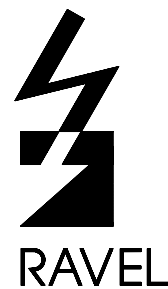


Elektrische Antriebe energie-optimal auslegen und betreiben



Impulsprogramm RAVEL
Bundesamt für Konjunkturfragen

Trägerschaft

- ETH/IEM Institut für Elektrische Maschinen
Eidgenössische Technische
Hochschule, Zürich
- SEV/ETG Energietechnische Gesellschaft
des Schweizerischen Elektro-
technischen Vereins

Autoren

- Konrad Reichert Prof. Dr.-Ing.habil.
· Raimund E. Neubauer Dr.-Ing.
Inst. für Elektrische Maschinen
ETH Zürich
Physikstrasse 3
CH - 8092 Zürich
- Hans Reiche Dr.-Ing.habil.
VEM-Antriebstechnik AG
Försterlingstrasse 20
D - 01 259 Dresden
- Fritz W.Berg
ABB Normelec
Riedstrasse 6
CH - 8953 Dietikon

Text und Grafik

Institut für Elektrische Maschinen, ETH Zürich
ETH Zentrum, Physikstr. 3, CH - 8092 Zürich

- Konrad Reichert
- Raimund E. Neubauer
- Giuseppe Pasquarella

Copyright Bundesamt für Konjunkturfragen
3003 Bern, Juni 1993

Auszugsweiser Nachdruck unter Quellenangabe
erlaubt. Zu beziehen bei der Eidg. Drucksachen-
und Materialzentrale, Bern (Best.Nr.724.331d)

Form. 724.331d 6.93 1000 11792

Vorwort

Das Aktionsprogramm des Bundesamtes für Konjunkturfragen 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 Konjunkturfragen, 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) 3000 Bern bezogen werden.

Zuständigkeiten

Um das ambitionierte 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

Mit der vorliegenden Dokumentation soll allen Antriebs-Fachleuten, die sich mit der Planung, der Herstellung und dem Betrieb von elektrischen Antrieben befassen, eine Anleitung zur Verbesserung der Energieumwandlung und zur Verminderung der Energieverluste in die Hand gegeben werden. Zunächst werden die Grundlagen der Wirkprinzipien von Antriebsmotoren behandelt und in

einer Übersicht die neuesten Entwicklungen zur Lösung dieser Aufgaben vorgestellt. Den grössten Stellenwert jedoch nimmt neben der Analyse und Identifikation von Arbeitsprozessen und Antriebskomponenten die Vorgehensmethodik bei der Gesamtanalyse der Antriebs-Anlagen ein. Diese soll die entscheidende Frage klären, inwieweit die wirkliche Belastung von dem eigentlichen Leistungsvermögen eines elektrischen Antriebssystems abweicht, um Verlustquellen zu erkennen. Danach wird konkret auf das Energiesparen eingegangen, wobei auch Ideen für energiesparende Verbesserungen an bestehenden Anlagen vorgestellt werden. Ergänzt werden diese Abschnitte durch Wirtschaftlichkeitsüberlegungen, Informationen zu umrichtergespeisten Antrieben, zahlreiche Fallstudien und Demonstrationen zu Anwendungsmöglichkeiten moderner PC-Software. Damit soll vor allem das Vorgehen bei der Auslegung praxisnah trainiert werden.

Nach einer Vernehmlassung und dem Anwendungstest in einer Pilotveranstaltung ist die vorliegende Dokumentation sorgfältig überarbeitet worden. Die Autoren hatten dennoch freie Hand, unterschiedliche Ansichten über einzelne Fragen nach eigenem Ermessen zu beurteilen und zu berücksichtigen. Sie tragen denn auch die Verantwortung für die Texte. Unzulänglichkeiten, die sich aus der praktischen Anwendung ergeben, können bei einer allfälligen Überarbeitung behoben werden. Anregungen nehmen das Bundesamt für Konjunkturfragen oder der verantwortliche Redaktor/Kursleiter entgegen.

Für die wertvolle Mitarbeit zum Gelingen der vorliegenden Publikation sei an dieser Stelle allen Beteiligten bestens gedankt.

Mai 1993

Dr.H.Kneubühler
Stv.Direktor des Bundesamtes
für Konjunkturfragen

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei den Herren Jürg Nipkow, Dipl.-Ing.ETH (RAVEL-Programmleitung, Ressort Kraft) und André Müller (ECOPLAN), für die wertvollen Hinweise, Anregungen und Ergänzungen zu dieser Kursdokumentation herzlich bedanken.

Der Dank geht auch an alle Institutsmitglieder die zur Profilierung der vorliegenden Publikation beigetragen haben. Insbesondere geht er an unsere Sekretärin, Frau Leila Graedel, für das sorgfältige Lesen der Korrekturen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Einführung, Zielsetzung	7
1.2	Entwicklung, allgemeine Bedeutung, Energiesparpotentiale der elektrischen Antriebstechnik	7
1.3	Systematik des Vorgehens	11
2	Grundgesetze und Kenngrößen der Antriebskomponenten	12
2.1	Kraft- und Drehmomenterzeugung in elektrischen Maschinen	12
2.2	Ausnutzung elektrischer Maschinen	15
2.3	Wachstumsgesetze	16
2.4	Grundformen elektrischer Maschinen	18
2.5	Vergleich der Energiewandler	22
3	Entwicklungstendenzen elektrischer Antriebe	26
3.1	Einführung	26
3.2	Energieoptimale Auslegung von Elektromotoren	26
3.3	Neue Wirkprinzipien bei elektrischen Antrieben	30
3.4	Materialfortschritte	33
4	Methodik der energieökonomischen Auslegung elektrischer Antriebe	37
4.1	Einführung	37
4.2	Systemtechnisches Vorgehen bei der Auslegung elektrischer Antriebe	40
4.3	Software zur Auslegung und Simulation von Antrieben	51
5	Analyse und Identifikation des Arbeitsprozesses und der Antriebskomponenten	60
5.1	Einführung	60
5.2	Identifikation der Arbeitsmaschine	60
5.3	Checkliste zur prozessanalytischen Aufbereitung der Antriebsvorgänge	67
5.4	Prozessidentifikation, Messtechnik und Auswertung	68
5.5	Modelle zur Ermittlung der Motortemperaturen	70

6	Energiesparen bei Antriebssystemen	76
6.1	Allgemeines Vorgehen	76
6.2	Energiesparen bei der Arbeitsmaschine und beim Arbeitsprozess	77
6.3	Energiesparen beim Motor	77
6.4	Energiesparen durch die Leistungselektronik	82
6.