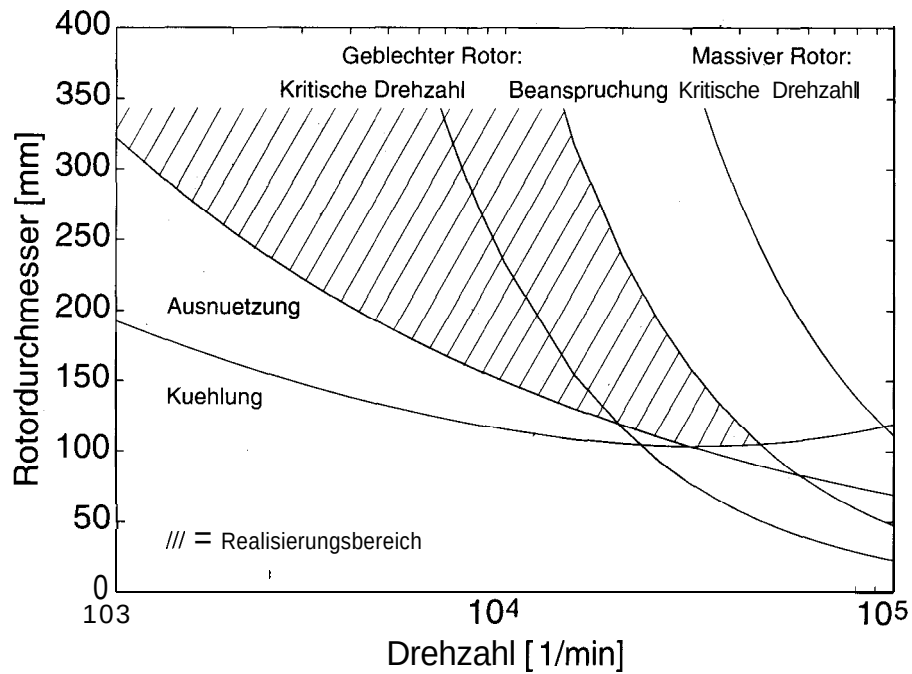
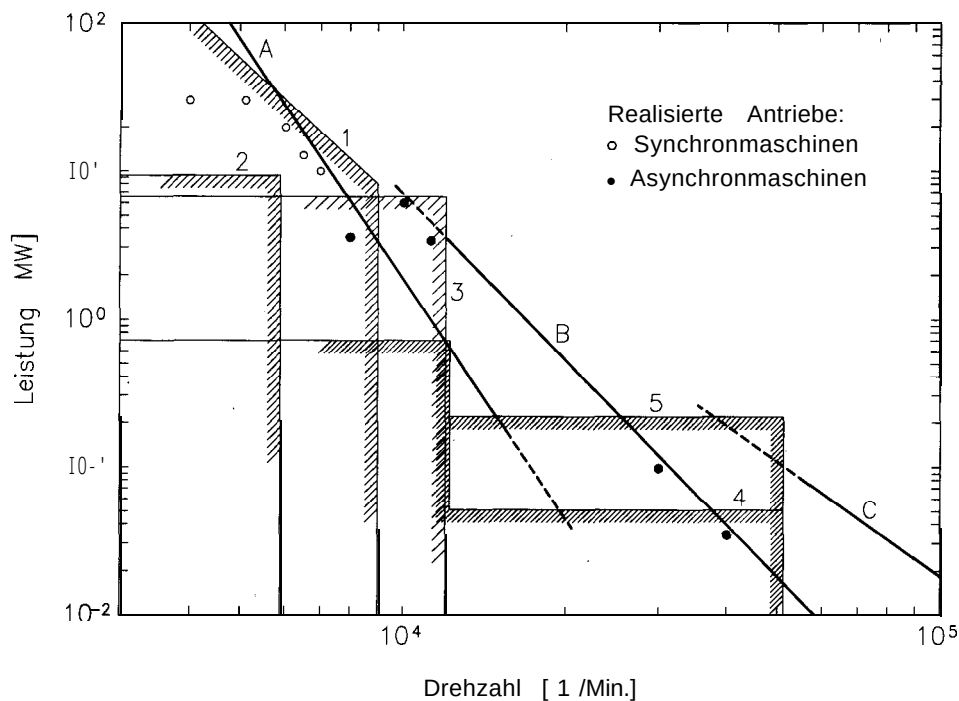


Bild 7.2: Grenzkurven für 100 kW - Asynchronmaschinen



- | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| A) SM | 1) Netzkommutierter I-Umrichter |
| B) ASM, speziellere Bauarten | 2) Zwangskommutierter I-Umrichter |
| C) ASM, RM, HPM (Massivrotoren) | 3) GTO-Thyristor-U-Umrichter |
| | 4) Transistor-U-Umrichter |
| | 5) Parallele Transistor-U-Umrichter |

Bild 7.3: Leistungs-Drehzahlgrenzen schnelllaufender Antriebe

- Die mechanische Beanspruchung des Rotors durch die Zentrifugalkräfte.
- Die kritischen Drehzahlen des Rotors, welche von der Konstruktion des Rotors und der Steifigkeit der Lager abhängen.
- Die Rotorverluste, welche durch die betriebsfrequenten Felder und deren Oberschwingungen verursacht werden.
- Die Rotorkühlungsbedingungen.
- Die Begrenzung des Ankerstromes durch die Kommutierung bei Gleichstrommaschinen.

Diese Beschränkungen sind vor allem bei den Grenzleistungsmaschinen voll wirksam, insbesondere dann, wenn Antriebe mit sehr grossen Drehzahlen realisiert werden müssen. Das **Bild 7.2** zeigt den Realisierungsbereich einer schnelllaufenden, 100 kW-Drehstrom-Asynchronmaschine, welche in ihrer Drehzahl bei ca. $40'000 \text{ min}^{-1}$ durch die obengenannten Bedingungen begrenzt ist.

Das **Bild 7.3** zeigt im Überblick den Realisierungsbereich verschiedener elektrischer Maschinen, zusammen mit den Leistungsgrenzen verschiedener Stromrichterlösungen (vgl. auch die **Tabelle 8.1** auf Seite 54).

7.3 Stromrichter

Für drehzahlveränderbare Gleich- und Drehstromantriebe stehen heute Stromrichter mit sehr unterschiedlichen Schaltungen und Eigenschaften zur Verfügung (**vgl. Bild 7.4**).

Stromrichter für Gleichstromantriebe

Zur Speisung werden netzgeführte Thyristorstromrichter oder selbstgeführte Transistor-Gleichstromsteller eingesetzt.

Netzgeführte Thyristorstromrichter bestehen, abhängig von den Betriebserfordernissen, aus halb- oder vollgesteuerten Brückenschaltungen für den Einquadrantenbetrieb oder aus vollgesteuerten, gegenparallelgeschalteten Brückenschaltungen für den Mehrquadrantenbetrieb.

Für die Auswahl einer geeigneten Schaltung sind die Anforderungen an die Energiewandlung (Ein- oder Mehrquadrantenbetrieb), die Belastbarkeit des speisenden Netzes und bei Antrieben mit Drehmomentrichtungswechsel, die maximale zulässige Dauer der drehmomentfreien Pause massgebend. Einphasige Speisung werden nur bei kleinen Leis-

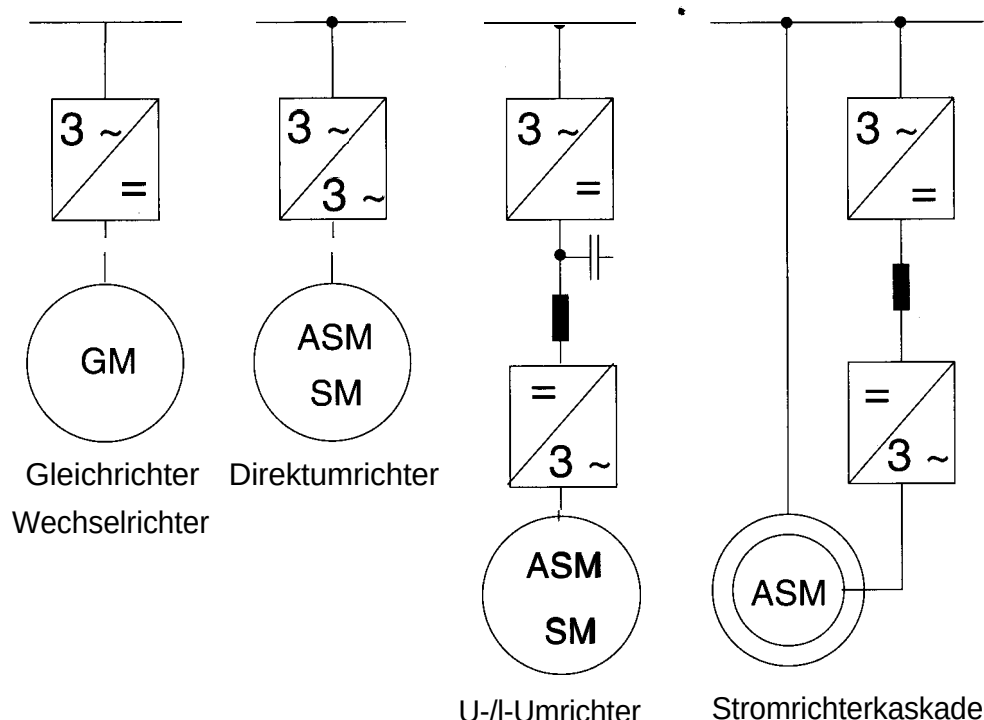


Bild 7.4: Stromrichter Hauptgruppen

tungen benutzt. Bei höheren Leistungen werden 6- oder 12-pulsige Brückenschaltungen verwendet.

Bei den *selbstgeführten Transistor-Gleichstromstellern* wird die Gleichstrommaschine aus einer gesteuerten H-Brücke gespeist, welche wiederum an einem Gleichstromzwischenkreis angeschlossen ist. Die Taktfrequenz beträgt einige kHz, so dass eine sehr schnelle Steuerung und Regelung realisiert werden kann. Der Gleichstromzwischenkreis, dessen Spannung mit einem Stützkondensator geglättet wird, wird im einfachsten Fall (Einquadrantenbetrieb) von einem ungesteuerten Gleichrichter aus dem Netz gespeist. Für Mehrquadrantenbetrieb muss der netzseitige Umrichter auch als Wechselrichter betrieben werden können, wegen der Energie-Netzurückspeisung.

Netzgeführte Gleich- oder Wechselrichter werden für einfache Antriebe und für grosse Leistungen eingesetzt. Gleichstromsteller kommen in Industrieantrieben und Fahrzeugen zum Einsatz.

Stromrichter für Drehfeldmaschinen

1. Drehstromsteller

Beim Drehstromsteller wird die Statorspannung über antiparallele Thyristoren durch Anschnittsteuerung beeinflusst (verzögert eingeschaltet) (vgl. **Bild 7.5**). Dadurch ergibt sich eine quadratisch von der Spannung abhängige Absenkung der Drehmoment-Drehzahlkennlinie. Die Drehzahl des Antriebs kann bei einer festen Speisefrequenz

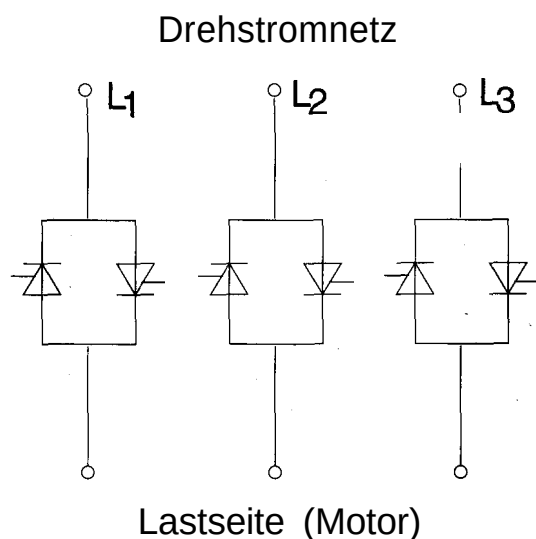


Bild 7.5: Drehstromsteller

in gewissen Grenzen geregelt werden, wenn der Verlauf der Drehmomentkennlinie der Arbeitsmaschine stark von der Drehzahl abhängig ist oder wenn durch eine Vergrößerung des Rotorwiderstandes (Schlupfmotoren) die erforderlichen Voraussetzungen vorhanden sind. Da wegen der dabei auftretenden Vergrößerung des Schlupfes im Läuferkreis erhebliche Verluste auftreten können, eignet sich diese Speisung vorzugsweise für den Anlauf- oder Aussetzbetrieb und für überdimensionierte Motoren kleiner Leistung. ($\leq 10 \text{ kW}$).

In neuerer Zeit wird der Drehstromsteller auch als sogenannter 'Energy-Saver' eingesetzt. Dabei wird abhängig von der Belastung des Motors die Statorspannung abgesenkt, so dass die Maschinenverluste kleiner werden. Dabei können allerdings Instabilitäten auftreten. Die Praxis zeigt, dass nicht jeder Asynchronmotor dafür geeignet ist.

2. Direktumrichter

Beim Direktumrichter wird das Primärnetz über Drehstromsteller direkt auf den Antrieb geschaltet. Die gewünschte Spannung und Frequenz auf der Motorseite wird aus den netzseitigen Spannungen zusammengesetzt (vgl. **Bild 7.6**). Dadurch ist die maximale Frequenz auf ca. 45 % der Frequenz des speisenden Netzes begrenzt. Bezüglich der Steuerung unterscheidet man Hüllkurvenumrichter und Phasenanschnittsteuerung.

Mit Direktumrichtern können ohne weiteren Aufwand Vierquadrantenantriebe realisiert werden. Sie sind allerdings wegen der hohen Anzahl der Ventile (für ein 3-phasiges Sekundärnetz sind insgesamt mindestens 36 Ventile erforderlich), nur für grössere Leistungen wirtschaftlich. Der Netzstrom des Direktumrichters enthält neben dem Grundschwungsanteil auch Oberschwingungsströme.

Direktumrichter sind besonders für die Speisung hochpoliger, langsamlaufender Drehfeldmaschinen grösserer Leistung mit kleinen Drehzahlen geeignet. Die Drehmomentwelligkeit ist gering, infolge der annähernd sinusförmigen Speisespannung.

3. Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis

Beim Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis wird der Motor über einen Stromrichter aus einer Gleichstrom- oder Spannungsquelle gespeist, wel-

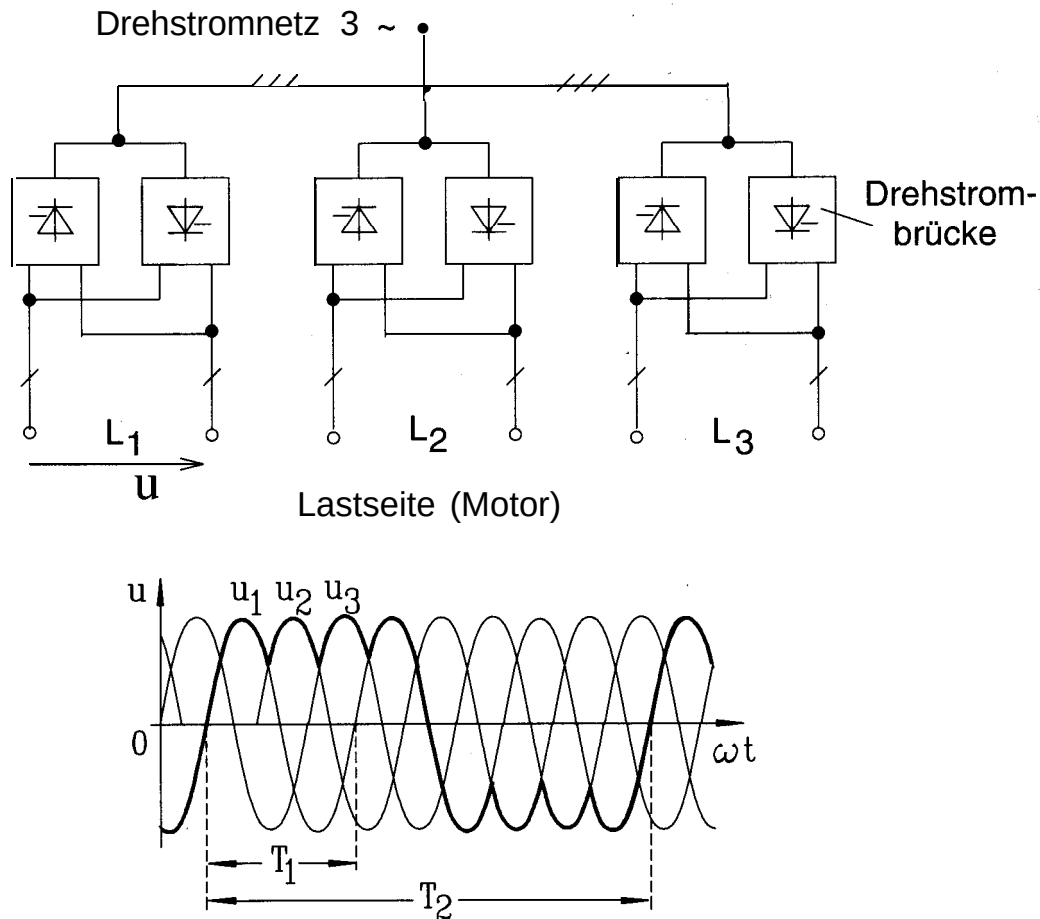


Bild 7.6: Direktumrichter, u = Ausgangsspannung Phase L_1 , $T_1 = 1/f_1$, $T_2 = 1/f_2$, $\omega = 2\pi f_1$

che über einen netzseitigen Stromrichter versorgt wird. Im Motorbetrieb arbeitet der netzseitige Stromrichter als Gleichrichter und der maschinenseitige Stromrichter als Wechselrichter. Zwischenkreisumrichter werden sehr häufig eingesetzt, da sie eine Entkopplung der Motorspeisung von der Netzspeisung und damit ein beliebiges Frequenzverhältnis ermöglichen. Im Vierquadrantenbetrieb muss der netzseitige Stromrichter auch als Wechselrichter arbeiten können.

4. I-Umrichter

Beim I-Umrichter (vgl. Bilder 7.7 und 7.8) wird der Strom im Zwischenkreis durch eine Induktivität mehr oder weniger konstant gehalten. Die Grösse dieses Stromes wird durch den netzseitigen Stromrichter eingestellt. Der maschinenseitige Stromrichter verteilt diesen Zwischenkreisstrom durch die Steuerung der Ventile auf die einzelnen Stränge der Maschine, so dass sich das erforderliche Drehmoment ergibt.

Der I-Umrichter hat die folgenden *Merkmale*:

- Die Motor-Speisefrequenz ist unabhängig von der Netzfrequenz.
- Der netzseitige Stromrichter kann netz- oder selbstgeführt kommutieren.
- Der motorseitige Stromrichter kann last- oder selbstgeführt kommutieren.
- Durch die Aussteuerung des netzseitigen Stromrichters in den Wechselrichterbetrieb ist eine Umkehr der Zwischenkreisspannung möglich, so dass bei fester Stromrichtung ein Zweiquadrantenbetrieb gefahren werden kann.
- Wegen des eingprägten Motorstromes eignet sich die Schaltung nicht für den Parallelbetrieb mehrerer Motoren.

Vorteile des I-Umrichters:

- Der maschinenseitige Stromrichter kommutiert netzgeführt, wenn als Motor eine Synchronmaschine verwendet wird.

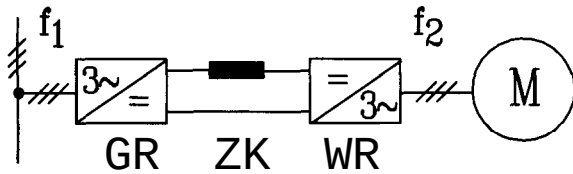


Bild 7.7: Prinzipdarstellung I-Umrichter

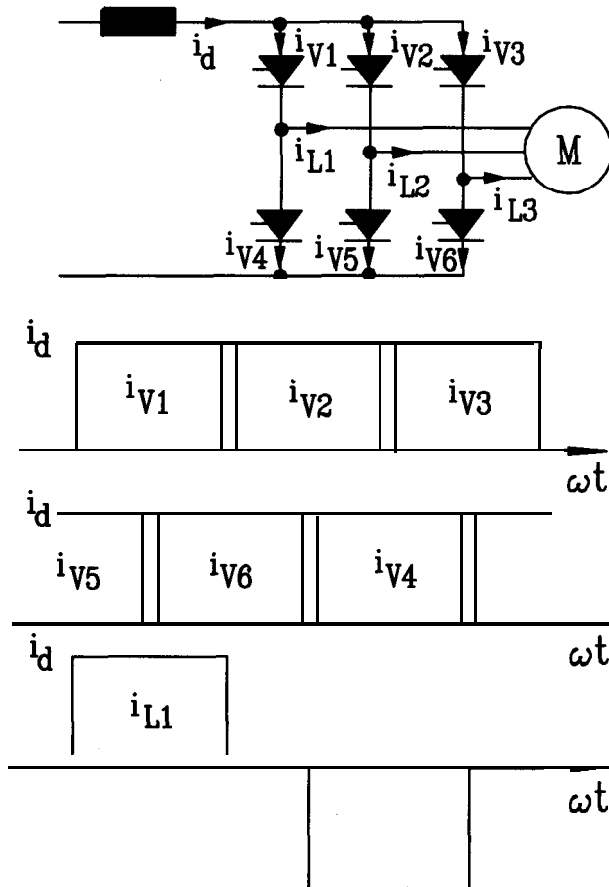


Bild 7.8: Stromrichter mit eingprägtem Zwischenkreisstrom

- Bei Überlast oder Fehlern auf der Motorseite wird die Beanspruchung auf den Zwischenkreisstrom begrenzt.

Nachteile des I-Umrichters:

- Die Motorspannung enthält Schaltspannungen, welche die Wicklungsisolation beanspruchen.
- In Drehfeldmaschinen mit Kurzschluss- oder Dämpferwicklungen im Rotor treten hohe Zusatzverluste auf, wenn die Motorspannung nicht durch eine lastseitige Filterung (LC-Glied) geglättet wird.
- Für die Regelung ist eine Drehzahlmessung erforderlich.

- Der I-Umrichter ist der Betriebscharakteristik des Motors anzupassen. Die Streureaktanz des Motors muss möglichst klein sein damit die Spannungsbeanspruchung der Wicklung begrenzt bleibt.

5. U-Umrichter

Dieser besteht, wie das **Bild 7.9** zeigt, aus einem netzseitigen Gleichrichter, einem lastseitigen Wechselrichter und einem Gleichspannungs-Zwischenkreis mit einem Stützkondensator, welcher dem Wechselrichter eine möglichst konstante Spannung zur Verfügung stellt. Die Kommutierung des Wechselrichters kann maschinengeführt erfolgen, wenn eine übererregte Synchronmaschine gespeist wird. Bei der Speisung einer Asynchronmaschine muss die Kommutierung zwangsweise erfolgen.

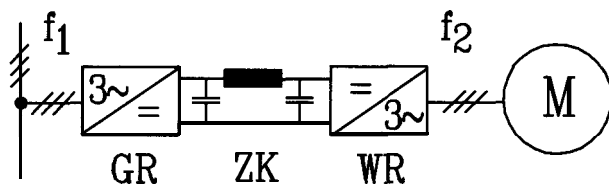


Bild 7.9: Prinzipdarstellung U-Umrichter

Bezüglich der Ansteuerung des Wechselrichters unterscheidet man:

- Vollblockaussteuerung (vgl. **Bild 7.10**)
- Pulsbreitenmodulierte Aussteuerung (vgl. **Bild 7.11**)

Bei der *Vollblockaussteuerung* sind die Zündimpulse um 120° phasenverschoben, die Maschinenspannung besteht aus Rechteckblöcken mit einer Breite von 120° und einer Spannungsamplitude die von der Zwischenkreisspannung bestimmt wird.

Da im Nennbetriebsbereich der magnetische Fluss im Motor, d.h. das Verhältnis U/f konstant gehalten werden soll, muss bei der Vollblockaussteuerung die Zwischenkreisspannung drehzahl- und lastabhängig über einen gesteuerten Gleichrichter eingestellt werden. Bei der Vollblockaussteuerung treten neben der Grundschwingung auch Oberschwingungen auf, von denen insbesondere die niedrigste Harmonische mit der Frequenz $6f$ Ursache für Drehmomentpendelungen des Motors sein kann. Abhilfe bringt hier die pulsbreitenmodulierte

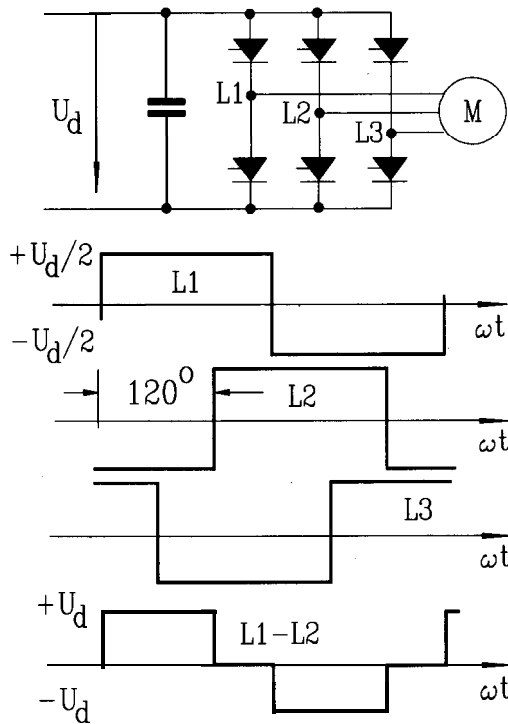


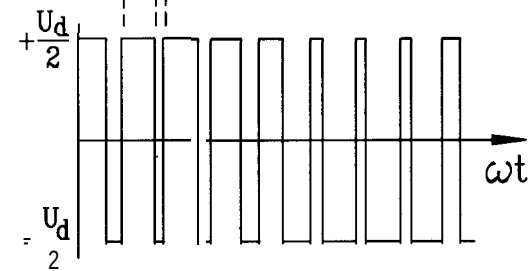
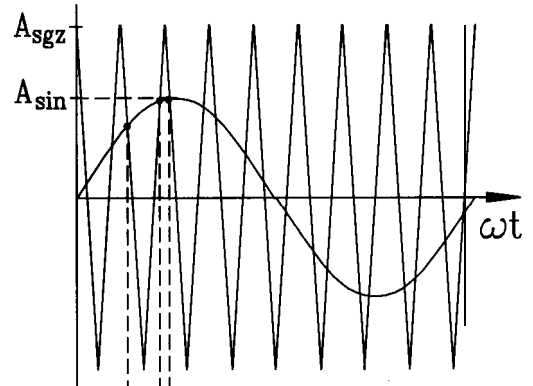
Bild 7.10: Umrichter mit eingepprägter Zwischenkreisspannung, Ausgangsspannung bei Vollblockaussteuerung

Aussteuerung. Die Vollblockaussteuerung wird nur für einfache Antriebe oder sehr schnellaufende Antriebe eingesetzt, wobei die Motorfrequenz f_2 in der Größenordnung der Umrichter-Schaltfrequenz liegt.

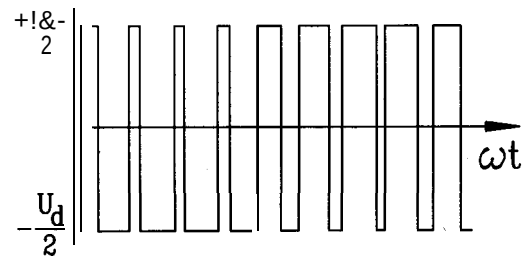
Bei der *pulsweitenmodulierten Aussteuerung* werden, wie im **Bild 7.11** dargestellt, aus der konstanten Zwischenkreisspannung Impulse veränderlicher Breite derart ausgeschnitten, dass die Grundschwingung dieser Impulsfolge, welche an der Maschinenwicklung anliegt, die gewünschte Frequenz und Amplitude aufweist und der Oberwellengehalt möglichst klein ist.

Vorteile der U-Umrichter-Speisung:

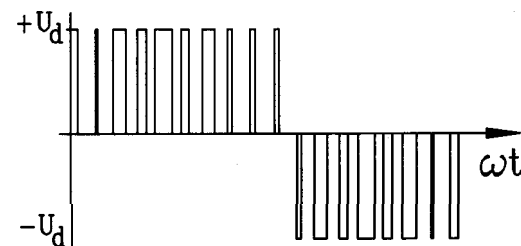
- Es können Asynchron-Normmotoren eingesetzt werden, wobei eine Reduktion der Leistung um 5-10 % zu berücksichtigen ist wegen der erhöhten Verluste im Umrichterbetrieb.
- Für die Gleichrichtung der Zwischenkreisspannung können Diodengleichrichter verwendet werden, wenn keine Energierückspeisung durchzuführen ist. Damit ergibt sich ein Grundwellenleistungsfaktor auf der Netzseite in der Größenordnung von Eins.



Potentialverlauf am Wechselrichterausgang L1



Potentialverlauf am Wechselrichterausgang L2



Aussenleiterspannung L1-L2 (Wechselrichterausgang)

Bild 7.11: Umrichter mit eingepprägter Zwischenkreisspannung, Ausgangsspannung bei pulsweitenmodulierter Aussteuerung

- Bei Antrieben mit hohen Massenträgheitsmomenten kann eine Überlastung durch ein geführtes Verhalten des U-Umrichters vermieden werden.
- Es wird kein Drehzahl- oder Rotorlagegeber benötigt.

- An einem Umrichter können mehrere Motoren gleichzeitig betrieben werden.

Nachteile der U-Umrichter-Speisung:

- Vierquadrantenbetrieb erfordert einen Umkehrstromrichter auf der Netzseite, oder als Behelfslösung für kurzzeitigen Bremsbetrieb einen gesteuerten Widerstand im Zwischenkreis. Energierücklieferung ohne eine der beiden Massnahmen führt zum Ansteigen der Zwischenkreisspannung infolge Aufladung der Glättungskondensatoren.
- An den Motorwicklungen können Schaltüberspannungen auftreten, welche zu Teilentladungen und Spannungsbeanspruchungen in den Wicklungen führen, insbesondere dann wenn der Motor über längere Kabel gespeist wird.

Stromrichtererkaskade

Die im Rotor einer Asynchronmaschine anfallende Schlupfleistung kann mittels eines Stromrichters mit Strom- oder Spannungszwischenkreis ins Drehstromnetz zurückgespeist werden, wenn die Asynchronmaschine als Schleifringläufer ausgeführt wird. Im untersynchronen Betrieb arbeitet der motorseitige Stromrichter als Gleichrichter und der netzseitige Stromrichter als netzkommutierender Wechselrichter im Falle einer Stromzwischenkreises. Es können auch pulsweitenmodulierte Stromrichter eingesetzt werden, wenn der Zwischenkreis spannungsgestützt wird. Damit können zusätzlich die Oberschwingungen minimiert und der Leistungsfaktor verbessert werden.

Vorteile der Stromrichtererkaskade :

- Schlupfleistung wird ans Netz zurückgegeben.
- Der Aufwand für die Stromrichtertechnik wird von der Schlupfleistung $P_r = s/(1-s) P$ bestimmt. Dabei sind s der Schlupf und P die abgegebene Leistung.

Nachteile der Stromrichtererkaskade :

- Das Drehmoment enthält Oberschwingungen, insbesondere die Frequenz $6 f_1$.
- Netzbelastung durch Oberschwingungen und durch die Blindleistung des Stromrichters

Dabei bestimmt die Zwischenkreis-Spannung, welche über den netzseitigen Wechselrichter eingestellt wird, die Drehzahl der Asynchronmaschine.

7.4 Systemtechnische Aspekte

Maschinenprobleme umrichtergespeister Antriebe

Eine Drehfeldmaschine setzt grundsätzlich nur die elektrische Grundswingungsleistung in mechanische Leistung um. Oberschwingungen in den Statorspannungen und -strömen oder Unsymmetrien verursachen zusätzliche Verluste im Rotor, Pendelmomente und erhöhte elektromagnetische Geräusche, insbesondere dann wenn die anregende Frequenz mit der mechanischen Resonanzfrequenz des Maschinengehäuses zusammenfällt.

Grundsätzlich führen verschiedene Wege aus diesem Konflikt heraus:

a) Drehfeldmaschinen mit Kurzschlusswicklungen im Rotor, wie z.B. die Asynchronmaschine oder die schnelllaufende Synchronmaschine mit Dämpferkäfig oder mit massivem Rotor, müssen mit einem Drehstromsystem gespeist werden, dessen Oberschwingungsgehalt möglichst klein ist. Dieses kann erreicht werden durch

- einen pulsweitenmodulierten Umrichter mit grosser Taktfrequenz ($\geq 10 \text{ kHz}$) und Stromsollwertvorgabe (U-Umrichter),
- durch eine LC-Filterung der Motorspannung (1-/U-Umrichter),
- durch eine vielsträngige Statorwicklung, z.B. 2x3-strängig, mit 30° Phasenverschiebung (I-Umrichter).

b) Drehfeldmaschinen, welche im Rotor keine Dämpferwicklungen oder massive Eisenteile enthalten, können grundsätzlich mit einem, der inneren induzierten Spannung optimal angepassten Stromsystem, gespeist werden. Man erhält so die grösste Ausnützung der Maschine und einen gleichmässigen Drehmomentverlauf. So werden z.B. dauermagneterregte Synchronmaschinen (Elektronikmotoren), welche eine rechteckig verlaufende induzierte Spannung aufweisen, auch mit entsprechend blockförmig verlaufenden Strömen gespeist.

Die Frage, ob Norm-Asynchropmotoren in jedem Fall für den Stromrichterbetrieb geeignet sind, lässt sich nicht allgemein beantworten. Im allgemeinen muss man sich mit den folgenden Problemen auseinandersetzen:

- Es können zusätzliche Rotorverluste auftreten.
- Der Geräuschpegel kann vergrößert werden (vgl. **Bild 7.12**).
- Die impulsartige Beanspruchung der Wicklung im U-Umrichter-Betrieb (vgl. **Bild 7.13**) kann zu Teilentladungen und zu einer Zerstörung der Wicklungsisolierungen im Laufe der Zeit führen. Die Schaltspannungsfestigkeit der Wicklung sollte daher mindestens $4 U_N + 4 kV$ betragen.
- Beim Betrieb mit veränderlicher Drehzahl, müssen die Kühlungsverhältnisse angepasst werden, insbesondere wenn der Motor nur mit Eigenbelüftung ausgestattet ist.

Probleme der Arbeitsmaschinen bei Stromrichterspeisung

Die mit dem Motor gekoppelte Arbeitsmaschine, wie z.B. eine Pumpe, ein Ventilator oder irgendein Antrieb, bilden ein komplexes, schwingungsfähiges, mechanisches System, welches durch die Kräfte und Drehmomente des Motors zu Torsions- und Biegeschwingungen angeregt werden kann. Diese Problemstellung kann in allgemeiner Form nur dadurch gelöst werden, dass

- die Drehmomentpulsationen des Motors möglichst kleingehalten werden,
- durch eine schwingungsdämpfende Ankupplung des Motors an die Arbeitsmaschine die Übertragung der Oberschwingungen vermieden wird,
- durch systemtechnische Untersuchungen das schwingungstechnische Verhalten des Antriebsstranges abgeklärt wird.

Netzprobleme stromrichtergespeister Antriebe

Stromrichtergespeiste Antriebe beeinflussen das Netz und die Umwelt durch:

- Eingeprägte Strom-Oberschwingungen, verursacht durch den netzseitigen Stromrichter.
- Variable, induktive Blindleistungsanteile, welche von der übertragenen Wirkleistung und dem Steuerwinkel des Stromrichters abhängen.
- Hochfrequente elektromagnetische, leitungsgebundene und sich frei ausbreitende elektromagnetische Störungen (Spannungen, Ströme,

elektromagnetische Felder), welche von den sehr schnell ablaufenden Kommutierungsvorgängen verursacht werden.

Die Rückwirkung dieser Vorgänge kann durch geeignete Filter- und Kompensationseinrichtungen, durch eine elektromagnetische Schirmung der Stromrichter, bzw. eine getrennte Führung der Zuleitungen vermindert werden.

7.5 Motor- und Kabelbelastungen durch Umrichter

Im Leistungsbereich der Stromrichterantriebe von etwa 0,1kW bis 200kW dominiert der U-Umrichter-gespeiste Asynchronmotor. Bezogen auf die Anzahl der ausgeführten Stromrichterantriebe, sind in diesem Leistungsbereich auch die häufigsten Anwendungen zu finden. Die U-Umrichter dieser Leistungsklasse sind nahezu ausschliesslich mit IGBTs (insulated gate bipolar transistor) ausgerüstet, vor allem wegen der Fähigkeit hohe Pulsfrequenzen (typisch 3kHz bis zu 20kHz) bei Schaltleistungen bis zu 500kVA zu realisieren. Diese hohen Pulsfrequenzen erlauben es,

- die Asynchronmotoren mit 100% bei etwa gleichen Wirkungsgraden wie am Sinus-Netz auszunutzen,
- das pulsfrequente, magnetisch erregte Motorgeräusch in den unempfindlichen Hörbereich des Menschen zu legen (bei einer Pulsfrequenz von typisch grösser als 8kHz ist das Motorgeräusch nahezu wie am Sinus-Netz),
- ein möglichst glattes Drehmoment zu erzeugen (typische Drehmomentwelligkeit ≤ 5 bis 8% , ausgedrückt als halber Spitze-Spitze Wert, bezogen auf das Nennmoment, gemessen bei kleiner Drehzahl, z.B. bei 20min^{-1}).

Diese hohen Pulsfrequenzen sind nur möglich, weil die IGBTs sehr schnell schalten (Anstiegszeit t_S der Spannung von 0 auf die volle Zwischenkreis-Spannung U_d typisch 100ns bis 400ns). Diese steilen Schaltflanken (grosser Spannungsanstieg du/dt) führen aber bei einer langen Verbindungsleitung zwischen Motor und Umrichter - was in der Praxis häufig der Fall ist - zu Problemen, die mit älteren Umrichtern (Anstiegszeit im μs -Bereich) nicht auftraten.

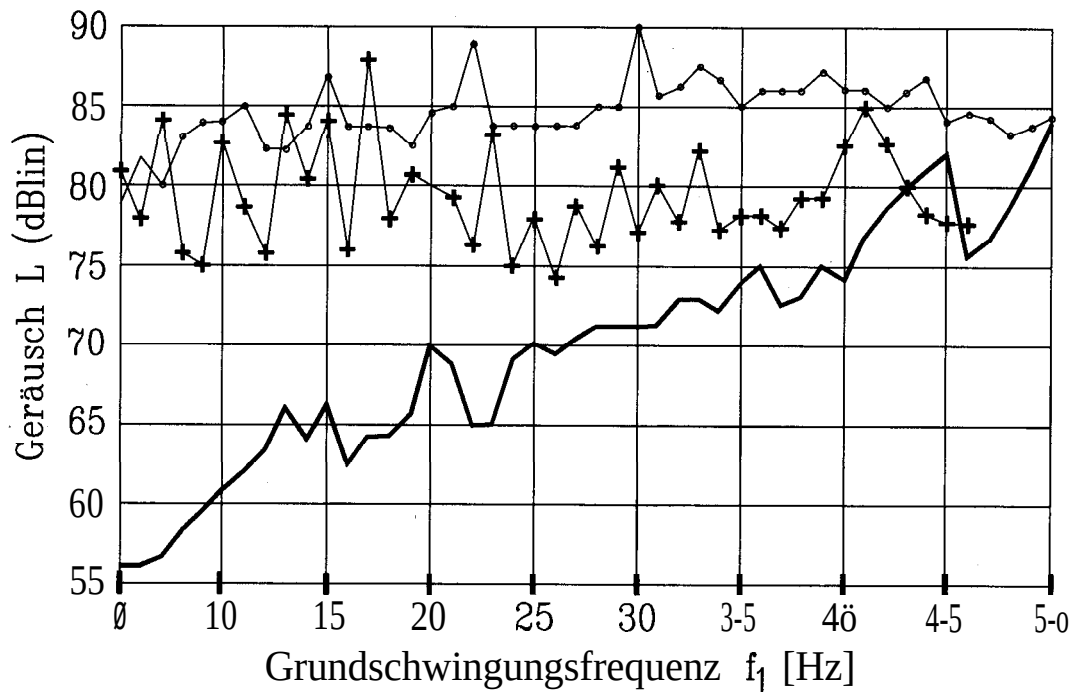


Bild 7.12: Rechenergebnisse zur Geräuschentwicklung von Asynchronmotoren bei Speisung durch:

- Sinusgenerator,
- ★ Stromzwischenkreis-Umrichter,
- Spannungszwischenkreis-Umrichter

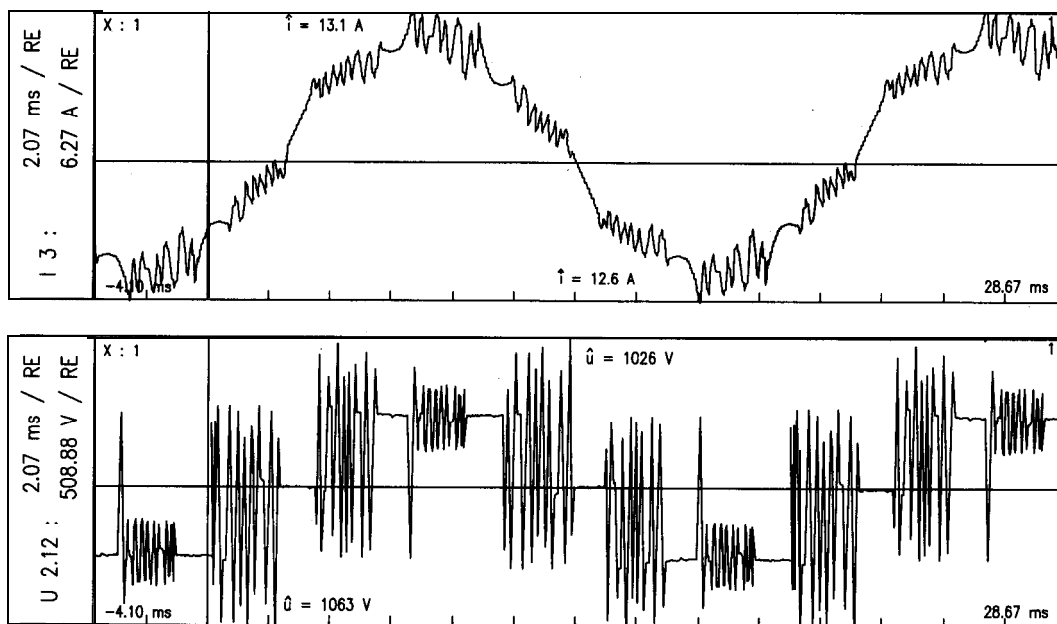


Bild 7.13: Strom- und Spannungsverläufe an den Wicklungsklemmen eines Asynchronmotors, gespeist durch einen mit IGBT-Halbleiterschaltern bestückten Pulsumrichter

Die Verbindungsleitung ist nämlich mit einem Kapazitätsbelag C'_c (typisch 150pF/m) und einem Induktivitätsbelag L'_c (typisch 0.3μH/m) behaftet. Daraus resultieren folgende typische Probleme:

Umrichterbelastung durch Leitungsladeströme

Die Leitungskapazität $C_c = C'_c l_c$ (1, = einfache Leitungslänge) wird pulsfrequent umgeladen, wobei der Ladestromimpuls i_L während der Anstiegszeit t_s gemäss $i_c = C_c(du/dt)$ 'rechnerisch abgeschätzt werden kann. **Beispiel:** Netzspannung $U_{Netz} = 400V_{eff}$, $U_d = \sqrt{2}U_{Netz} = 565V$ Zwischenkreisspannung, $t_s = 400ns$, $I_c = 100mA$, $C_c = 15nF$, $du/dt = U_d/t_s = 1.4 \cdot 10^9 V/s$, Ladestromimpuls $i_c = 21A$.

Schon diese grobe rechnerische Abschätzung zeigt, dass der Umrichter nicht nur durch den Motorstrom, sondern auch durch den Ladestrom bei einer langen Leitung erheblich belastet wird. Die Folge ist, dass die Umrichterstromgrenze erreicht wird, ohne den Motor mit Nennlast fahren zu können.

Abhilfe:

- Umrichter überdimensionieren (teuer)
- Verlustarme Drosseln am Umrichterausgang erhöhen die Spannungsanstiegszeit t_s und verringern so die Umladeströme auf unkritische Werte.
- Bei kleineren Leistungen: Vermeidung von langen Leitungen durch Kombination von Motor und Umrichter als sogenannter Kompaktantrieb (Umrichter z.B. im Klemmenkasten des Motors integriert)

Reflexionsbedingte Spannungsspitzen

Spannungsspitzen bedingt durch Leitungsreflexionen belasten das Isolationssystem des Motors zusätzlich. Die steilen Spannungsflanken und die mit ihnen verbundenen elektrischen Felder breiten sich vom Umrichter zum Motor als Wanderwellen mit der Geschwindigkeit

$$v_{ph} = \frac{1}{\sqrt{L'_c C'_c}}$$

aus (bei 150nF/m und 0.3μH/m ist $v_{ph} = 150 \cdot 10^6 m/s$, also ca. halbe Vakuumlichtgeschwindigkeit). Da der Wellenwiderstand

des Motors Z_m deutlich grösser ist als jener der Leitung Z_c , kann das Leitungsende motorseitig als "offen" betrachtet werden, so dass die Reflexionen (Reflexionsfaktor r) die Klemmenspannung am Motor U_{LLm} auf ca. den doppelten Wert der Zwischenkreisspannung erhöhen.

$$r = \frac{Z_m - Z_c}{Z_m + Z_c} \quad U_{LLm} = (1 + r)U_d$$

Beispiel: 1.1kW Norm-Asynchronmotor, Netzspannung $U_{Netz} = 400V_{eff}$, $Z_m/Z_c = 16$ (Messwert), $r = 0.88$, $U_{LLm} = 1.88U_d = 1060V$, mit $t_s = 100ns$: $du/dt = U_{LLm}/t_s = 10600V/\mu s$ (21-facher Wert des Richtwertes aus der Norm VDE0530/1, siehe unten).

In **Bild 7.14** sind schematisch die Umrichterspannung U_{LLinv} und die reflexionsbedingte Klemmenspannung U_{LLm} für unterschiedlich kurze Zeiten t_s (bezogen auf die Wellenlaufzeit $t_p = l_c/v_{ph}$) dargestellt.

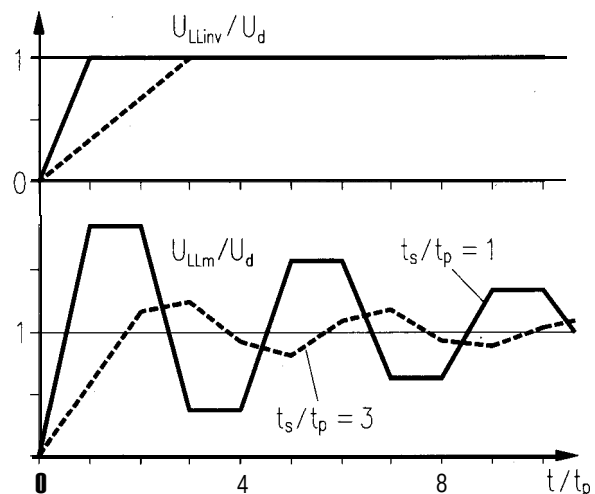


Bild 7.14: Umrichter- und Motorklemmen-Spannungsverlauf für unterschiedliche Spannungssteilheiten und Leitungslängen [28]

Bei genügend kleinem du/dt oder genügend kurzer Leitung (strichlierter Verlauf) wird der Maximalwert $(1 + r)U_d$ nicht mehr erreicht, weil die Reflexion der Wellenfront länger dauert als die Laufzeit der Wellenfront vom Umrichter zum Motor, die Reflexion wird ungefährlich. Dieser Sachverhalt wird durch die kritische Leitungslänge $l_{c,crit} = (v_{ph} t_s)/2$ ausgedrückt. Ist die Leitung länger als dieser Wert, tritt die Reflexions-Spannungsspitze in voller Höhe an den Motorklemmen auf.

Beispiel: $t_s = 100\text{ns} \dots 400\text{ns}$, $l_{c,crit} = 7.5 \dots 30\text{m}$. **Bild 7.15** zeigt den gemessenen Spannungsverlauf beim Überschreiten der kritischen Leitungslänge für einen 2.2kW-Asynchronmotor, 4.1kVA-U-Umrichter und den Kenngrössen $t_s/t_p = 0.6$, $t_s = 200\text{ns}$, $l = 50\text{m}$, $l_{c,crit} = 15\text{m}$ und $U_d = 555\text{V}$.

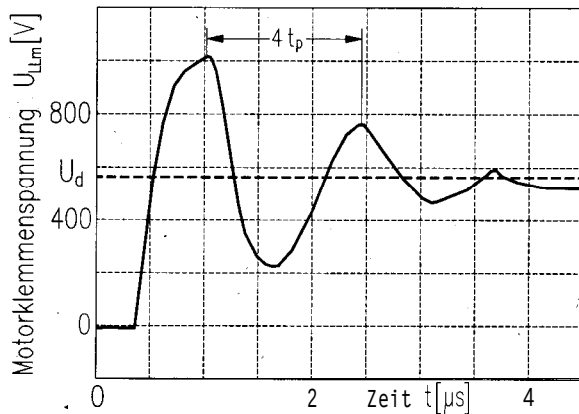


Bild 7.15: Motorklemmen-Spannungsverlauf beim Überschreiten der kritischen Leitungslänge [28]

In der Norm VDE0530/1 ("Leitfaden für den Einsatz umrichtergespeister Induktionsmotoren mit Käfigläufer", 1991, Beiblatt 2, Seite 9) wird ausgesagt, dass bei Spannungsspitzen $U_{LLm} < 1000\text{V}$ und $du/dt < 500\text{V}/\mu\text{s}$ die Lebensdauer des Isoliersystems erfahrungsgemäss nicht beeinträchtigt wird. Umfangreiche Messungen [29] haben ergeben, dass physikalisch nicht allein der Maximalwert U_{LLmax} , sondern der eng damit zusammenhängende pulsfrequente Wechselanteil U_{LL}^* der Motorklemmenspannung für die in der Wicklung einsetzenden Teilentladungen gemäss **Bild 7.16** verantwortlich ist (Die Reflexionen sind dort als Spitzen dargestellt). Da ein 400V-Motor (Spitzen-

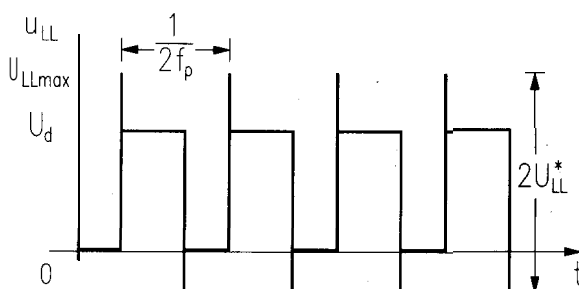


Bild 7.16: Motorklemmen-Spannungsverlauf beim Überschreiten der kritischen Leitungslänge (Zeitachse gerafft) [28]

wert bei Sinusbetrieb 565V) somit mit einem Wechselanteil $U_{LL}^* = (r+0.5)U_d$ (typisch 850V am 400V-Netz bei Umrichterspeisung und langer Leitung), also um 50% höher beansprucht wird, wird i.a. die Einsetzspannung für Teilentladungen in der Wicklung überschritten. Die Wicklung kann durch Phasen-, Windungs- oder Masseschluss ausfallen.

Abhilfen:

- Kombination von Motor und Umrichter als Kompaktantrieb
- Umrichter und Motor vom gleichen Hersteller (optimierte Komponentenabstimmung: z.B. umrichterfester Motor)
- Unterschreiten der kritischen Leitungslänge nach **Tabelle 7.1a**
- Einsatz eines du/dt -Filters zur Verlangsamung des Spannungsanstieges auf die in der Norm VDE0530/1 angegebenen Werte (Filteraufbau: RL-Kombination umrichterausgangsseitig gemäss **Tabelle 7.1b**)
- Einsatz eines Sinusfilters (LC-Kombination mit typisch 1500Hz Knickfrequenz)

Vorteile

- Sinusförmige Ströme und Spannungen, daher Verhalten wie am Sinusnetz bezüglich Motorgeräusch, Motorausnutzung, Momentenwelligkeit.
- Geringe EMV-Probleme durch die Motorleitung (ungeschirmte Leitung möglich)
- Längere Leitungen als bei du/dt -Filter möglich (**Tabelle 7.1b**)

Nachteile

- Grossvolumig und teuer
- Spannungsverlust an der Drossel (typisch $U_{mot} = 0.9U_{Netz}$)
- Umrichterfeste Motoren: Durch Verbesserungen am Isoliersystem (aber nach wie vor Niederspannungswicklung) wird z.B. erst ab Netzspannungen von typisch $\geq 550\text{V}$ bei langer Leitung ein du/dt -Filter erforderlich.

Lange Leitung wirkt als Störsender

Die pulsfrequenter und infolge der Reflexionen auch hochfrequenten Spannungsimpulse der Leistungskabel können parallelgeführte Geberleitungen o.ä. elektromagnetisch stören.

a) Maximal anschliessbare Leitungslängen		
Umrichter/ Wechselrichter Baugrösse	Standard ungeschirmte Leitungen	Standard geschirmte Leitungen
4kW bis 37kW	50m	35m
45kW bis 200kW	150m	100m

b) Maximal anschliessbare Leitungslängen mit Optionen								
Umrichter/ Wechselrichter Baugrösse	Drossel	du/dt-Filter	Sinus-Filter	du/dt-Filter + Drossel	Drossel	du/dt-Filter	Sinus-Filter	du/dt-Filter + Drossel
	ungeschirmte Leitungen				geschirmte Leitungen			
4kW	150m	150m	150m	300m	100m	100m	100m	200m
7.5kW	150m	150m	400m	300m	100m	100m	170m	200m
15kW	150m	150m	500m	300m	100m	100m	325m	200m
37kW	150m	150m	650m	300m	100m	100m	450m	200m
45kW bis 200kW	300m	150m	750m	300m	200m	100m	500m	200m

Tabelle 7.1: Maximale Leitungslängen für Umrichter mit IGBT-Modulen [30]

Abhilfen.

- Schirmen des Störsenders (geschirmte Leitungskabel, vollflächig aufgelegter Schirm an beiden Leitungsenden). Dabei ist zu beachten, dass geschirmte Kabel einen grösseren Kapazitätsbelag aufweisen, was höhere Ladeströme und niedrigere kritische Leitungslängen zur Folge hat.
- Verwendung von Sinusfiltern

7.6 Entwicklungstendenzen

Grundsätzlich ist der stromrichter gespeiste Antrieb eine seit Jahren bewährte Lösung zur Verbesserung der Arbeitsprozesse. Dabei sind folgende Entwicklungstendenzen festzustellen:

1. Die umrichter gespeiste Gleichstrommaschine behält ihre Stellung, insbesondere dann, wenn bezüglich der Gleichförmigkeit des Drehmomentes und der Regelfähigkeit hohe Anforderungen gestellt werden. Sie stellt auch bei grösseren Leistungen immer noch die kostengünstigste Lösung

dar, da sie im Vergleich zur Drehfeldmaschine nur einen Stromrichter benötigt. **2.** Im Bereich der Mittel- und Kleinmaschinen Wird die umrichter gespeiste Drehfeld- oder Reluktanzmaschine die Gleichstrommaschine in zunehmendem Masse ablösen. Dabei wird es zu einer Integration des Stromrichters mit der Maschine kommen, so dass der Anwender nur noch eine Einheit zu betreiben hat.

3. Permanentmagneterregte Synchronmaschinen (Elektronikmotoren) werden im Kleinmaschinenbereich die umrichter gespeisten Asynchronmaschinen ersetzen.

4. Die Möglichkeiten der stromrichter gespeisten Antriebe, insbesondere ihre Freiheitsgrade: Drehzahl und Drehmoment führen zu neuartigen Integralantrieben, wie z.B. schnellaufende, gekapselte Pumpen und Ventilatoren, welche z.B. direkt in eine Gasleitung eingebaut werden können, Energiespeichersysteme mit Schwungrädern, Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsmaschinen, aber auch Heizungsumwälzpumpen.

8 Projektierung und Einsatz stromrichter- gespeister Antriebe

Grundsätzliches:

- Die Grenzen der Frequenzbereiche der heute zur Verfügung stehenden Stromrichter-Antriebe werden von der Schaltfrequenz der eingesetzten Stromrichter-Bauelemente bestimmt.
- Stromrichter-**gespeiste Antriebe** haben grundsätzlich einen schlechteren Wirkungsgrad und damit höhere Verluste als netzgespeiste Antriebe
- Obwohl die Asynchronmaschine eine billige Antriebslösung darstellt, werden bei grösseren Leistungen die Stromrichter-Kosten bestimmend sein.

8.1 Vorgehen beim Einsatz stromrichter- gespeister Antriebe

*Stromrichter-**gespeiste Antriebe** sind dann sinnvoll einzusetzen wenn:*

- Drehzahl, Geschwindigkeit, Fördermenge, Leistung, Drehmoment usw. einer Arbeitsmaschine in einem gewissen Bereich stetig eingeteilt oder geregelt werden muss, z.B. bei Lüftern, Pumpen, Verarbeitungs-**maschinen**, Krananlagen, Aufzügen.
- Einzelantriebe koordiniert gestellt oder geregelt betrieben werden müssen, z.B. bei Förderanlagen, Verarbeitungs- und Wickelmaschinen.
- Massen beschleunigt und gebremst werden müssen, u.U. mit Energierückgewinnung, z.B. bei Krananlagen, Aufzügen und Zentrifugen.
- Antriebe mit Getriebe durch Direktantriebe ersetzt werden können.

*Stromrichter-**gespeiste Antriebe** haben:*

- grundsätzlich einen schlechteren Wirkungsgrad (höhere Verluste als netzgespeiste Antriebe,
- Nebenwirkungen, welche bei netzgespeisten Antrieben nicht auftreten, sind:
Zusatzverluste im Motor, Drehmomentpulsationen, Stromrichter-Oberschwingungs- und

Blindleistungs-Belastung des Speisernetzes, Überspannungsbeanspruchung der Wicklungen,

- nur eine Brems- und Energierückspeisefähigkeit, wenn der Stromrichter dafür ausgelegt ist,
- einen grösseren Aufwand für die Planung, Projektierung und Inbetriebsetzung.

*Erforderliche Angaben für die Beschaffung stromrichter-**gespeister Antriebe**:*

Motordaten:

- Belastungskennlinie des Motors, bzw. Widerstands-Drehmoment der Arbeitsmaschine: konstantes, quadratisch zunehmendes, fallendes Drehmoment,
- Arbeitsbereich: Motor, Bremse, Generator, vorwärts, rückwärts drehend,
- Drehzahlstellbereich: maximale und minimale Drehzahl,
- Max. mechanische Leistung, Nenndrehmoment bei Nenndrehzahl,
- Drehmomente bei der maximalen und minimalen Drehzahl,
- Massenträgheitsmomente: Motor und Last, minimale Anlaufdauer
- Belastungsart (S1S10): dauernd, intermittierend, Umgebungsbedingungen,
- Schutzart: offen, geschlossen,
- Bauart,
- Zusätzliche Motorkühlung bei niedrigen Drehzahlen,
- Motorschutz.

Stromrichter:

- Strom richterart:
U-/I-/Zwischenkreis-/Direktumrichter,
- Bypass-System für den Betrieb bei terausfall, direkt, Stern-Dreieck,
- Schutzart, Bauart,
- Aufstellung, Platzbedarf,
- Kühlung, Verlustabfuhr,

	Direktumrichter	U-Umrichter vollblock	U-Umrichter PWM	I-Umrichter vollblock
Motorart	SM, ASM	ASM	ASM SM (PM)	ASM ASM mit Filter
Speisung von Mehr-Maschinen-Antrieben	ja	ja	ja	nein
Energierückgewinnung	ja	Option	Option	ja
Drehzahlstellbereich	0 – 100 %	0 – 100 % +Feldschw.	0 – 100 % +Feldschw.	5 – 100 %
Frequenzbereich	0 – 24 Hz	0 – 1000 Hz	0 – 500 Hz	0 – 125 Hz
Leistungsbereich	SM $\leq$ 30 MW ASM $\leq$ 12 MW	ASM $\leq$ 8 MW	ASM $\leq$ 8 MW	ASM $\leq$ 2 MW SM $\leq$ 80 MW
Netzleistungsfaktor	lastabhängig	lastabhängig	≈ 1	lastabhängig
Netz-Oberschwingungen	gross	gross	klein	gross
Motor-Oberschwingungen	klein (I)	gross (U,I)	klein (I)	gross (U,I) mit Filter klein
Drehmoment-Oberschwingungen	klein	gross	klein	gross
Motor-Zusatzverluste	klein	gross	mittel	gross
Spannungsbeanspruchung der Wicklungen *	klein	mittel	gross	gross
Stromrichter-Elemente	Thyristor	GTO Transistor	GTO Transistor	Thyristor
Motorgeräusch	klein	mittel	gross	klein
Regelung	f/I+Grenzen	U/f+Grenzen	Feldorientiert U/f+Grenzen	f/I+Grenzen

Tabelle 8.1: Eigenschaften stromrichter gespeister Antriebe mit Drehfeldmaschinen, ASM = Asynchronmaschine, SM = Synchronmaschine, (PM) = Synchronmaschine mit Dauermagneterregung, Filter = LC-Glied (Motorklemmen)

- Netzbelastung durch Blindleistung und Oberschwingungen,
- Oberschwingungsfilter, Blindleistungskompensation,
- Netzanschluss, Schaltgeräte,
- Art der Regelung: Lage, Drehzahl, Moment, Leistung, Menge, Sollwerte, Grenzwerte, Genauigkeit,
- Steuerung, Instrumentierung, Rechnerinterface,
- Automatischer Anlauf, gesteuertes Anhalten, Wiedereinschalten,
- Schutz gegen Überlast, Kurzschluss,

Tabelle 8.1 zeigt im Überblick die Möglichkeiten und Grenzen der heute zur Verfügung stehenden Stromrichter-Antriebe. Dabei ist folgendes zu berücksichtigen: Die Grenzen der Frequenzbereiche werden durch die Schaltfrequenz der zur Verfügung stehenden Stromrichterbauelemente [31] bestimmt. Diese nehmen mit steigender Leistung ab und unterliegen einer laufenden technischen Entwicklung. Ein Kostenvergleich der Antriebsvariante kann nicht in allgemeiner Form durchgeführt werden. Grundsätzlich ist festzustellen, dass Asynchronmaschinen die billigste Antriebslösung darstellen, andererseits aber die Stromrichterkosten bei grösseren Leistungen bestimmend sind.

8.2 Auswahl, Dimensionierung und Programmierung von Frequenzumrichtern

A) Definition Motor/Frequenzumrichter

Zur Einleitung und Aufrechterhaltung eines Bewegungsvorganges ist mechanische Energie erforderlich. Diese Energie wird zu einem grossen Teil über elektromechanische Energiewandler (elektrische Maschinen, Elektromagnete etc.) aus dem elektrischen Versorgungsnetz bezogen. Folgende Grundaufgaben resümieren daraus für die elektrische Antriebstechnik:

- Elektromechanische Energiewandlung zur Durchführung des technologischen Prozesses mit möglichst geringen Verlusten,
- Erzeugen der Drehmomente und Geschwindigkeiten nach den Vorgaben der Arbeitsmaschine,
- Informationserfassung und -Verarbeitung der mechanischen Grössen, so dass der technologische Prozess effektiv abläuft.

Diese drei Grundaufgaben umfassen das gesamte Arbeitsgebiet der elektrischen Antriebstechnik. Sie widerspiegeln aber auch die Komplexität der Arbeitsmaschine, die in enger Verbindung zu den Erkenntnissen der Technologien des Maschinenbaus, der Elektrotechnik, der Elektronik und der Automatisierungstechnik steht. Bei der Auswahl und Dimensionierung eines Antriebssystems muss zur Erfüllung dieser Forderungen immer von den möglichst genau ermittelten Grössen des Bewegungsvorganges im Rahmen einer Prozessanalyse ausgegangen werden.

Daraus resultieren die folgenden sieben Punkte für die Auslegung von Motor und Frequenzumrichter:

Bestimmung der benötigten Kraft

Als erstes muss die maximale Kraft in Newton bestimmt werden. Zur Überwindung einer Kraft F bei einer Geschwindigkeit v ist nach **Bild 8.1** die mechanische Leistung P erforderlich. Die Kraft F tritt beispielsweise als Gewichtskraft, Reibkraft und als Luftwiderstand auf.

Wird eine Masse m geradlinig beschleunigt, so darf die Beschleunigung nicht vernachlässigt werden. Wird eine Masse entgegen der Erd- bzw. Fallbe-

schleunigung angehoben, dann muss noch der Faktor $g = 9.81[m/s^2]$ berücksichtigt werden.

Berechnen der Antriebsleistung

Entscheidend für die Feslegung der Antriebsleistung ist der Bedarf der Arbeitsmaschine an mechanischer Leistung, die sich mit den Gesetzen der Mechanik bestimmen lässt. Es muss das Drehmoment M von der Antriebswelle auf die Arbeitsmaschine übertragen werden. Die Umfangskraft F greift am Hebelarm r an. Aus der Drehzahl n der Antriebswelle errechnet sich die Winkelgeschwindigkeit Ω und die Umfangsgeschwindigkeit v am Radius r . Aus diesen Zusammenhängen ergibt sich für die Drehbewegung nach **Bild 8.1** die notwendige mechanische Leistung

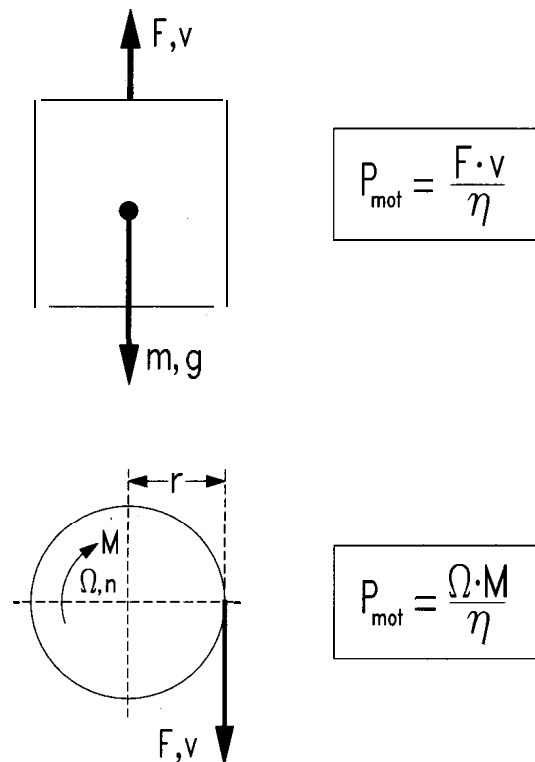


Bild 8.1: Bestimmung der Antriebsleistung

Analog zur geradlinig beschleunigten Bewegung muss man bei der beschleunigten Drehbewegung das Beschleunigungsmoment errechnen. Last- und Beschleunigungsmoment werden dann addiert.

Dynamische Anwendung

Werden von der Arbeitsmaschine kurze Beschleunigungs- und Bremszeiten gefordert, darf der Unterschied der Massenträgheiten von der Arbeits-

maschine und dem Rotor des Motors nicht zu gross sein. Die Massenträgheit der Arbeitsmaschine sollte den 5-fachen Wert der Massenträgheit des Rotors nicht übersteigen.

Befindet sich eine Untersetzung zwischen der Arbeitsmaschine und dem Motor, reduziert sich die Massenträgheit der Arbeitsmaschine quadratisch am Untersetzungsengang n_1 im Verhältnis zur Untersetzung.

Betriebsart

Das Betriebsverhalten eines Motors wird nach dem Drehmoment-Drehzahl Verhalten beurteilt. Greift man nur einen bestimmten Betriebszustand, z.B. Stillstand, Leerlauf oder Nennbetrieb heraus, so spricht man dabei auch von einem statischen Betriebsverhalten. Sind dagegen Übergangszustände zu beurteilen, z.B. Anlauf oder Bremsen, so ist das Betriebsverhalten dynamisch. Nach VDE 0530 Teil1 werden typische Betriebsarten festgelegt, die für die Auslegung und Berechnung des Antriebsmotors von grosser Bedeutung sind. Das Erwärmungsverhalten des Motors wird damit an die Anforderungen des Betriebes angepasst, d.h. der Motor wird entsprechend den tatsächlichen Betriebsbedingungen möglichst nahe bis zur zulässigen Erwärmungsgrenze ausgenutzt.

Die Möglichkeit, dass der Motor kurzzeitig überlastet werden darf, sollte genutzt werden!

Auswahl des Motors

Für die Bestimmung des Motors sind im wesentlichen vier Gesichtspunkte massgebend:

- die Leistung,
- die Betriebsart,
- die Erwärmung und
- die Grenzübertemperatur.

Wird der Motor aus vermeintlicher Vorsicht zu gross ausgelegt, ergeben sich höhere Gestehungs- und Betriebskosten. Je nach Betriebsart muss der Beschleunigungsarbeit besondere Beachtung geschenkt werden.

Der Motor muss den **Drehmomentbedarf** für den Anlauf, für periodisch schwankende Belastung und für den Bremsvorgang aufbringen können. Sehr

häufig ist es notwendig, das Motordrehmoment an die Bedingungen der Arbeitsmaschine anzupassen.

Das **Drehzahlverhalten** wird von der Arbeitsmaschine gefordert, z.B. müssen Drehzahlverstellung, Steuerung, Regelung und Drehrichtungsumkehr möglich sein.

Die Schutzart, die Art der Kühlung bzw. Belüftung sowie die Art der mechanischen Kraftübertragung sind die massgebenden Faktoren für die Auswahl der **Bauform des Motors**.

Für den **drehzahlvariablen Betrieb** mit Frequenzumrichter müssen noch zusätzlich einige Punkte berücksichtigt werden. Die Eigenbelüftung des Normmotors kann bei reduzierter Drehzahl ungenügend sein, weil die Luftmenge mit der dritten Potenz im Verhältniss zur Drehzahl abnimmt. Bei grossem Drehzahlstellbereich und konstantem Drehmoment wird ein Fremdlüfter benötigt und die eingebauten Temperaturfühler überwachen die Erwärmungsgrenze. Benötigt die Arbeitsmaschine im Stillstand ein Haltemoment, so wird in der Regel eine Elektromagnetbremse am Motor angebaut. Drehgeber und Analogtacho sind weiteres mögliches Zubehör das bei der Motorauswahl berücksichtigt werden muss.

Vierpolige Normmotoren eignen sich besonders gut für den Betrieb mit einem Frequenzumrichter. Diese Motoren können mit doppelter Nennfrequenz betrieben werden. In der Planungsphase sollte die Möglichkeit einer höheren Ausgangsfrequenz mit dem Frequenzumrichter genutzt werden wodurch der Drehzahlstellbereich erweitert werden kann. Dabei sind jedoch einige Punkte zu berücksichtigen

- Für Normmotoren sollte die maximale Drehzahl von 3600 Umdrehungen pro Minute nicht überschritten werden.
- Das Lüftergeräusch wird über der Nenndrehzahl zunehmen und der Wirkungsgrad verschlechtert sich.
- Wird der Motor über seiner Nennfrequenz betrieben, nimmt das Drehmoment infolge der Feldschwächung ab. Bei doppelter Ausgangsfrequenz kann nach **Bild 8.2** noch etwa mit dem halben Nenndrehmoment gerechnet werden. Noch höhere Ausgangsfrequenzen sollten

mit Vorsicht angewendet werden, da das Kippmoment quadratisch mit der Drehfrequenz abnimmt.

Es gibt jedoch eine Möglichkeit den Drehmomentverlust in Grenzen zu halten, indem der Motor in Dreieck 230V geschaltet wird und das V/Hz -Verhältnis am Frequenzumrichter auf $87Hz/400V$ eingestellt wird (vgl. **Bild 8.3**). Man erzielt dadurch eine um den Faktor $\sqrt{3}$ höhere Leistung des Motors. Wegen der Dreieckschaltung erhöht sich der Motorstrom ebenfalls um diesen Betrag. Deshalb muss der Frequenzumrichter für diesen Motornennstrom dimensioniert sein.

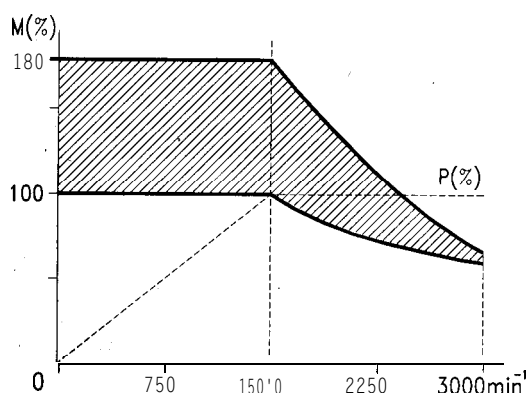


Bild 8.2: Drehmomentgrenzkurven für einen 4-poligen Normmotor im Normalbetrieb

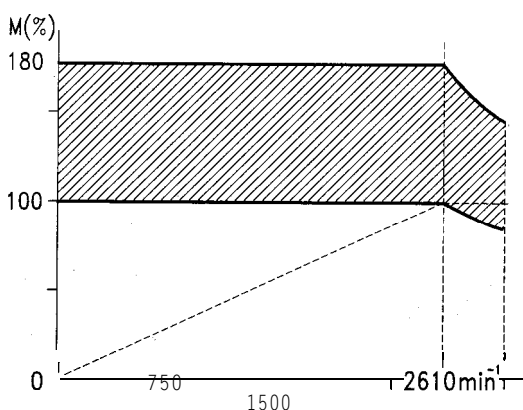


Bild 8.3: Drehmomentgrenzkurven für einen 4-poligen Normmotor mit V/Hz -Verhältnis und Dreieckschaltung

Auswahl des Frequenzumrichters

Ist der Motor bestimmt, kann der Frequenzumrichter ausgewählt werden. Der Frequenzumrichter wird nach dem Motornennstrom ausgelegt. Die

übliche Festlegung der Frequenzumrichter nach den Leistungsangaben kann irreführend sein. In besonderen Fällen, wie grosser Polzahl, Sonderwicklung und Mehrmotoren-Betrieb wird der Motorstrom grösser sein als der Frequenzumrichter-Nennstrom. Die heutigen Frequenzumrichter erlauben es kurzzeitig den Nennstrom zu überschreiten, womit es keinen Grund gibt den Frequenzumrichter überzudimensionieren.

Bremsenergie

Beim Hochlaufen auf die Arbeitsgeschwindigkeit wird kinetische Energie im Antriebssystem gespeichert und beim Abbremsen bis zum Stillstand wieder freigesetzt. Drehzahländerungen im Antriebssystem bewirken stets ein "Aufladen" oder "Entladen" von kinetischer Energie. Motoren die am Versorgungsnetz angeschlossen sind, liefern die Bremsenergie zurück ins Netz. Wird der Motor von einem Frequenzumrichter angesteuert wird die Bremsenergie im Zwischenkreis des Frequenzumrichters gespeichert. Übersteigt die Bremsleistung die Verlustleistung des Frequenzumrichters, erfolgt ein Anstieg der Zwischenkreisspannung. Um eine Gefährdung des Frequenzumrichters zu vermeiden, muss die Zwischenkreisspannung begrenzt werden. Dies geschieht bei kleinen Bremsleistungen durch das Zuschalten eines Bremswiderstandes. Dadurch wird die oft nur kurzzeitig anfallende Bremsenergie in Wärme umgesetzt. Bei grösseren Bremsleistungen lohnt sich der Aufwand für eine Rückspeisung der Bremsenergie in das Versorgungsnetz. Dies geht beim U-Frequenzumrichter nur über einen antiparallel zum Frequenzumrichter geschalteten steuerbaren Rückspeisumrichter.

B) Inbetriebnahme und Programmierung von Frequenzumrichtern

Installation und Ansteuerung

Ist der Frequenzumrichter mit allen Schutzmassnahmen wie Erdung, Netzfilter, Netzdrossel, abgeschirmte Motorleitung oder SinusausgangsfILTER installiert, werden den Anforderungen der Arbeitsmaschine entsprechend, die Steuereingänge und Steuerausgänge verdrahtet. Mit der Programmierung des Frequenzumrichters kann der Antrieb an die Forderungen der Arbeitsmaschine angepasst werden. Die meisten Hersteller liefern die Frequenzumrichter mit Standardeinstellungen aus, dass ein

leistungszugeordneter, vierpoliger Normmotor mit seiner Nennspannung und 50 Hz ohne weitere Einstellungen betrieben werden kann.

Reproduzierbare Betriebswerte

Auf den Baugruppen der mikroprozessorgesteuerten Frequenzumrichter gibt es keine Trimpotentiometer mehr. Mit der analogen Einstellung konnte nicht gewährleistet werden, dass die wichtigen Funktionen, wie V/Hz -Kennlinie, max. Frequenz und Drehmomentanhebung, genau den Anforderungen des Motors entsprachen. Mussten zugleich mehrere Frequenzumrichter eingestellt werden, gab es Abweichungen der einzelnen Parameterwerte. Heute wird die Einstellung der Betriebswerte digital über die Programmierung vorgenommen. Die Parameter-Werte werden exakt reproduzierbar in numerischen LED-Anzeigen ersichtlich.

Programmieren und Speichern

Die Art der Dateneingabe ist je nach Herstellerphilosophie unterschiedlich. Am weitesten verbreitet ist die Dateneingabe über die Bedieneinheit des Frequenzumrichters. Immer öfter werden mit Unterstützung von herstellerspezifischen Programmen für Personal Computer die Betriebswerte festgelegt und über eine serielle Schnittstelle eingelesen. Die Frequenzumrichtereinstellung kann abgespeichert werden und steht für gleiche Anforderungen jederzeit wieder zur Verfügung. Andere Hersteller bieten eine Kopiereinheit an, in der die Betriebswerte festgelegt und abgespeichert werden. Eine weitere Möglichkeit bieten Chipkarten als Datenspeicher, für die zunächst jedoch die Betriebswerte auf einer Bedieneinheit eingegeben werden müssen.

Programmieren nach den Forderungen des Betriebsablaufes

Die Programmierstruktur der Frequenzumrichter wird nach der Gewichtung der Funktionen aufgeteilt. Zuerst werden Grundeinstellungen eingegeben, wie Parameter für die Betriebsart, Motordaten, max. Ausgangsfrequenz, Hoch- und Tieflaufzeit sowie Drehmomentanhebung. Danach werden die Funktionen der Ein- und Ausgangsklemmen, der analogen und digitalen Ausgangssignale, spezielle Funktionen für die Vektor-Kontrolleinstellung sowie die zweiten Motordaten eingegeben.

Das Eingeben der einzelnen Funktionsparameter

setzt voraus, dass der Betriebsablauf und die Betriebsbedingungen der Arbeitsmaschine bekannt sind. Die Frequenz-Sollwertvorgabe kann analog oder digital sein und die Betriebsart kann extern oder intern von der Betriebseinheit gesteuert werden. Die maximale Ausgangsfrequenz, die Motorfrequenz und die Motorspannung sind die nächsten wichtigen Parameter die bekannt sein müssen. Die Betriebsanforderung bestimmt die Werte für die Drehmomentanhebung und die Hoch- und Tieflaufzeit. Damit sind die Anforderungen für einen ersten, erfolgreichen Start des Motors bestimmt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Arbeitsmaschine nicht in Betrieb genommen werden darf, bevor die Schutz- und Sicherheitsanforderungen gemäss der Maschinenrichtlinien erfüllt sind.

Danach gilt es, den Antrieb zu optimieren, d.h. den Feinabgleich der eingestellten Funktionen vorzunehmen, sowie alle zusätzlichen Funktionen einzugeben, so dass die Arbeitsmaschine den gewünschten Anforderungen gerecht wird. Sicherheitsfunktionen, wie z.B. elektronischer Motorschutz oder Wiederanlauf nach Netzunterbruch, werden erst am Schluss der Einstellungen inkraftgesetzt, damit keine unerwünschten Schutzabschaltungen beim Austesten der Arbeitsmaschine auftreten.

Die Zusatzfunktionen sind bei modernen Frequenzumrichtern so umfangreich, dass es sinnvoll ist, bei einer Neukonstruktion der Arbeitsmaschine, für das optimale Ausnützen des Frequenzumrichters, einen Frequenzumrichter-Fachmann beizuziehen.

Einfache Handhabung durch interaktive Bedieneinheit

Wie vorgängig beschrieben, gibt es unterschiedliche Philosophien für die Eingabe der Betriebswerte. Diese Eingaben sind nur ein kleiner Teil des Frequenzumrichterbetriebes. Ist die Inbetriebnahme erfolgreich abgeschlossen, erwartet man vom Frequenzumrichter auch Informationen über die Betriebsdaten. Für diese Mitteilungen ist die Bedieneinheit vorzüglich geeignet. Die abnehmbare Bedieneinheit ermöglicht mit einem Verbindungskabel eine problemlose Fernbedienung der Frequenzumrichter. Durch die interaktive Bedieneinheit ist die Handhabung der Frequenzumrichter so einfach, dass im Normalfall auf die Betriebanleitung verzichtet werden kann.

Die Betriebsdaten, wie Ausgangsfrequenz, Ausgangsstrom, Ausgangsspannung und gerechnetes Drehmoment werden digital angezeigt. Bei der Schutzabschaltung wird auf dem Display der Fehler-Code angezeigt mit zusätzlich Informationen zum Zeitpunkt des Fehlers. Eine wertvolle Hilfe zur Ermittlung der Fehlerursache ist die Fehleranalyse und die Ein- und Ausgangsbedingungen, die am Display abgerufen werden können.

8.3 Energiesparen mit umrichter- gespeisten Antrieben

Grundsätzlich kann sich eine Stromrichterspeisung positiv und negativ auf den Energieverbrauch eines Antriebs auswirken.

Energiesparend wirken Stromrichterspeisungen nur dann, wenn:

- Der Motor durch eine angepasste Frequenz- und Spannungssteuerung mit minimalem Schlupf und minimalen inneren Verlusten arbeitet.
- Der Arbeitsprozess durch die Anpassung der Drehzahl des Antriebs an den Bedarf verbessert wird, wie z.B. im Falle eines Pumpenantriebes, wenn die Drossel- oder Drallregelung durch eine Drehzahlregelung ersetzt wird.

Verlusterhöhend und wirkungsgradverschlechternd wirken:

- Drehstromsteller mit Phasenanschnittsteuerung zur Speisung von Asynchronmaschinen, (Drehzahlstellung via Spannung).
- Stromrichter mit Zwangskommutierung und hohem Oberschwingungsgehalt in der Ausgangsspannung und im Strom.
- Unsymmetrien im speisenden Drehspannungssystem oder Verzerrungen, welche dann in anderen Antrieben des Netzes zusätzliche Rotor-Verluste erzeugen.

Besonders vorteilhaft ist die Stromrichterspeisung bei Antrieben, welche instationär betrieben werden und grosse Schwungmassen, bzw. Trägheitsmomente haben. Beim Hochfahren des Antriebs muss elektrische Energie zur Beschleunigung der Schwungmassen zugeführt werden. Dabei treten

in den antreibenden Maschinen mehr oder weniger grosse Verluste auf, abhängig von der Art des Motors und der Speisung.

Beim Abbremsen muss den rotierenden Massen diese Energie entzogen werden. Diese kann entweder im Motor in Wärme umgesetzt oder durch Nutzbremse dem Energiesystem zurückgeliefert werden.

Besonders ungünstig verhält sich in dieser Beziehung die direktgespeiste Asynchronmaschine, bei welcher aufgrund der Leistungsaufteilungsgesetze im Rotor stets die Energie der Schwungmassen in Wärme umgesetzt wird.

Damit ist die einzuschlagende Richtung des Energiesparens bei Antrieben mit instationären Betriebsverhältnissen vorgezeichnet:

- Die Masse, bzw. das Trägheitsmoment der zu beschleunigenden Arbeitsmaschinen ist so klein wie möglich zu halten.
- Zusatzverluste, welche im Motor beim Beschleunigen und Bremsen auftreten, sind zu minimieren, z.B. durch den Einsatz von:
 1. polumschaltbaren Asynchronmaschinen,
 2. umrichter-
gespeisten Asynchron- oder Synchronmaschinen mit drehzahlabhängiger Spannungsfrequenzspeisung und Nutzbremse.

9 Elektromagnetische Verträglichkeit

Grundsätzliches:

- **Typische EMV-Probleme im Zusammenhang mit dem Einsatz von Frequenzumrichtern sind, hochfrequente Netzbelastungen aufgrund hoher Spannungsteilheiten und Fehlanpassungen des Systems Frequenzumrichter - Kabel - Motor.**
- **Für komplexe Antriebssysteme ist bereits im Planungsstadium der Einsatz von EMV-förderlichen Komponenten und Massnahmen vorzusehen.**
- **EMV-Normen dienen der Bewertung der Konformität von elektrischen Antrieben mit den Anforderungen der EU-Richtlinien.**

Umwelt in einer Wechselbeziehung [32]. Durch Überschreitung bestimmter Grenzwerte im beeinflussten System kann es zu Personen- und Sachschäden, zum Versagen von Schutz- und Steuereinrichtungen oder zu Belästigungen anderer Art kommen, wie zum Beispiel unerwünschte Geräusche. Wegen des breiten Beeinflussungsspektrums, insbesondere auf elektronische Komponenten und Systeme, hat man deshalb für die

” **Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung, in ihrer elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren, ohne diese Umgebung, zu der auch andere Einrichtungen gehören können, unzulässig zu beeinflussen (VDE 0870)**

9.1 Übersicht

Systeme zur Erzeugung, zur Übertragung und zur Nutzung von elektrischer Energie stehen, wie in **Bild 9.1** schematisch dargestellt, mit anderen technischen Systemen aber auch mit Personen und der

den Begriff ” **Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)** [33] eingeführt. Diese kann sowohl für die beeinflussende Quelle als auch für die beeinflusste Senke definiert werden, wobei für den Einsatz von praktischen Präventiv-Massnahmen die genaue Beschreibung der Beeinflussungen erforderlich ist.

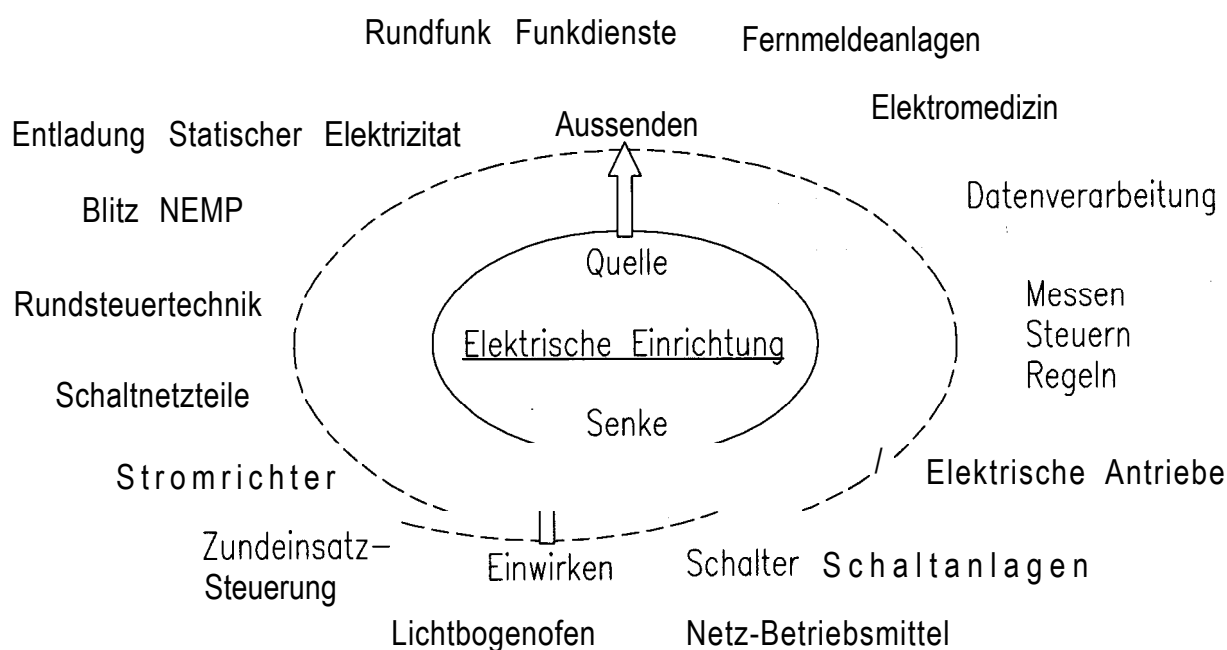


Bild 9.1: Wechselbeziehungen zwischen den elektrischen Systemen

9.2 EMV Kopplungsmechanismen

A) Galvanische Kopplung

Wenn zwei Betriebs-Stromkreise, wie in **Bild 9.2** gezeigt, ein gemeinsames Leitungsstück besitzen, so erzeugt Stromkreis I (Störer) an der Kopplungsimpedanz Z_k einen Spannungsabfall der sich im Stromkreis II (gestörtes System) dem Nutzsignal überlagert, z.B. 50Hz-Brumm. Diese sogenannte Erdschleifenkopplung kann durch eine Verbindung in einem gemeinsamen Bezugspunkt vermieden werden. Weitere hilfreiche Massnahmen

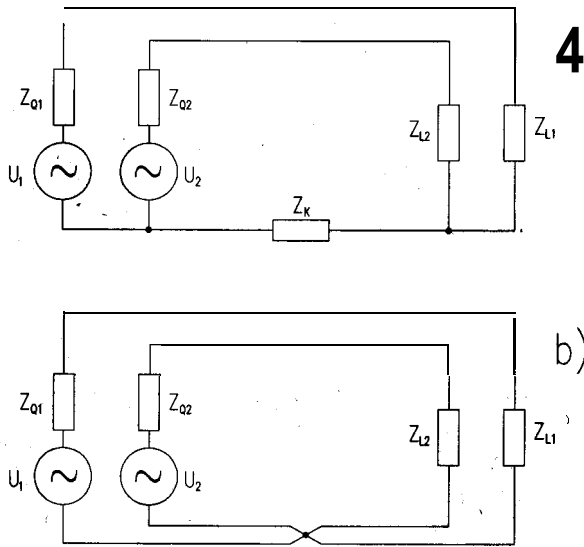


Bild 9.2: Galvanische Kopplung

gegen diese Kopplungsart sind:

- Impedanz der Stromzuführungen reduzieren durch Abstandsverkleinerung, Verdrillen oder Einsatz von Multi-Layer Leiterplatten
- Möglichst hohe Versorgungsspannung wählen und Anwendung von Schaltreglern prüfen
- Stützkondensatoren richtig bemessen
- Separate Stromversorgungsleitungen für die einzelnen Verbraucher vorsehen
- Getrennte Netzteile einsetzen, wenn grosser Unterschied in der Leistungsaufnahme

B) Kapazitive Kopplung

Zwei unmittelbar benachbarte Stromkreise deren Leiter sich auf verschiedenen Potentialen befinden, z.B. 220V-Lichtnetz und KO-Messleitung, sind aufgrund der sich ausbildenden elektrischen

schen Felder kapazitiv gekoppelt. Gemäss **Bild 9.3** kann diese Kopplung durch Streukapazitäten nachgebildet werden. Die Netzspannung treibt durch diese Kapazitäten einen Strom der über die Innenwiderstände des Stromkreises 2 unerwünschte Störspannungen erzeugt. Folgende Gegenmassnahmen werden praktiziert:

- Verkleinern der Streukapazitäten durch kurze parallele Leitungen, Leiterabstand erhöhen oder Schirmung einsetzen
- Verkleinern der Impedanz des Stromkreises 2
- Vermeidung von Schirmströmen
- Kleine Schirm-Kopplungsimpedanz

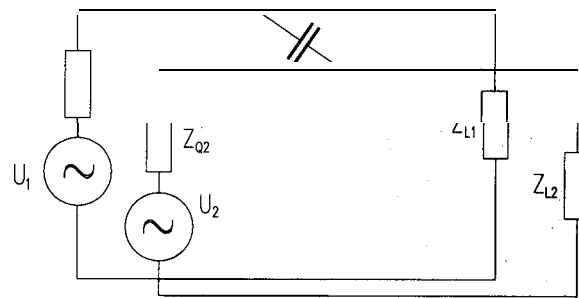


Bild 9.3: Kapazitive Kopplung

C) Induktive Kopplung

Durch hohe Ströme in der Leiterschleife 1 des **Bildes 9.4** werden veränderliche Magnetfelder erzeugt die nach dem Faraday'schen Induktionsgesetz im benachbarten Stromkreis 2 Störspannungen verursachen.

Diese Kopplung kann durch eine Induktivität nachgebildet werden: Um der induktiven Kopplung entgegenzuwirken, werden folgende Massnahmen realisiert:

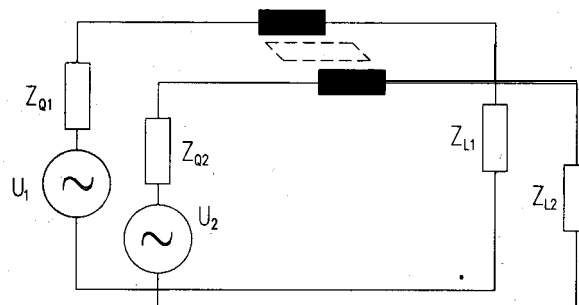


Bild 9.4: Induktive Kopplung

- Verkleinerung der Gegeninduktivität durch möglichst kurze parallele Leitungsführung
- Schleifenabstand vergrössern und Schleifen orthogonal anordnen

- Niederstrom-Schleife verdrillen oder schirmen
- Reduktionsleiter vorsehen

In der Praxis sind jedoch meist mehrere Kopplungsarten gleichzeitig wirksam was die Analyse auftretender Störspannungen beträchtlich erschwert.

9.3 Gegentakt- und Gleichtaktstörung

Die durch die oben beschriebenen Koppelmechanismen auftretenden Störspannungen werden als das in der EMV-Technik übliche Begriffspaar Gegentakt- und Gleichtaktstörung unterschieden.

Gegentaktstörspannungen werden zwischen Hin- und Rückleitern von Stromkreisen oder an den Eingangsklemmen des gestörten Systems gemessen und entstehen meist durch induktive Kopplung. Sie liegen wie im **Bild 9.5** verdeutlicht in Reihe mit dem Nutzsignal und verursachen daher Fehlfunktionen oder Messfehler.

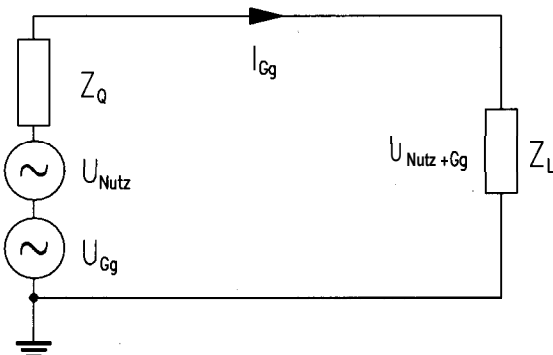


Bild 9.5: Gegentakt-Störung

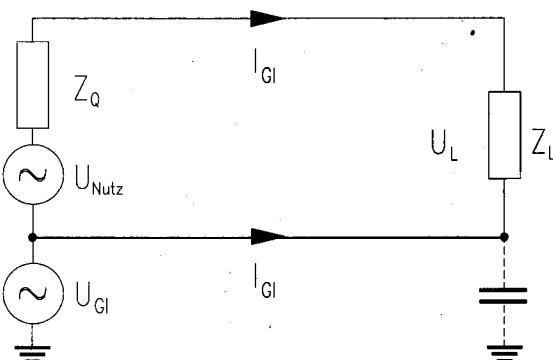


Bild 9.6: Gleichtakt-Störung

Gleichtaktstörspannungen entstehen wie im **Bild 9.6** gezeigt, durch das Auftreten einer durch die Kopplungsart bestimmten Störspannungsquelle zwischen einzelnen Leitern und dem Masse-Bezugspotential. Aufgrund unsymmetrischer Stromkreis-Impedanzen kann es jedoch auch zu einer Gleichtakt/Gegentakt-Konversion kommen.

Die Einkopplung auf Steuerkabel kann also auf zwei Arten erfolgen:

- im sogenannten Gegentakt-Modus d.h. zwischen den Adern eines Paares
- im sogenannten Gleichtakt-Modus d.h. zwischen dem Kabel und der Erde

Die Gegentakt-Einkopplung wird dank der Verdrillung, entsprechend der Anzahl Schläge pro Meter, mehr oder weniger stark reduziert:

Über ca. 1 MHz sind die einzelnen Adern eines Kabels untereinander so gut gekoppelt, dass die Einkopplung praktisch ausschliesslich im Gleichtakt-Modus erfolgt. Ein Störfeld induziert auf sämtliche Adern des Kabels einen Störstrom, der entweder über galvanische Verbindungen oder (zumindest im hochfrequenten Bereich) über die verteilten Streukapazitäten zur Erde fließt.

Rolle der Endgeräte

Datenendgeräte sind im allgemeinen störempfindlich. Die Beeinflussungen erfolgen vor allem durch die Störströme, die von den Kabeln "eingefangen" werden. Diese Aussage gilt entsprechend den Abmessungen der Geräte für den Frequenzbereich unter ca. 100 MHz. Über dieser Frequenz können direkte Störeinkopplungen auf die Signalleiterbahnen und die Verdrahtung im Innern der Geräte erfolgen. Die Schaltkreise reagieren allerdings bei Frequenzen über 100 MHz meist nicht mehr mit einer grossen Empfindlichkeit.

Die Gleichtaktstörströme, welche in die Kabel eingekoppelt werden, fließen, wenn keine Schutzmassnahmen getroffen werden, in die Endgeräte hinein und über die Schaltungen zur Erde ab. Sie erzeugen auf den Leiterplatten Spannungsabfälle und Störfelder, die zu Fehlfunktionen der Logik führen.

Schutzmassnahmen

Mit hochfrequenten Gleichtaktstörströmen ist immer und überall zu rechnen. So werden z.B. bei jeder Ausschaltung von induktiven Lasten (Schützspulen, Relaisspulen, Leuchtstofflampen, usw.) einige Dutzend pulsformige Störfelder, die ein Störspektrum bis über 100 MHz aufweisen, ausgesendet. Es ist deshalb absolut notwendig, entsprechende Schutzmassnahmen zu treffen. Folgende Möglichkeiten stehen zur Verfügung:

1. Filterung

Die Filterung besteht darin, zwischen jeder Ader der Anschlusskabel und dem Gehäuse oder der HF-Potentialausgleichsfläche des Endgerätes einen Kondensator kleinen Wertes oder ein Tiefpass-Filter zuzuschalten. Dadurch werden die hochfrequenten Störströme direkt beim Eintritt in das Gehäuse zur Erde abgeleitet. Diese Massnahme ist jedoch nur möglich, wenn die Bandbreite des Nutzsignals nicht zu gross ist, da sonst das Nutzsignal durch das Filter ebenfalls gedämpft wird. Deshalb ist diese Lösung für Netzwerke mit hohen Taktfrequenzen nicht zu empfehlen.

2. Galvanische Trennelemente

Galvanische Trennelemente wie Trenntransformatoren, Optokoppler, Relais usw. verhindern nur im niederfrequenten Bereich das Fliessen von Gleichtaktströmen. Im hochfrequenten Bereich (über einigen 100 kHz) stellen sie, bedingt durch die Streukapazität zwischen Primär- und Sekundärkreis, gegenüber Gleichtaktstörungen praktisch einen Kurzschluss dar.

3. Baluns

Bild 9.7 zeigt das Prinzip einer symmetrischen Übertragung mit Baluns. Die Störspannungen, die durch Gleichtaktstörströme an beiden leitungsseitigen Wicklungen des Baluns entstehen, heben sich theoretisch auf, da sie gegensätzlicher Polarität sind. Bedingung dafür ist, dass die beiden Symmetrierewicklungen des Baluns total identisch sind. Praktisch ist dies sehr schwer zu realisieren. Man erreicht wegen dieser Unsymmetrie in den besten Fällen Gleichtaktunterdrückungsverhältnisse von ca. 1 zu 1'000.

Eine niedrige Impedanz zwischen dem Erdungsanschluss des Baluns und dem Gerätegehäuse ist von entscheidender Bedeutung. Vor allem im hochfrequenten Bereich bewirkt eine hohe Erdungsimpedanz des Baluns eine starke Verschlechterung des Gleichtaktunterdrückungsverhältnisses. Die Erdung der Balune an beiden Leitungsenden führt zur Entstehung einer Erdschleife. Durch Erdrückströme oder bei Blitzschlägen kann es zur Zerstörung der Balune kommen. Balune bieten den Vorteil, dass sie gleichzeitig der Impedanzanpassung dienen.

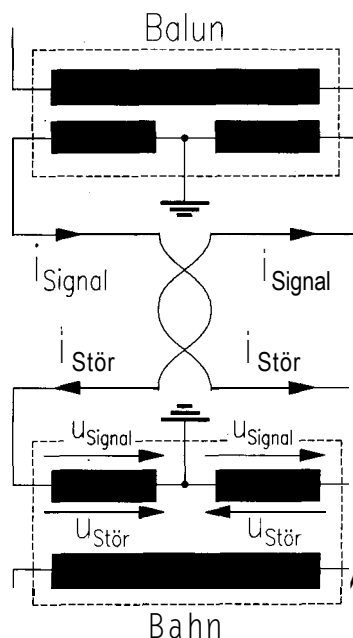


Bild 9.7: Signal-Übertragung mit Baluns

4. Geschirmte Kabelsysteme

Der Schirm eines geschirmten Kabels muss, damit eine Schutzwirkung erzielt wird, an beiden Enden geerdet sein. Der Schirm stellt zwischen beiden Endgeräten praktisch einen Kurzschluss dar und verhindert so die Entstehung einer Störspannung bei den Endgeräten.

Die Art der Erdung des Schirms ist dabei von grösster Bedeutung. Er muss direkt mit dem Gehäuse der Endgeräte kontaktiert werden. Dies kann mittels metallischen Steckergehäusen, PG-Verschraubungen oder Befestigungsbriden erfolgen. Für die Erdung von Kabelschirmen sind Litzen unbrauchbar, da ihre Induktivität bei hohen Frequenzen eine hohe Impedanz darstellt.

Besonders wichtig ist auch, dass der Schirm über die ganze Länge einer Verbindung, inklusive Zwischenstecker, die Adern des Kabels konzentrisch umschliesst. Zu diesem Zweck muss der Schirmungsqualität der Stecker grosse Sorgfalt gewidmet werden. Die Schirmungsqualität der Stecker und der Kabel wird durch die sogenannte Kopplungs-Impedanz bestimmt.

Ein geschirmtes System mit einem guten Steckermaterial, das richtig installiert wurde, stellt nach dem heutigen Stand der Technik für Hochgeschwindigkeitsdatennetzwerke, auf Grund der hohen Bandbreite der Nutzsignale, die beste Schutzmassnahme gegen Gleichtaktstörströme dar.

5. Verkleinerung der Schleifenfläche

Die Höhe der Gleichtaktstöreinkopplung hängt hauptsächlich von der Schleifenfläche zwischen den Kabeln und der Erde ab. Diese Fläche sollte in jedem Fall, parallel zu den anderen besprochenen Schutzmassnahmen wie Filterung, symmetrische Übertragung oder Abschirmung, so stark wie möglich reduziert werden. Für sich allein ist diese Massnahme ungenügend.

Die beste Art, die Schleifenfläche zu reduzieren, besteht darin, die Kabel in metallischen oder leitfähigen, geerdeten Kanälen zu verlegen.

6. Ferrit-Ringe

Durch Erhöhung der Impedanz der Schleife, die aus dem Kabel, den Gehäusen der Endgeräte und der Erde besteht, kann der eingekoppelte Störstrom reduziert und somit die Beeinflussung der Endgeräte verringert werden. Ferrit-Ringe sind Elemente, die, wenn sie um das ganze Kabel plaziert werden, eine Erhöhung der Schleifenimpedanz bewirken. Allerdings ist die Erhöhung von einigen 100Ω , die damit erreicht werden kann, meist ungenügend. Diese Massnahme sollte dementsprechend nur punktuell und in Ergänzung zu anderen Mitteln bei gestörten Anlagen zum Einsatz kommen.

Blitzschutz

Wegen der bereits erwähnten grossen räumlichen Ausdehnung, sind Datennetzwerke bei Blitzschlägen besonders gefährdet. Der Blitzstossstrom kann, wenn keine besonderen Schutzmassnahmen

getroffen werden, in die Schleifenflächen zwischen den Kabelgruppen sowie zwischen Kabeln und Erde transiente Überspannungen bis über 100 kV induzieren. Diese Überspannungen können mit einem geschirmten Kabelsystem und einem einwandfreien Blitzschutz- und Potentialausgleichskonzept sehr stark reduziert werden, so dass sich in manchen Fällen der Einsatz von Überspannungsschutzelementen (Varistoren, Gasableiter, usw.) erübrigt.

Die EMV-Anforderungen von Datennetzwerken [34] sind sehr vielfältig. Entgegen der oft verbreiteten Meinung, dass vor allem das verwendete Kabelsystem die EMV-Eigenschaften beeinflusst, muss festgehalten werden, dass es vielmehr die Datennendgeräte sind, die diese Eigenschaften massgebend bestimmen. Es liegt in der Verantwortung der Hersteller, an den Endgeräten Schutzmassnahmen zu treffen, die einen störsicheren Betrieb gewährleisten. Bezüglich EMV besteht die Rolle des Verkabelungssystems "lediglich" darin, in bestimmten Fällen (z.B. wenn es geschirmt ist) die Störsicherheit der Endgeräte zu erhöhen.

9.4 EMV und Antriebstechnik

Eine geregelte, stromrichter gespeiste Asynchronmaschine lässt sich prinzipiell auf das Regelsystem des **Bildes 9.8** reduzieren. Diese besteht aus

- der Regeleinrichtung: Drehzahl- oder Stromregler und Leistungsstellglied (Stromrichter)
- der Regelstrecke: Asynchronmotor und Arbeitsmaschine
- und dem Messgeber: Drehmoment/Drehzahl (Tachogenerator)

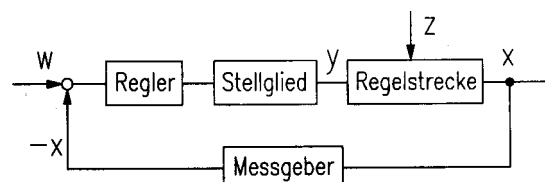


Bild 9.8: Antriebs-Regelsystem

Der Regeleinrichtung wird eine Führungsgrösse w (z.B. Drehzahlsollwert) vorgegeben. Es ist Aufgabe der Regeleinrichtung mittels der Stellgrösse y (z.B. ASM-Erregerstrom) so auf die Regelstrecke einzuwirken, dass bei einer Änderung der

Störgrösse z (z.B. Laständerung der Arbeitsmaschine) die sich ergebende Differenz zwischen Führungsgrösse w und Regelgrösse x (z.B. Drehzahl) schnell und schwingungsarm wieder zu Null gemacht wird.

Auswirkungen bekannter Störgrössen wie Netzspannungsschwankungen, Temperatur- oder Widerstandsänderungen lassen sich aufgrund der vorgegebenen Anlagenspezifikationen abschätzen. Störgrössen können aber auch als elektromagnetische Beeinflussung auf Verbindungsleitungen und Baugruppen des Regelsystems einwirken. Deshalb ist sicherzustellen, dass zwischen Antriebssystem und Umgebung elektromagnetische Verträglichkeit besteht.

Bei der Entwicklung und dem Einsatz von elektrischen Antriebssystemen ist z.B. darauf zu achten, dass die durch das Schalten der Stromrichter ausgelösten transienten Vorgänge die eigene Steuer- und Regelelektronik nicht stören. Typische Massnahme dagegen ist die Verringerung dieser Netzurückwirkungen durch lokale Einzelkompensation mit Saugkreisen und Filtern.

Bereits im Planungsstadium komplexer Antriebssysteme sollten EMV-Aspekte umfassend berücksichtigt werden. Der gezielte Einsatz EMV-förderlicher Komponenten und Massnahmen (z.B. EMV-Plan) lässt nach **Bild 9.9** bei anfänglich höherem Präventiv-Aufwand **K_P** spätere EMB-Probleme (EMB = Elektromagnetische Beeinflussung) mit nur geringer Wahrscheinlichkeit auftreten und damit geringe Nachbesserungskosten **K_N** anfallen.

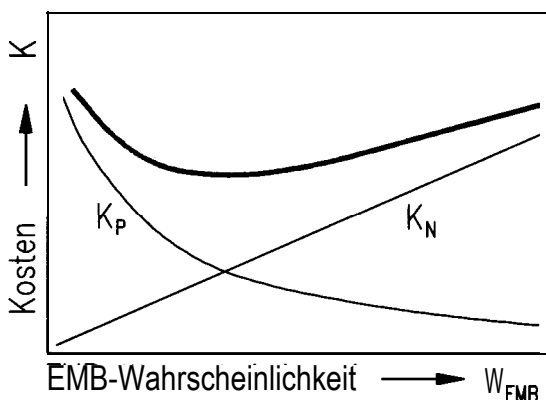


Bild 9.9: Kostenvergleich

9.5 Installationshinweise

Mit geeigneten Massnahmen [35], [36] können Störgrössen im Bereich Funkentstörung und Störfestigkeit elektronischer Systeme auf ein verträgliches Mass reduziert werden. Die Kombination von Erdungs/Schirmungs-Massnahmen mit Entstörfiltern erlaubt einen sicheren Betrieb. Durch gute **Erdung** müssen asymmetrische Störströme mit möglichst geringer Impedanz zur Störquelle zurückgeführt werden.

- Bei der Montage von Frequenzumrichtern und Filtern ist die beste Erdungsmöglichkeit auszuwählen
- Einzelne Komponenten sind grossflächig zu kontaktieren (Skin-Effekt), Wenn erforderlich Lackierung entfernen.
- Leitfähige Gehäuseteile miteinander verbinden
- Zentralen Erdungspunkt fixieren (Ausgleichsschiene)

Die Beeinflussung benachbarter elektronischer Anlagen durch abgestrahlte Störenergie kann durch gute **Schirmung** verhindert werden.

- Leistungselektronische Baugruppen hoher Leistung metallisch kapseln
- Kabel zwischen Umrichter und Motor schirmen
- Steuerleitungen geschirmt verlegen
- Den Schirm digitaler Steuerleitungen beidseitig und grossflächig mit Erde verbinden
- Den Schirm analoger Steuerleitungen hoher Impedanz einseitig und mit Erde verbinden
- In jedem Fall grossflächige Schirmung sicherstellen

Hochfrequente Störgrössen die über Netzkabel auf benachbarte Baugruppen einwirken müssen durch **Filterung** eliminiert werden.

- Einbauhinweise der Lieferfirmen befolgen
- Filter und Umrichter auf gemeinsamer metallischer Platte montieren
- Filter möglichst nahe am Umrichter montieren
- Filter können Ableitströme erzeugen und sind deshalb gut zu erden

9.6 EMV-Normen

EMV-Normen der obersten Ebene sind Empfehlungen der CISPR (Comite International Special des Perturbations Radioelectriques) die ausschliesslich dem Schutz der Funkdienste dienen und durch länderspezifische Zusätze ergänzt werden.

EMV-Normen auf europäischer Ebene (CEBEKEC und EFTA) dienen der Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Elektromagnetische Verträglichkeit (Amtsblatt L139/19) wobei der Schutz des Verbrauchers im Vordergrund steht. Schutzziele und Vorgehensweise für die EMV wurden definiert.

Richtlinien der Europäischen Union

Die wichtigsten Ziele der EWG-Richtlinien [37] im Bereich der Technik können folgendermassen zusammen gefasst werden:

- Realisierung der technischen Harmonisierung
- Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten
- Bereitstellung von Instrumenten für die Bewertung der Konformität
- Ermöglichung der gegenseitigen Anerkennung der Konformität
- Ermöglichung der gegenseitigen Anerkennung der Allgeneinzulassungen

Die meisten Richtlinien bezwecken die Gewährleistung der Sicherheit von Personen, die Verhinderung von unzulässigen Emissionen auf die Umwelt (z.B. Richtlinie 89/336 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)), den Schutz der Konsumenten oder das Verhindern von Monopolen (z.B. Endeinrichtungen der Telekommunikation).

Der Inhalt der Richtlinien umfasst im Prinzip als wichtigste Punkte:

- die allgemeinen Anforderungen, welche die Produkte erfüllen müssen,
- die für die Konformitätsbewertung anzuwendenden Verfahren.

Die Richtlinien der EU werden durch den Rat der Europäischen Gemeinschaften erlassen und im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften veröffentlicht.

Die Mitgliedstaaten müssen die erforderlichen Massnahmen treffen, um diesen Richtlinien nachzukommen. Dies erfolgt, soweit notwendig, indem sie ihre bestehende Gesetzgebung anpassen oder eine entsprechende neue Gesetzgebung schaffen.

Akkreditierte Stellen

Eine akkreditierte Stelle ist eine Stelle, die über eine Akkreditierungsbescheinigung verfügt, bzw. welche die EN 45000 Normenreihe erfüllt.

Die Akkreditierungsbescheinigung wird erteilt, wenn eine Stelle beweist, dass sie über die notwendigen Kenntnisse, Personal, Ausrüstung, Unparteilichkeit und Unabhängigkeit verfügt (EN 45001), um eine bestimmte Prüfaufgabe normgerecht durchführen zu können. Sie muss dazu auch ein Qualitätssicherungssystem (im Prinzip auf der Basis der europäischen Norm EN 29003) unterhalten.

In der Schweiz ist das Eidgenössische Amt für Messwesen (EAM) für die Akkreditierung von Prüflaboratorien zuständig. Die Volksabstimmung vom 6. Dezember 1992 hat keinen direkten negativen Einfluss auf die Akkreditierung.

Zuständige Stellen

Einzelne Richtlinien (z.B. die Richtlinie 89/336 über EMV) verlangen für den Fall, dass der Hersteller die harmonisierten europäischen Normen nicht angewandt hat, dass er einen technischen Bericht oder eine Bescheinigung einer zuständigen Stelle zur Verfügung der zuständigen Behörden hält. Es handelt sich um eine zusätzliche Stufe zwischen der Akkreditierung und der Notifizierung. Die Anerkennung der Zuständigkeit muss auf eine der folgenden Arten geschehen:

- über eine Akkreditierungsstelle, die durch die zuständige Behörde des Mitgliedstaates anerkannt wird;
- durch eine Stelle, welche die zuständige Behörde des Mitgliedstaates vertritt.

Die Schweiz hat, seit der Abstimmung vom 6. Dezember 1992, keine Möglichkeit zuständige Stellen zu ernennen. Es erscheint jedoch denkbar, dass schweizerische akkreditierte Prüflaboratorien von zuständigen Behörden in EWR-Mitgliedstaaten als zuständige Stellen anerkannt werden können.

Zuständige Behörden

Die Ämter die in den einzelnen Mitgliedstaaten damit beauftragt sind, die Verpflichtungen gegenüber der EU zu vollziehen, werden als zuständige Behörden bezeichnet. Sie sind es, die die Notifizierung der benannten Stellen vornehmen.

Aufgaben der Hersteller

Die Konformitätsbewertungsmodule definieren nicht nur den Beizug und die Aufgaben von benannten (notifizierten) Stellen, sondern sie spezifizieren auch die Verpflichtungen der Hersteller in Bezug auf die Konformitätsbewertung.

Demnach werden den Herstellern, je nach Modul, folgende Arten von Aufgaben auferlegt:

- die technischen Unterlagen zur Verfügung der einzelstaatlichen Behörden zu halten;
- die Konformität mit den grundlegenden Anforderungen der Richtlinien zu erklären;
- die CE-Kennzeichnung anzubringen;
- der benannten Stelle ein Baumuster zu unterbreiten;
- die Konformität mit der zugelassenen Bauart zu erklären;
- ein zugelassenes Qualitätssicherungssystem zu unterhalten;
- die technischen Unterlagen vorzulegen;
- das Produkt vorzuführen;

Die meisten Richtlinien sind in hohem Masse auf die Selbstverantwortung der Hersteller ausgerichtet.

EG-Konformitätserkennung

Sämtliche Module verlangen vom Hersteller oder seinem in der Gemeinschaft niedergelassenen Bevollmächtigten, dass er beim Inverkehrbringen eines Produktes eine EG-Konformitätserklärung ausstellt. Diese Erklärung muss den zuständigen Behörden während eines Zeitraumes von zehn Jahren nach dem letzten Inverkehrbringen zur Verfügung gehalten werden.

Die schweizerischen Hersteller können die EG-Konformitätserklärung selbst ausstellen. In diesem Fall gilt allerdings die Pflicht des zur Verfügunghaltens der Unterlagen während zehn Jahren für denjenigen, der das Produkt im EWR in den Verkehr bringt. Das kann ein Vertreter oder der Kunde selbst sein.

CE-Kennzeichnung

Die CE-Kennzeichnung nach **Bild 9.10** wird auf dem Produkt, der Verpackung, der Bedienungsanleitung oder dem Garantieschein angebracht. Fällt das betreffende Produkt unter mehrere Richtlinien, so weist diese Kennzeichnung auf die Übereinstimmung mit den Anforderungen sämtlicher Richtlinien hin. Es kann gegebenenfalls mit dem Kurzzeichen der gemeldeten Stelle, welche die Baumusterbescheinigung ausgestellt hat, ergänzt werden. Gewisse Richtlinien verlangen, dass zusätzliche Angaben wie z.B. der Name des Herstellers, die Bezeichnung des Produktes, der Typ der verwendeten elektrischen Versorgung, die Kategorie des Gerätes und/oder die beiden letzten Zahlen des Jahres in dem die CE-Kennzeichnung angebracht wurde, auf dem Produkt stehen.

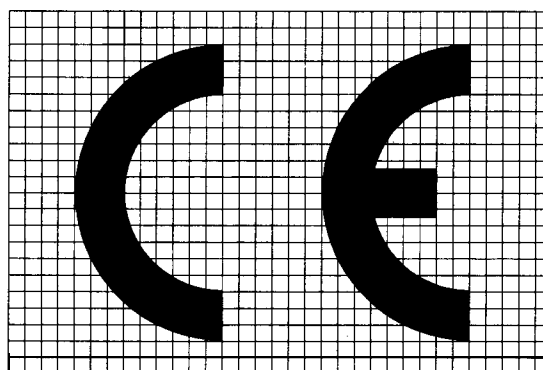


Bild 9.10: CE-Kennzeichnung

Die CE-Kennzeichnung muss vom Hersteller oder seinem im EWR ansässigen Bevollmächtigten angebracht werden. Damit ist zu verstehen, dass das EG-Konformitätszeichen in der Schweiz angebracht werden kann.

Europäische Normen

Die europäischen Normen bilden das eigentliche "Werkzeug" für die Bewertung der Konformität eines Produkts mit den Anforderungen der Richtlinien der EU. Im Prinzip werden bereits vorhandene internationale Normen möglichst so wie sie sind oder mit leichten Änderungen als europäische Normen übernommen. Mit der Zeit sollten somit überall auf der Welt die gleichen oder sehr ähnliche Normen zur Anwendung kommen.

Europäische Normen müssen harmonisiert sein, damit sie für die Konformitätsbewertung verwendet werden können. Harmonisierte europäische Normen wie z.B.

EWG Nr. 89/336

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Übergangsbestimmung ab 1. Januar 1992 Endgültige Anwendung ab 1. Januar 1996

sind Normen, deren Fundstelle im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften veröffentlicht wurde.

Anwendung der EU-Richtlinien

Während der Übergangsfrist hat der Hersteller die Wahl zwischen der Anwendung der alten nationalen Bestimmungen (im allgemeinen in jedem Mitgliedsstaat unterschiedlich) und der Anwendung der Bestimmungen, welche in den Richtlinien der EU definiert werden. Wählt er die zweite Lösung, so muss er die Konformität mit den Richtlinien erklären und die CE-Kennzeichnung anbringen.

Harmonisierte europäische EMV-Normen

Bei der "Fundstelle der Spezifikationen" handelt es sich um die harmonisierten europäischen EMV-Normen, nach denen geprüft werden muss. Die zum heutigen Zeitpunkt bereits harmonisierten EMV Normen sind nachfolgend zusammengefasst. Für die meisten Hersteller sind die Fachgrundnormen (auch "Generic" Normen genannt) EN 50081-x und 50082-x von grösster Bedeutung.

EN 500651 Übertragung von Signalen in elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3kHz bis 148,5 kHz

EN 55011 Grenzwerte und Messverfahren für Funkstörungen von industriellen, wissenschaftlichen und medizinischen Hochfrequenzgeräten (ISM-Geräten)

EN 55013 Grenzwerte und Messmethoden für die Funkstöreigenschaften von Rundfunkempfängern und angeschlossenen Geräten

EN 55014 Grenzwerte und Messverfahren für Funkstörungen von Elektrohaushaltsgeräten, handgeführten Elektrowerkzeugen und ähnlichen Elektrogeräten

EN 55015 Grenzwerte und Messverfahren für Funkstörungen von Leuchtstofflampen

EN 55020 Grenzwerte und Messverfahren der Störfestigkeit von Rundfunkempfängern und angeschlossenen Geräten

EN 55022 Grenzwerte und Messverfahren für Funkstörungen von informationstechnischen Einrichtungen

EN 60555-2 Rückwirkungen in Stromversorgungsnetzen, die durch Haushaltsgeräte und ähnliche elektrische Einrichtungen verursacht werden
Teil 2: Oberschwingungen

EN 60555-3 Rückwirkungen in Stromversorgungsnetzen, die durch Haushaltsgeräte und ähnliche elektrische Einrichtungen verursacht werden
Teil 3: Spannungsschwankungen

EN 50081-1 Elektromagnetische Verträglichkeit
Fachgrundnorm Störaussendungen
Teil 1: Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinindustrie

EN 50082-1 Elektromagnetische Verträglichkeit
Fachgrundnorm Störfestigkeit
Teil 1: Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinindustrie.

Terminplan und Übergangsbestimmungen

Der Mangel an harmonisierungsfähigen EMV-Normen hat mitunter dazu geführt, dass die endgültige Anwendung der Richtlinie bzw. der harmonisierten Normen auf den 1. Januar 1996 verschoben werden musste.

In der Zwischenzeit haben die Hersteller die Wahl zwischen den beiden folgenden Möglichkeiten:

- Anwendung der bis zum 30. Juni 1992 im jeweiligen Mitgliedstaat geltenden nationalen Bestimmungen. Diese Lösung gibt kein Recht auf das Anbringen der CE-Kennzeichnung. Damit kann das Produkt im EU- und EWR-Gebiet nicht frei verkehren und verkauft werden.
- Anwendung der harmonisierten europäischen Normen und Anbringen der CE-Kennzeichnung. Damit kann das Produkt in allen EU- und EWR-Mitgliedstaaten frei verkehren und verkauft werden

Stand der schweizerischen EMV-Gesetzgebung

Die Vermeidung von Störungen (EMV) wird in der schweizerischen Gesetzgebung durch folgende Verordnungen geregelt:

- Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse SR.734.26 (NEV) aus dem Jahr 1993
- Verordnung über elektrische Schwachstromanlagen SR.734.1 (Schwachstromverordnung) aus dem Jahr 1994
- Verordnung über elektrische Starkstromanlagen SR.734.2 (Starkstromverordnung) aus dem Jahr 1994
- Verordnung über elektrische Leitungen SR.734.31 (LeV) aus dem Jahr 1994

Das schweizerische Recht ist, dank der Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse einigermaßen kompatibel mit den Bestimmungen der EU-Richtlinie EMV.

Stand der schweizerischen EMV-Normung

Die bereits in Kraft getretenen schweizerischen EMV-Normen, in welchen die harmonisierten europäischen Normen umgewandelt wurden, sind nachfolgend aufgelistet.

SEV 3745-1 Elektromagnetische Verträglichkeit, Fachgrundnorm Störaussendungen
Teil 1: Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinindustrie

SEV 3746-1 Elektromagnetische Verträglichkeit Fachgrundnorm Störfestigkeit
Teil 1: Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinindustrie

Es ist davon auszugehen, dass diese Liste in den nächsten Jahren stark erweitert wird.

Wichtige internationale Normen für Immunität und Emission

Fachgrundnormen

EN 50082-1 (Immunität = Störsicherheit)

GENERIC-STANDARD für Wohn-, Geschäfts- und Gewerbebetriebe

EN 50081-1 (Emission = Abstrahlung)

GENERIC-STANDARD für Wohn-, Geschäfts- und Gewerbebetriebe

prEN 50082-2 (Immunität)

GENERIC-STANDARD für Industrieumgebung

prEN 50081-2 (Emission)

GENERIC-STANDARD für Industrieumgebung

Basisnormen: Immunität

prEN 61000-4-2 / IEC 801-2 / IEC 1000-4-2

ESD-Prüfung (Luft und Kontakt)

2/4/6/8kV (15kV spezial)

prEN 61000-4-4 / IEC 801-4 / IEC 1000-4-4

BURST 5/50ns, 0.5/1/2/4kV, 2.5/5kHz Taktfrq

prEN 61000-4-5 / IEC 801-5 / IEC 1000-4-5

SURGE 1.2/50 μ s, 0.5/1/2/4kV, Tol. +/-10%

EN 61000-4-11 / IEC 1000-4-11

Netzunterbrüche 100% Einbrüche 30 und 60%, Änderungen in Sekunden

Basisnormen: Emission

EN 55011 bis EN 55022

(CISPR 11, 13, 14, 15, 20, 22)

Netzgebundene Hf-Störungen

0.15 - 30MHz, Abstrahlung bis 1 GHz

Norm: Elektrische Sicherheit

EN 60204-1 / IEC 204-1 Maschinen

Isolationsspg. 500Vdc, Hochspg. 1kVac

Schutzleiter 10A Restspannung < 60V

EN 61010 / IEC 1010 Laborgeräte

bis 6kVac

EN 60355-1 / IEC 335-1 Haushaltgeräte

500Vdc, bis 3.75kVac, 500VA, Schutzleiter 25A

EN 60601-1 / IEC 601-1 Medizingeräte

EN 60950-1 / IEC 950 EDV, Büroeinrichtg.

Norm: Netzurückwirkungen

EN 60555-2 / IEC 555-2

Oberschwingungen 2-40: Grenzwerte

prEN 61000-3-2 / IEC 1000-3-2

3=2.3A, 5=1.14A, 7=0.77A usw.

EN 60555-3 / IEC 555-3

Flicker = 1 - 1620 Spannungsänderungen/Min.

EN 61000-3-3 / IEC 1000-3-3

(Flickerwert max. 1.0)

Norm: Toleranzen für Spannungsqualität

EN 50160 öffentliche Netze

Oberschwingungen, Flicker, Signalspannungen, Unterbrüche usw.

Normen: Magnetische und elektrische Felder

BUWAL (Umwelt 204) 10Hz-100kHz (Emission)

M-Feld, 50Hz, 100 μ T max., E-Feld, 5kV/m max.

DIN/VDE 0848, dc-30kHz (Emission)

M-Feld, 50Hz, 400 μ T max., E-Feld, 7kV/m max.

EN 61000-4-8 / IEC 1000-4-8 (Immunität),

M-Feld, 50Hz, 5 Stufen (1, 3, 10, 30, 100A/m)

Diese Liste enthält nicht alle Normen und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit!

10 Laborversuche zur Antriebsmesstechnik

10.1 Laborversuch L1 - Parameteridentifikation einer Asynchronmaschine

In diesem Laborversuch sollen die Parameter des elektrischen und des thermischen Ersatzschaltbildes eines ASM-Normmotors der mittleren Leistungsklasse identifiziert werden.

ASM Maschinendaten (Typenschild)

Hersteller, Typ	ABB, QU 160 M4 AK
Bauform	B3
Kühlart	oberflächengekühlt
Nennleistung	II.OkW
Nennspannung	400V
Nennstrom	225A
Frequenz	50Hz
Leistungsfaktor	0.85
Nenn Drehzahl	1460 min ⁻¹

Für die Parameteridentifikation sind folgende Messungen durchzuführen:

Bestimmung der elektrischen Parameter

- Messen der Statorwiderstände
- Leerlaufmessung
- Kurzschlussmessung

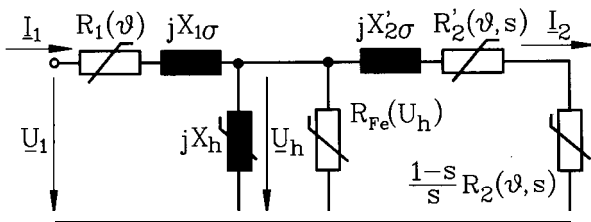


Bild 10.1: Elektrisches ASM-Modell

Statorwiderstand

Aus der Messung aller Strangwiderstände des Stators wird ein Mittelwert errechnet. Die Strom/Spannungsmessung wird mit der bereitgestellten Stromversorgung, dem Digitalvoltmeter und dem Amperemeter durchgeführt. Dabei sollte

der zulässige Strangnennstrom nicht überschritten werden (Sternschaltung - zwei Spulen in Serie).

Leerlaufmessung

Im Leerlauf ist die magnetische Energie im Hauptfeld gespeichert. Dieses durchsetzt das Statorjoch, den Luftspalt und das Rotoreisen. Die der Leerlaufspannung proportionale Magnetische Induktion sättigt das Eisen womit sich ein nichtlinearer Zusammenhang von Strom und Spannung feststellen lässt.

Für die Leerlaufmessung wird die Statorwicklung in Dreieck geschaltet und die Klemmenspannung über einen Regeltransformator eingestellt. Die Leerlaufkennlinie $U_0 = f(I_0)$ ist punktweise zu bestimmen und die Reaktanz $X_1 = X_{1\sigma} + X_{1h}$ ist zu berechnen.

$$\text{Leerlaufreaktanz} \quad X_{1\sigma} + X_h = U_{10}^2 / Q_{10}$$

$$\text{Hauptreaktanz} \quad X_h = X_h(U_h)$$

$$\text{Eisenverluste} \quad R_{Fe} = R_{Fe}(U_h)$$

Kurzschlussmessung

Im Kurzschlussversuch wird die ASM blockiert womit sie sich wie ein kurzgeschlossener Transformator verhält. Der Grossteil der magnetischen Energie ist in diesem Falle in den Streufeldern der Nutenräume, des Luftspaltes und der Wickelköpfe gespeichert.

Der 1.5-fache Nennstrom sollte nicht überschritten werden! Die Kurzschlusskennlinie $U_k = f(I_k)$ ist punktweise zu bestimmen und die Streureaktanzen $X_{1\sigma} + X_{2\sigma}$ sind zu berechnen.

$$\text{Streureaktanzen} \quad X_{1\sigma} + X_{2\sigma} = Q_{1k} / I_{1k}^2$$

$$\text{Wirkwiderstände} \quad R_1 + R_2' = P_{1k} / I_{1k}^2$$

Temperaturmessung

Für die Bestimmung des stationären und des dynamischen Temperaturverhaltens der belasteten Asynchronmaschine werden die sich langsam ändernden Temperaturwerte des Rotors, des Stators und der Statorwicklung nur beobachtet.

Das Erwärmen (Einschaltmodell) und Abkühlen (Ausschaltmodell) der Asynchronmaschine bis zu stationären Temperatur-Endwerten ist ein Vorgang, der sich über Stunden hinzieht und kann deshalb während der vorgegebenen Kurs-Laborzeit nicht nachvollzogen werden.

Die folgende Auswertung stützt sich deshalb auf die bereits gemessenen Temperaturverläufe für die Lastströme 14.5A und 19.6A.

Bestimmung der thermischen Parameter

- Thermische Leitwerte
- Wärme-Kapazitäten

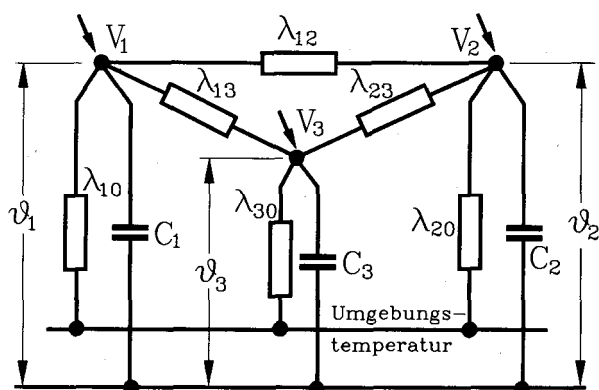


Bild 10.2: Thermisches ASM-Modell

Wärmeleitwerte (stationär)

Anhand der gemessenen Temperaturverläufe werden für zwei Lastfälle die stationären Endtemperaturen bestimmt und in die Koeffizientenmatrix des linearen Gleichungssystems

$$\begin{bmatrix} v_{1u} & 0 & 0 & -v_{21} & v_{13} & 0 \\ 0 & v_{2u} & 0 & v_{21} & 0 & v_{23} \\ 0 & 0 & v_{3u} & 0 & -v_{13} & -v_{23} \\ v_{1u}^* & 0 & 0 & -v_{21}^* & v_{13}^* & 0 \\ 0 & v_{2u}^* & 0 & v_{21}^* & 0 & v_{23} \\ 0 & 0 & v_{3u}^* & 0 & -v_{13}^* & -v_{23} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{10} \\ \lambda_{20} \\ \lambda_{30} \\ \lambda_{12} \\ \lambda_{13} \\ \lambda_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_1^* \\ V_2^* \\ V_3^* \end{bmatrix}$$

eingesetzt, wobei unter v_{1u} z.B. die Temperaturdifferenz $v_1 - v_u$, mit der Umgebungstemperatur $v_u = 23^\circ\text{C}$, zu verstehen ist.

Die rechte Gleichungsseite enthält die aufgrund der bekannten elektrischen Modellparameter berechneten Verlustleistungen V für die unterschiedlichen Lastfälle.

Wärmekapazitäten (dynamisch)

Zur Ermittlung der Wärmekapazitäten, die bei periodischen Lastvorgängen entscheidend zum Temperaturverlauf beitragen, müssen die gegebenen Temperaturverläufe $\theta(t)$ und die sich zeitlich ändernden Verluste $V(t)$ numerisch integriert werden.

$$C_1 = \frac{\int_0^t V_1(t) dt - \lambda_{10} \int_0^t (v_1 - v_u) dt - \lambda_{13} \int_0^t (v_1 - v_3) dt}{v_1 - v_u}$$

$$C_2 = \frac{\int_0^t V_2(t) dt - \lambda_{20} \int_0^t (v_2 - v_u) dt - \lambda_{23} \int_0^t (v_2 - v_3) dt}{v_2 - v_u}$$

$$C_3 = \frac{\int_0^t V_3(t) dt - \lambda_{30} \int_0^t (v_3 - v_u) dt + \lambda_{13} \int_0^t (v_1 - v_3) dt + \lambda_{23} \int_0^t (v_2 - v_3) dt}{v_3 - v_u}$$

Die dafür vorgesehenen Zeitintervalle

$$t_1: v_1 - v_u \approx \frac{1}{2} (v_{1N} - v_{3N})$$

$$t_2: v_2 - v_u \approx \frac{1}{2} (v_{2N} - v_{3N})$$

$$t_3: v_3 - v_u \approx \frac{1}{2} (v_{3N} - v_u)$$

(Index 'N' steht für stationären Nennbetrieb) beruhen auf Erfahrungswerten.

Hinweis: Bei der Bestimmung der Maschinenparameter ist zu beachten, dass das elektrische Ersatzschaltbild nur für einen Maschinenstrang gilt, im Gegensatz zum thermischen Ersatzschaltbild das die gesamte Maschine repräsentiert.

10.2 Laborversuch L2 - Bestimmung mechanischer Antriebskenngrößen

In diesem Laborversuch wird gezeigt, wie sich Massenträgheitsmomente einfacher Rotationskörper berechnen und messen lassen. Mit Hilfe eines Pendels oder Auslaufversuches (mit und ohne Hilfsschwingmasse) können Trägheitsmomente ganzer Antriebsanlagen bestimmt werden.

Massenträgheitsmomente

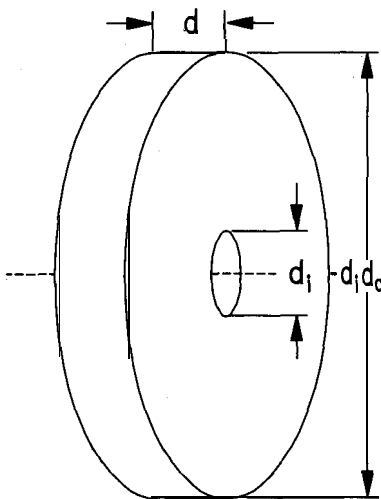


Bild 10.3: Rotationskörper (Hilfs-Schwingmasse)

Schwingmasse $m_{hi} = 17.829 \text{ kg}$

Aussendurchmesser $d_a = 274 \text{ mm}$

Innendurchmesser $d_i = 50 \text{ mm}$

Dicke $d = 40 \text{ mm}$

A) Berechnung

Das Trägheitsmoment eines Vollzylinders der Masse m mit dem Radius r wird nach der Beziehung

$$J = \frac{1}{2} m_{hi} r^2$$

bestimmt. Der vorliegende Rotationskörper mit dem Aussenradius r_a und der Dicke d weist jedoch eine konzentrische Bohrung r_i auf. Sein Trägheitsmoment J_{hi} kann deshalb mit der Formel

$$J_{hi} = \frac{1}{2} (m_R + m_i) r_a^2 - \frac{1}{2} m_i r_i^2$$

berechnet werden. Das Trägheitsmoment J_{hi} kann auch mit der Formel für einen Hohlzylinder

$$J_{hi} = \frac{1}{2} m_{hi} (r_a^2 + r_i^2)$$

bestimmt werden.

B) Messung

Bei der Messung von Massenträgheitsmomenten wird das Prinzip der parallelen Verlagerung der Schwerpunktdrehachse ausgenutzt (STEINER'scher Satz).

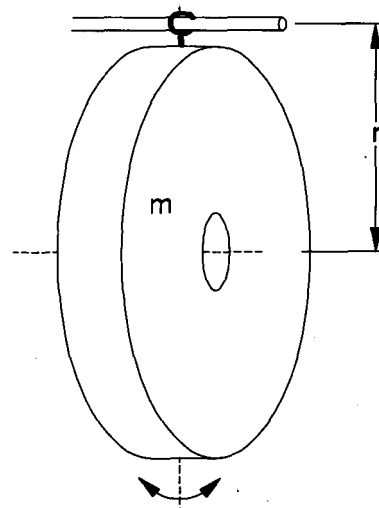


Bild 10.4: Hilfs-Schwingmasse als Pendel

Achsabstand- $r = 143 \text{ mm}$

Der Rotationskörper wird dazu in einem Punkt ausserhalb des Schwerpunktes aufgehängt und zu Schwingungen mit kleiner Amplitude angeregt. Gemessen wird die mittlere Periodendauer T , wonach sich gemäss

$$J_{hi} = mgr \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 - mr^2$$

das Trägheitsmoment der Hilfsschwingmasse berechnen lässt.

Trägheitsmoment ASM-Rotor

Berechnet wird das Trägheitsmoment eines 15kW ASM-Rotors

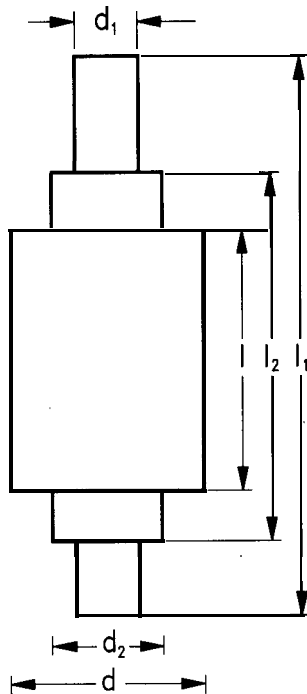


Bild 10.5: Rotor Asynchronmaschine

mit den folgenden Abmessungen

Rotormasse	$m = 27.604 \text{ kg}$
Rotordurchmesser	$d = 157 \text{ mm}$
Durchmesser Rotorachse 1	$d_1 = 45 \text{ mm}$
Durchmesser Rotorachse 2	$d_2 = 64 \text{ mm}$
Länge Rotor	$l = 146 \text{ mm}$
Länge Rotorachse 1	$l_1 = 584 \text{ mm}$
Länge Rotorachse 2	$l_2 = 276 \text{ mm}$

Der Rotor kann entweder als eine konzentrische Aneinanderreihung von 5 Vollzylindern unterschiedlicher Durchmesser oder als Überlagerung von 2 Hohlzylindern auf einem Vollzylinder angesehen werden. Das Gesamtträgheitsmoment wird dann aus der Summe der Einzelmomente berechnet.

Formel für den Vollzylinder und den Hohlzylinder

$$J_{hi} = \frac{1}{2} \sum_{\nu=1}^5 m_{\nu} r_{\nu}^2 \quad J_{hi} = \frac{1}{2} \sum_{\nu=1}^3 m_{\nu} (r_a^2 + r_i^2)$$

Auslaufversuch

Mit Hilfe des Auslaufversuches kann das Trägheitsmoment J einer Antriebsanlage bestimmt werden wenn das Bremsmoment m_b unbekannt ist. Dazu wird eine Hilfsschwungmasse vom Trägheitsmoment J_{hi} mit der Antriebswelle gekoppelt und das unterschiedliche Auslaufverhalten ausgewertet.

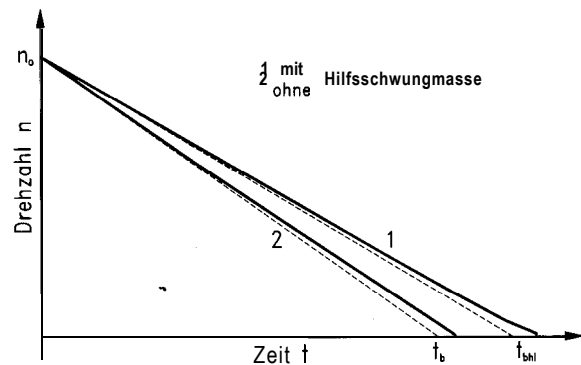


Bild 10.6: Auslaufkennlinien

Beschleunigungsmoment:

$$m_b = J \frac{dn}{dt} = 2\pi J \frac{dn}{dt} \rightarrow m_b \approx 2\pi J \frac{n_o}{t_b}$$

Rotierende Teile

$$m_b = \frac{\pi}{30} J \frac{n_o}{t_b}$$

Rotierende Teile + Hilfsschwungmasse

$$m_b^* = \frac{\pi}{30} (J + J_{hi}) \frac{n_o}{t_{bhi}}$$

Trägheitsmoment aller rotierenden Teile

$$J = J_{hi} \frac{t_b}{t_{bhi} - t_b}$$

Voraussetzung: $m_b = m_b^*$

10.3 Laborversuch L3 - Netz/Umrichterbetrieb von Asynchronmaschinen

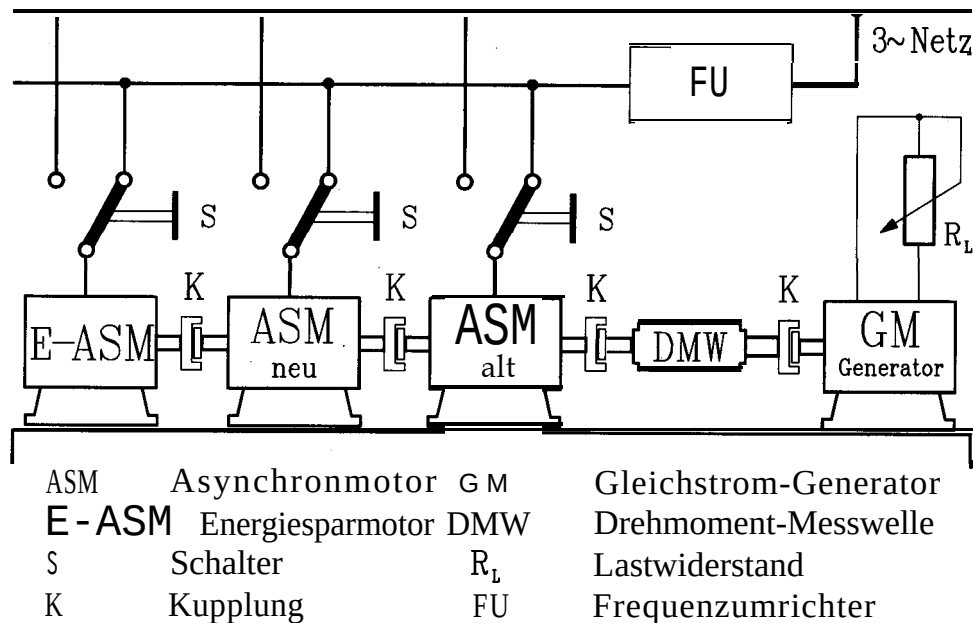


Bild 10.7: Netz/Umrichterbetrieb von Asynchronmaschinen

Dieser Laborversuch soll das unterschiedliche Betriebs- und Leistungsverhalten von Asynchronmotoren bei Netzspeisung und beim Betrieb mit Frequenzumrichtern aufzeigen und einen Überblick über Messeinrichtungen geben, mit denen ihr Leistungsvermögen beurteilt werden kann.

Die einzelnen Motoren sind gemäss Typenschild wie folgt spezifiziert:

E-ASM	VEM, 90 L2 M211 2.2kW, 220/380V, 7.7/4.45A 50Hz, $\cos\varphi = 0.88$, 2880 min^{-1}
ASM Norm	VEM, KPER 90 L2 2.2kW, 220/380V, 8.05/4.65A 50Hz, $\cos\varphi = 0.89$, 2830 min^{-1}
ASM alt	Spältli, 45 aX2 1.6kW, 220/380V, 5.0/2.9A 50Hz, Alu-Wicklung, 2780 min^{-1}
GM	BBC, GJe44 3.9kW, 110V/26A 110V Erregung, 3000 min^{-1}

Versuchsaufbau

Die zu vergleichenden Motoren *E-ASM*, *ASMneu*, *ASMalt* und der Gleichstromgenerator *G* sind über Kupplungen *K* auf der gleichen Welle montiert und können individuell an das 50Hz, 3-Phasen Drehstromnetz oder an einen Frequenzumrichter geschaltet werden.

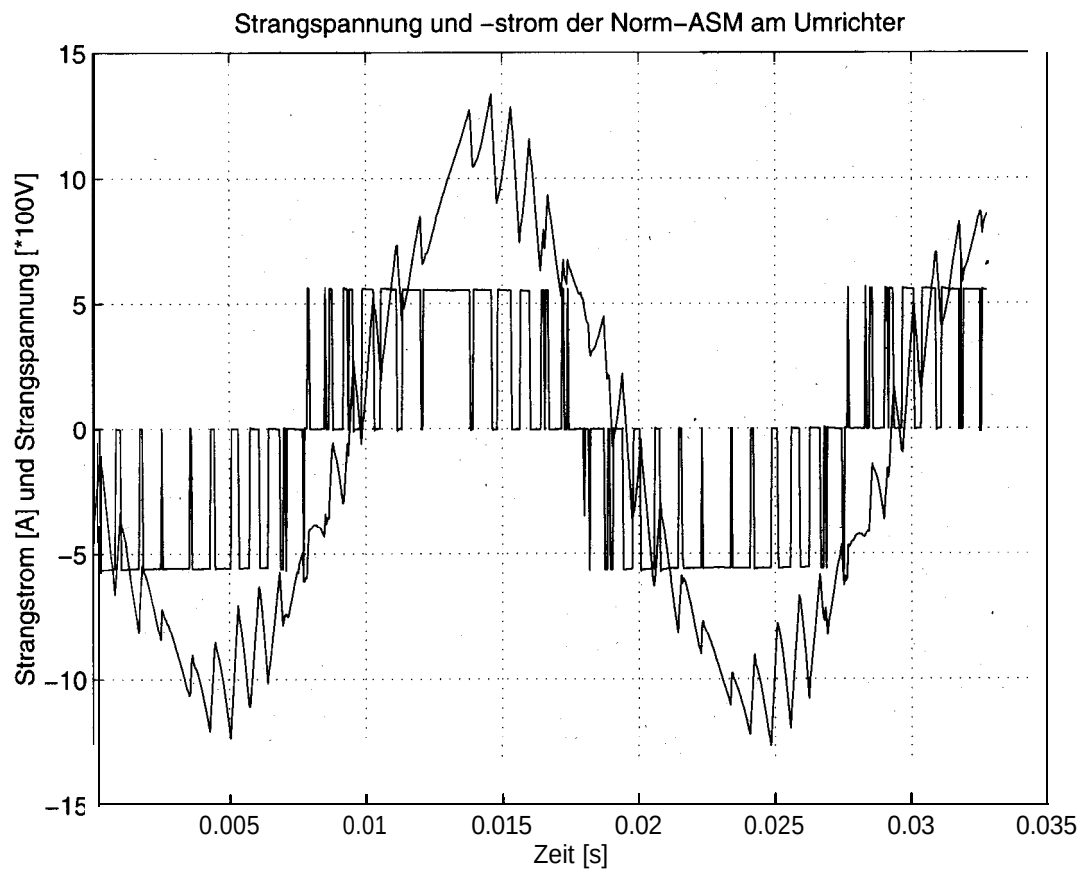
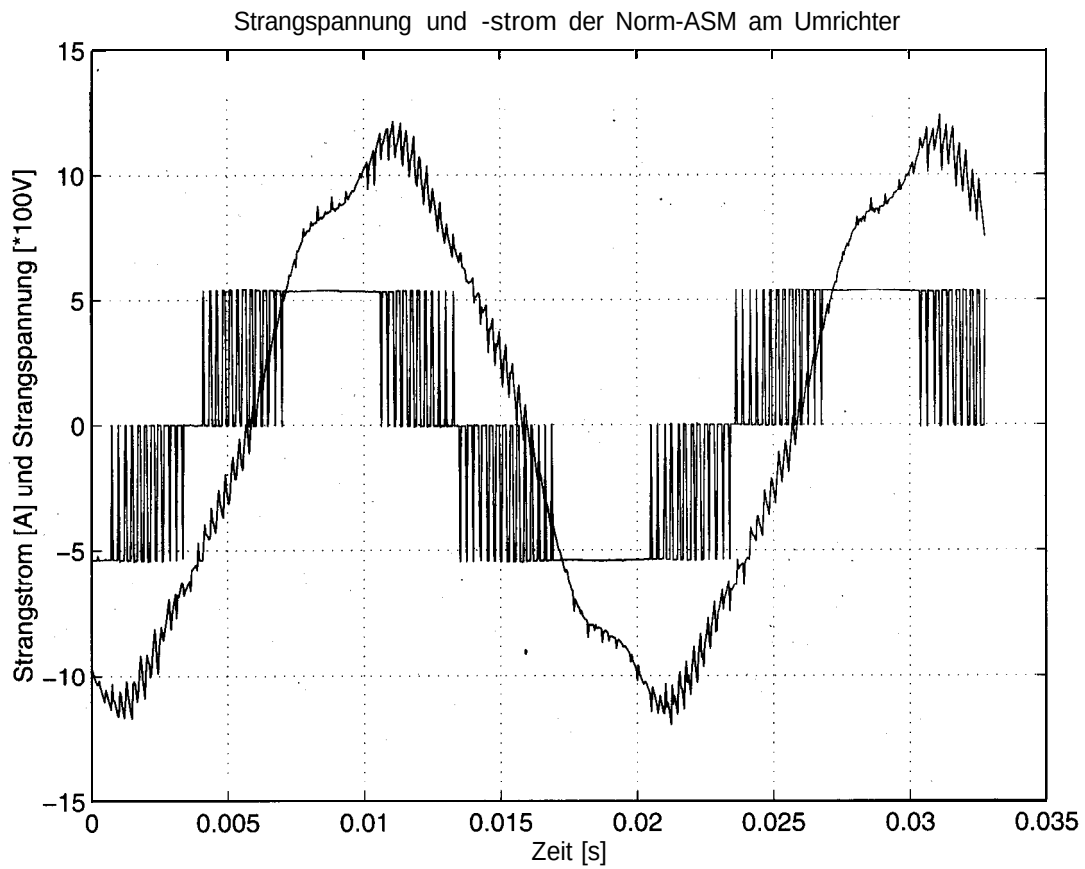
Versuchsdurchführung

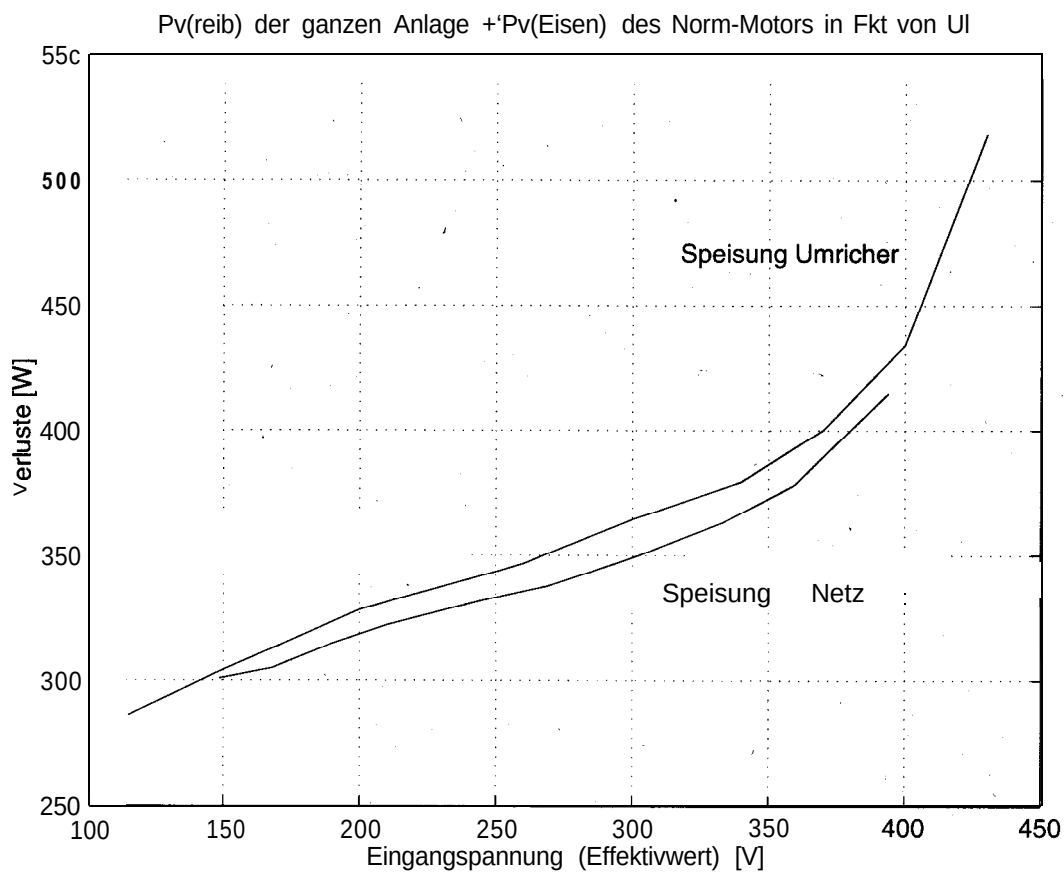
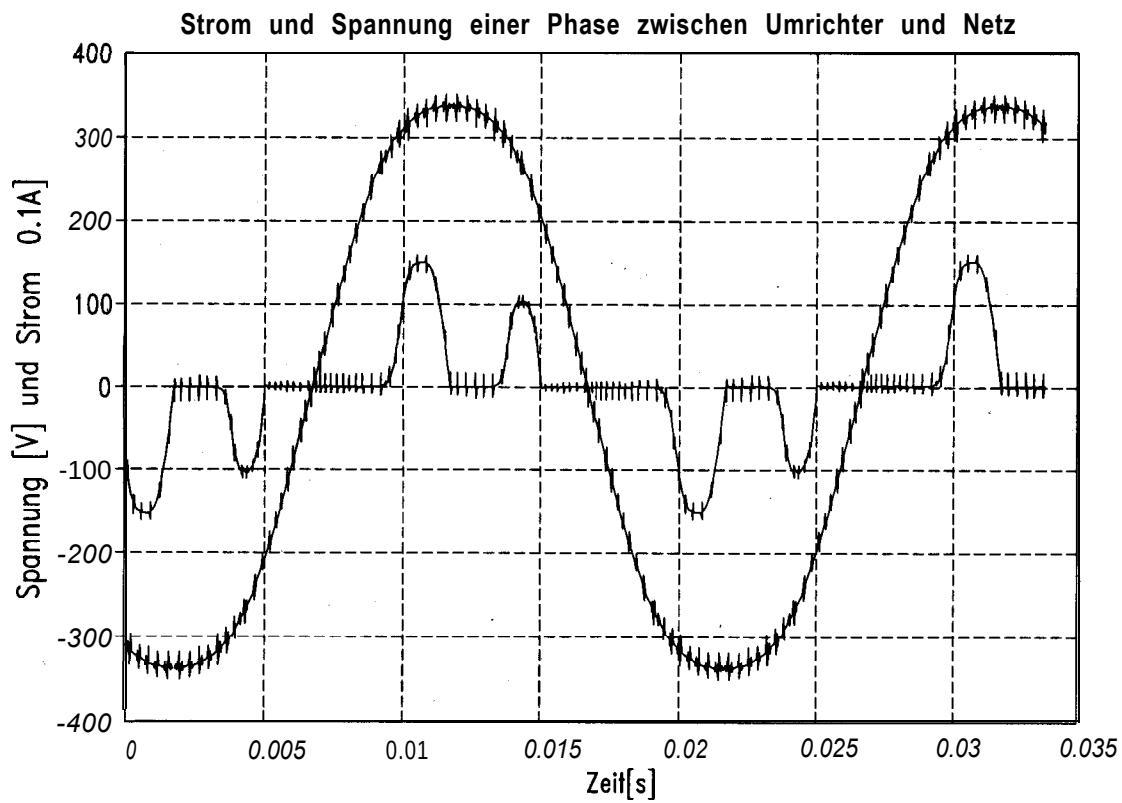
Ein Leistungsvergleich der Motoren ist insofern erlaubt, als alle Motoren das gleiche Reibmoment zu überwinden haben.. Beim Anfahren und bei dynamischen Lastwechseln wirkt das gleiche, resultierende Massenträgheitsmoment.

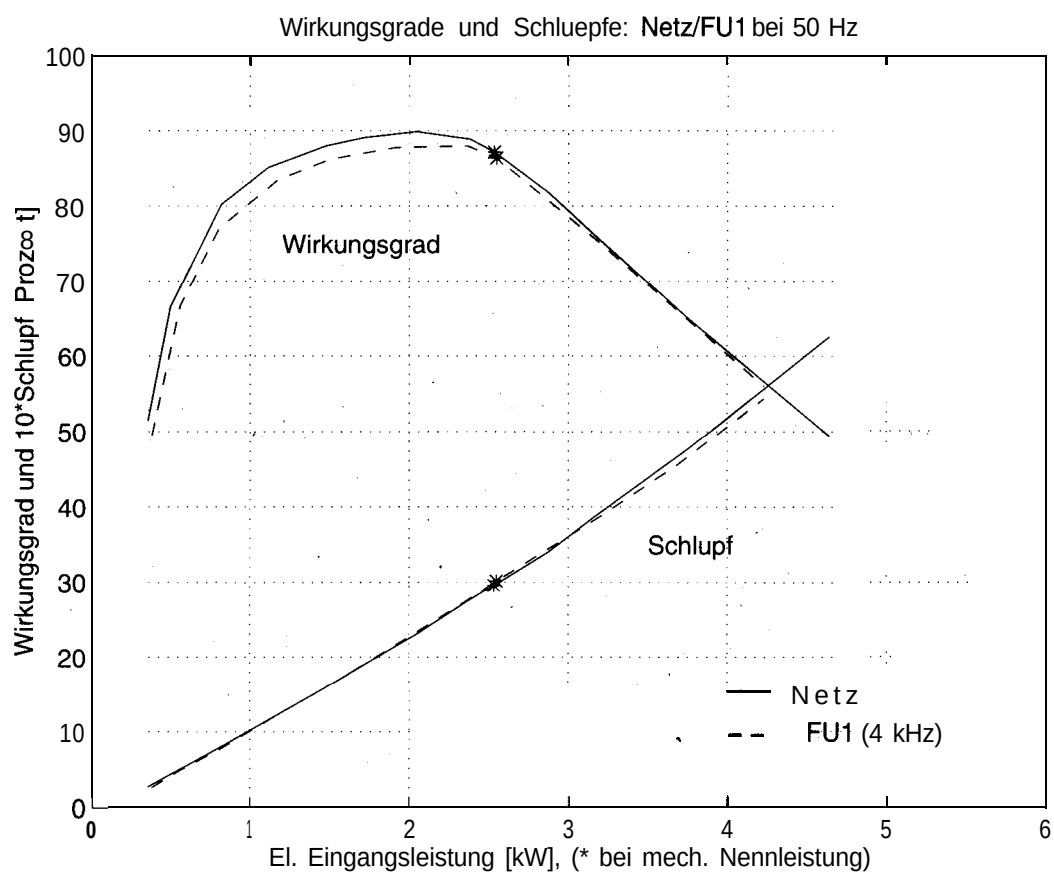
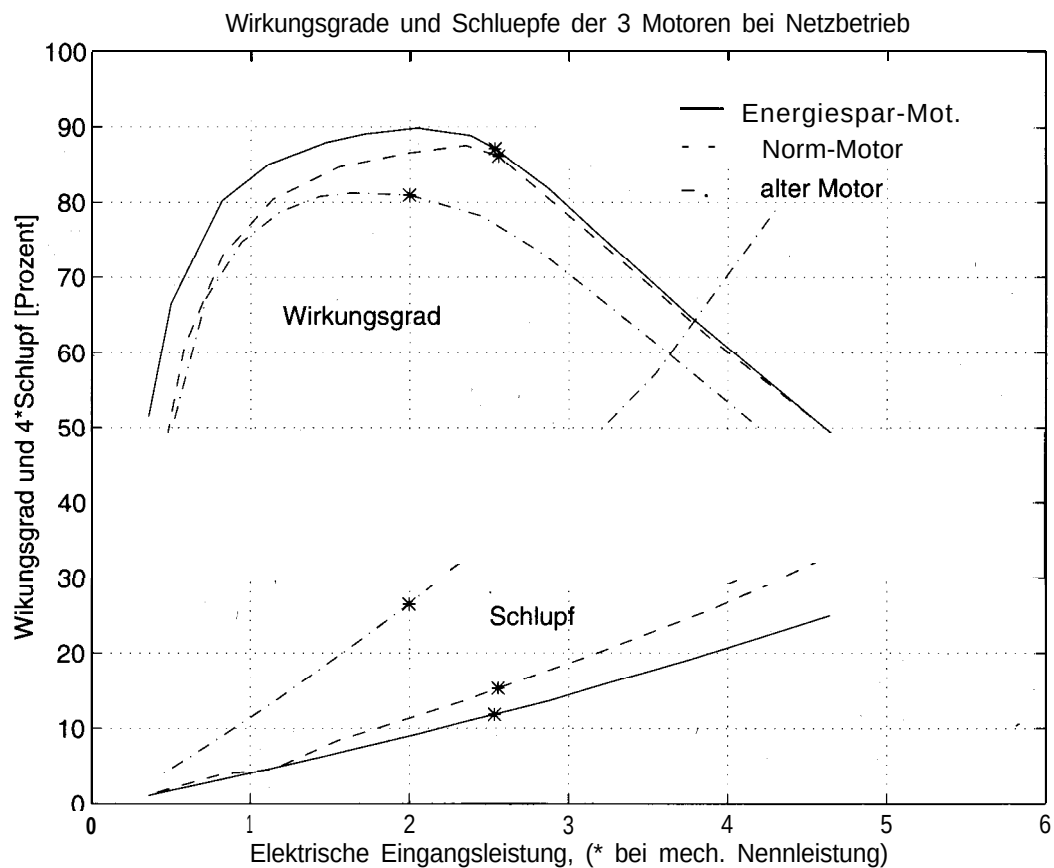
Es werden die Leistungsmessverfahren

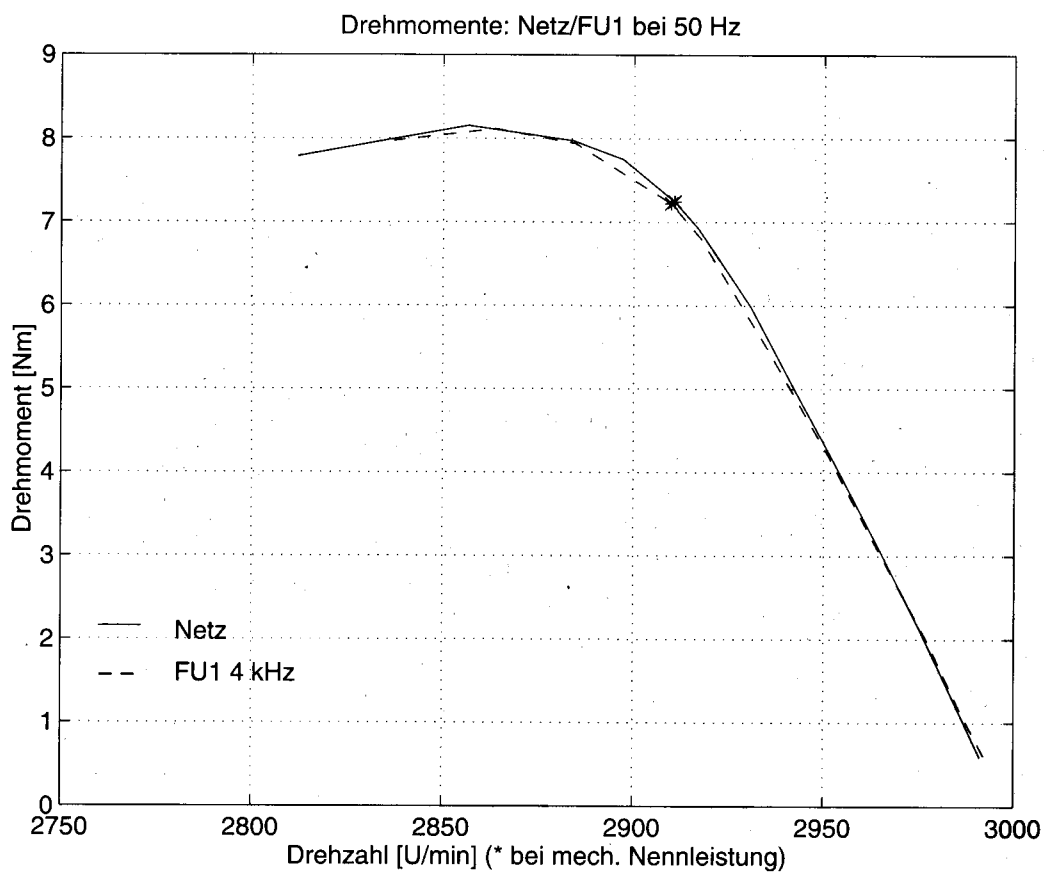
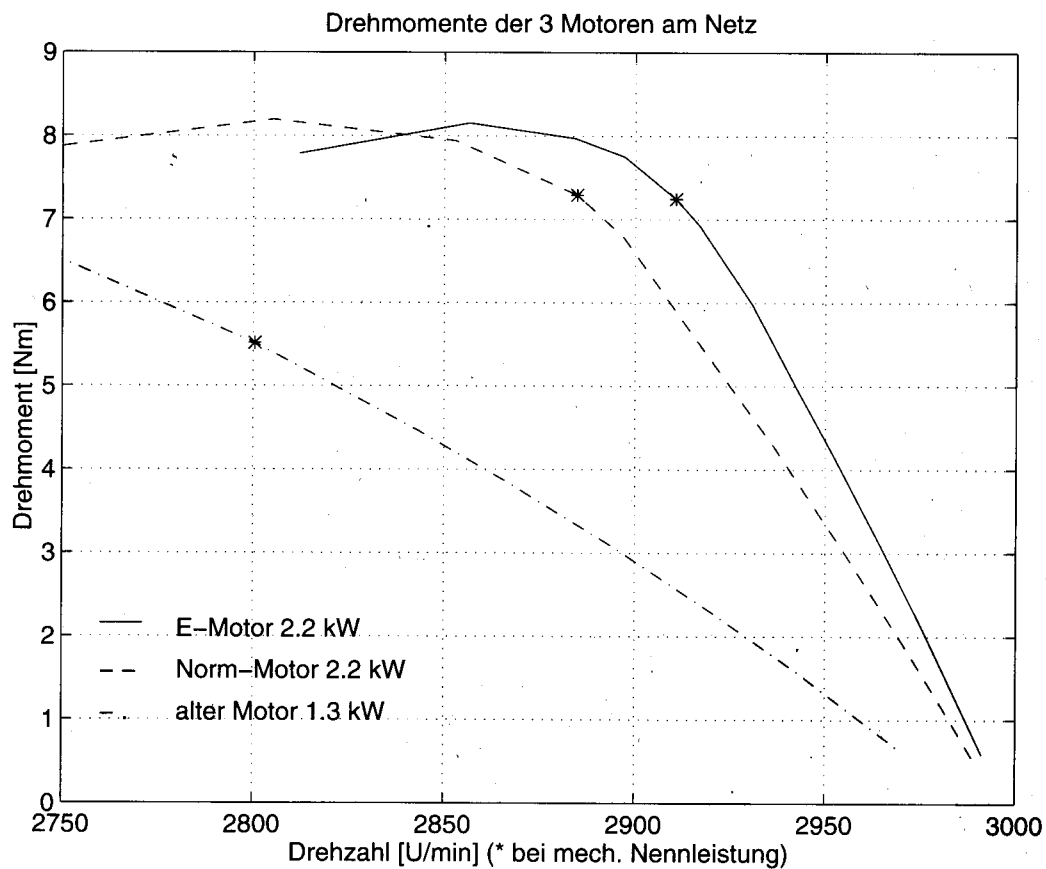
Infratek (billig, verlässlich)
Norma (teuere, komfortabel)
Labview (PC Auswertung)

demonstriert und das Preis/Leistungsverhältnis abgewogen. Die Möglichkeiten moderner Software werden diskutiert. Ergänzend dazu werden die verschiedenen Methoden zur Messung von Drehmomenten verglichen.









10.4 Demonstration D1 - ASM Leistungsvergleich Kreislumppe

E-ASM	Energiesparmotor
ASM	Normmotor
KP	Kreislumppe
VM	Durchfluss-Messung
BV	Bypass
DV	Drosselventil
K	Kupplung

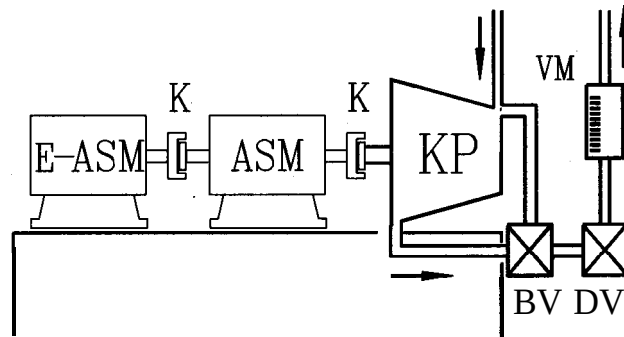


Bild 10.8: ASM Leistungsvergleich Kreislumppe

Versuchsaufbau

Mit einer Kreislumppe, die sowohl von einem ASM-Normmotor als auch von einem ASM-Energiesparmotor angetrieben werden kann, wird Wasser gefördert. Mit diesem Pumpenstand sollen die verschiedenen Methoden der Fördermengenregelung und die dazu benötigte Antriebsleistung, bzw. Energie-Einsparung, demonstriert werden.

Komponenten des Pumpenstandes

Kreislumppe	Biral, Nt 40-160/158
Normmotor	VEM, KPER 90L, 1.5 kW 1390 min ⁻¹ , $\cos \varphi = 0.86$ 220/380V, 6.05/3.5A
Energiesparmotor	VEM, KPR 90L, 1.5 kW 1430 min ⁻¹ , $\cos \varphi = 0.79$ 220/380V, 5.95/3.45A
Volumenstrommessung	Endress+Hauser promag 33 Magnetisch-induktives Durchfluss-Mess-System
Frequenzumrichter	Regatron 2.2kW, 0...100Hz

Versuchsdurchführung

Das Verhältnis der von den Motoren aufgenommenen elektrischen Leistung zur geförderten Wassermenge pro Zeiteinheit, dient als Basis für die Beurteilung der energie-optimalen Fördermethode.

Methoden der Förderstromregelung

1. **Bypass** - Mit einem Bypass-Ventil wird das Fördermedium über einen Ausgleichsbehälter direkt zum Pumpeneingang zurückgeleitet.
2. **Drosselregelung** - Ein Drosselventil reduziert ablaufseitig die geförderte Flüssigkeitsmenge.
3. **Frequenzumrichter** - Die Drehzahl der Pumpe ist mittels eines Frequenzumrichters verstellbar womit die Fördermenge gesteuert werden kann.

Messungen

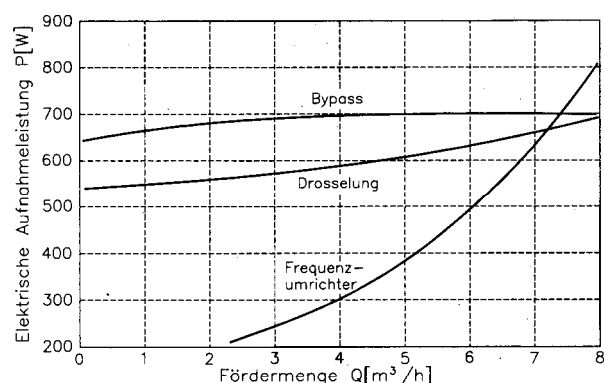


Bild 10.9: Methoden der Fördermengenregelung

10.5 Demonstration D2 - EMV Elektromagnetische Verträglichkeit

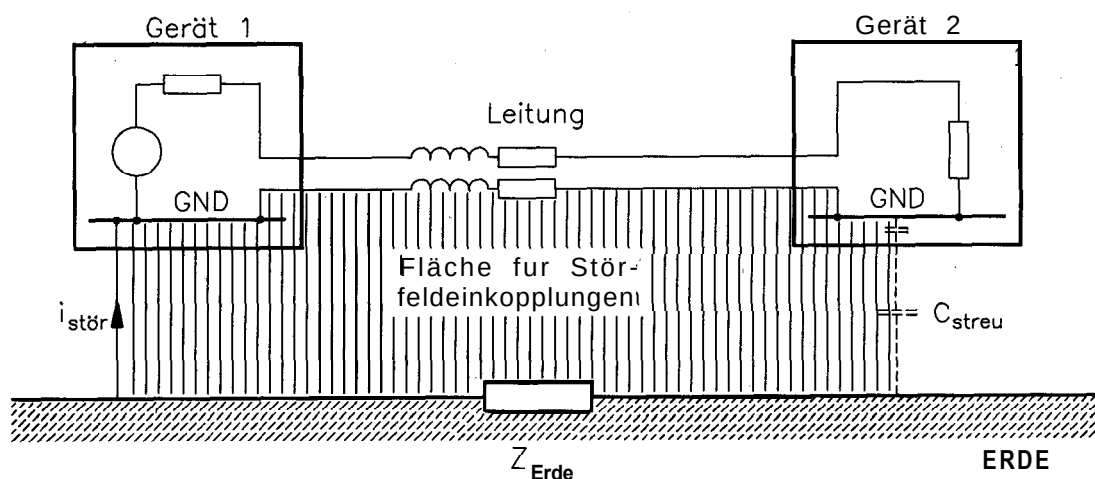


Bild 10.10: Messungen zur Elektromagnetischen Verträglichkeit

Diese Demonstration zur Elektromagnetischen Verträglichkeit beinhaltet eine Zusammenfassung der wichtigsten Regeln zur EMV-gerechten Auslegung elektrischer Geräte und zum Schutz empfindlicher, elektronischer Anlagenteile vor transienten Überspannungen und elektromagnetischen Einflüssen.

Versuchsaufbau

Mit Hilfe von 8 unterschiedlichen EMV Versuchsaufbauten werden praktische Massnahmen zum Schutz gegen elektromagnetische Störungen demonstriert und qualitativ bewertet.

EMV-Probleme

- EMV-Koppelarten
- Erde, Masse, Schirm
- Gleich- und Gegentaktunterdrückung
 - Kabelverdrillung
 - Schleifenfläche für Feldeinkopplungen
- Schirm probleme
 - Schirmmaterialien
 - Schirmung (ein/beidseitig)
- Kabelanschlüsse
 - Kabelführung in Geräten
 - Entkopplungskondensatoren

Schutzmassnahmen

Einen ausreichenden Schutz vor Effekten, die von Blitzschlägen induziert werden, bietet im Prinzip ein gutes Erdungs- und Verkabelungskonzept (minimale Schleifenflächen) der Antriebsanlagen. Darüberhinaus werden folgende Bauteile zum Schutz vor Überspannungen angeboten.

Der **Gasableiter** stellt beim plötzlichen Auftreten hoher Spannungen aufgrund seines geringen Lichtbogen-Widerstandes für Leitungen einen Kurzschluss dar, so dass schädliche Störenergie auf die Leitungen zurück reflektiert wird.

Ein **Varistor** verändert mit der Höhe der Störspannung seinen Widerstand, der umso niedriger ist je höher die anliegende Spannung ist.

Eine **Schutzdiode** wird dann eingesetzt wenn es gilt Spannungen auf einen Wert zu begrenzen der nur leicht über der Betriebsspannung liegen darf.

EMV-Messtechnik

Beim Schalten in Antriebsanlagen können hohe Überspannungen entstehen, die aufgrund von Teilentladungen z.B. Defekte an Spannungswandlern verursachen. Impedanzmessungen und Spektralanalysen transients Störströme sollen EMV Probleme dieser Art verhindern helfen.

Beachte Umfangreiches Informationsmaterial zu den Versuchen und den diskutierten EMV-Problemen wird im Kurs ausgehändigt!

Literatur

- [1] *Elektrizitätsbedarf der Zementindustrie*, RAVEL-Dokumentation 21.61d
- [2] Reichert K., Neubauer R.E., Reiche H., Berg F.: *Elektrische Antriebe energie-optimal auslegen und betreiben*, RAVEL-Dokumentation 724.331d
- [3] Schönfeld R.: *Die Technik der elektrischen Antriebe*, VEM Handbuch, VEB Verlag Technik, Berlin, 1986
- [4] Stöckl, Winterling K.: *Elektrische Messtechnik*, B.G.Teubner, Stuttgart, 1968
- [5] Laschet A.: *Simulation von Antriebssystemen*, Fachberichte Simulationen, Springer Verlag, Berlin 1988
- [6] Profos P.: *Handbuch der industriellen Messtechnik*, Vulkan Verlag, Essen, 1974
- [7] Rohrbach Ch.: *Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen*, VDI Verlag Düsseldorf, 1967
- [8] Bystron K., Fleig O., Wartenberg D.: *Projektion von Normmotoren*, Siemens Sonderdruck Energietechnik,
- [9] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH: *Drehmomentmesswellen richtig einsetzen*, Darmstadt, 1995
- [10] Simond J.J.: *Digitale, transiente Drehmomentmessung für elektrische Maschinen*, EPFL Lausanne LEME, 1994
- [11] Silex Industrial Automation Ltd: *New Method of Electric Torque and Power Measurement*, H-1751 Budapest Pf 93
- [12] Jordan, H., Klima V., Kovacs P.: *Asynchronmaschinen*, Vieweg, Braunschweig, 1975
- [13] Nürnberg W.: *Die Prüfung elektrischer Maschinen*, Springer, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1959
- [14] Infratek AG, CH-8707 Uetikon am See
- [15] NORMA Messtechnik AG, A-2351 Wr. Neudorf
- [16] MicroSim Corporation, Designcenter 3
- [17] Thalmann, M.: *Oberschwingungsanalyse*, Regatron AG, CH-9323 Steinach
- [18] Schweizer Norm *Begrenzung von Beeinflussungen in Strom versorgungsnetzen*, SN 413600 SEV 3600
- [19] Yang S.J., Ellison A.J.: *Noise and Vibration*, Handbook of Electrical Machines, Mc Graw-Hill, 1987
- [20] Gutt, H.-J.; Zeller, Th.: *Self-Learning Temperature-Simulation- System for Thermal Protection of Squirrel-Cage-Motors*, ICEM 88
- [21] Schönfeld R., Habiger E.: *Automatisierte Elektroantriebe*, Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 1981
- [22] Gesellschaft für ingenieurtechnische Informationsverarbeitung *Antriebs-Simulationssoftware*, Bergstrasse 69, D - 01069 Dresden
- [23] imc Mess-Systeme GmbH: *PI Prüfsysteme*, D - 13355 Berlin
- [24] Schenk AG: *Vollautomatische Fehlerdiagnose in der Serienfertigung von Elektromotoren*, VDI Sonderdruck, 1992, CH - 8606 Nänikon
- [25] Hütte: *Taschenbuch für Elektrotechnik*, Bd. 2 Geräte Springer Verlag Berlin
- [26] Kleinrath H.: *Stromrichtergespeiste Drehfeldmaschinen*, Springer Verlag Wien, 1980
- [27] Leonhard W.: *Control of Electrical Drives*, Springer Verlag Berlin, 1985
- [28] Binder, A.: *Armature insulation stress of low voltage ac motors due to inverter supply*, ICEM Proceedings, pp.431-436, Paris, 1994
- [29] Hentschel E., Niedermeier K., Schäfer K.: *Beanspruchung der Wicklungsisolierung von Drehstrommaschinen*, etz, vol.114, pp.1074-1077. 1993
- [30] Umrichter katalog Simovert Master Drives, *Spannungszwischenkreisumrichter für Drehstromantriebe 6SE70 - 2.2 bis* Katalog Nr. DA65.1, Siemens AG, Erlangen

- [31] Bose, B.K.: *Power Electronics and AC Drives*, Verlag Prentice-Hall, NJ, 1986
- [32] Schwab A.J.: *Elektromagnetische Verträglichkeit*, Springer Verlag Berlin, 1990
- [33] DIN-VDE Taschenbuch: *Elektromagnetische Verträglichkeit 1*, VDE-Verlag Berlin, 1991
- [34] Hirschi W.: *EMV-Anforderungen an Daten-netzwerke*, EMC Fribourg SA, 1994
- [35] *Installationsrichtlinien zur Reduzierung von EMV-Problemen in der Antriebstechnik*, Schaffer Elektronik AG, CH-4708 Luterbach
- [36] Hirschi W.: *EMV-gerechte Auslegung eines elektronischen Gerätes*, Bulletin SEV/VSE 83, 1992
- [37] Hirschi W.: *Konformität von schweizerischen Produkten mit den Bestimmungen der Europäischen Union*, EMC Fribourg SA, 1994

Messen von Betriebsparametern elektrischer Antriebe

Richtig dimensionierte Antriebe verbessern die Energie-Effizienz, die Betriebssicherheit, die Leistung und die Wirtschaftlichkeit der Maschinen und Anlagen. Alle Faktoren, die für die Wettbewerbsfähigkeit entscheidend sind. Eine exakt auf die Anforderungen abgestimmte, schlanke Auslegung der Antriebe ist aber nur möglich, wo die Antriebsparameter wie träge Massen, mechanische und elektrische Verluste und die Betriebstemperatur, durch messtechnische Analysen exakt ermittelt und bestimmt wurden. Wie werden mit modernen Messmethoden die charakteristischen Betriebsparameter von elektrischen Antriebssystemen ermittelt, um damit die Voraussetzungen für energieeffizientere, konkurrenzfähige Maschinen und Anlagen zu schaffen? Welche Messverfahren stehen heute zur Verfügung, und wie werden diese angewendet? Wie geht man die Messanalyse bei umrichter gespeisten Antrieben an? Wie löst man das Problem der Oberschwingungen und der Blindleistung? Welche Möglichkeiten bietet die neuartige, in der Praxis noch nicht eingesetzte indirekte Drehmomentmessung? Welche Software für die Antriebsauslegung und die Simulation steht heute zur Verfügung? Wie lassen sich die thermische Auslastung und die elektromagnetische Verträglichkeit messtechnisch erfassen? Antwort gibt die vorliegende Kursdokumentation! Sie liefert die Grundlagen zur Antriebsmesstechnik und bietet eine Übersicht über die heute zur Verfügung stehenden Messmittel und Messmethoden. Welche neuen Möglichkeiten die moderne Messtechnologie bietet, wird auch in praxisgerechten Feldversuchen im Labor des Instituts für Elektrische Maschinen der ETH Zürich nachvollzogen. Fachleuten, die sich mit der Projektierung, dem Betrieb und dem Vertrieb von elektrischen Antrieben beschäftigen, ist diese Dokumentation eine hilfreiche Grundlage für ihre tägliche Arbeit.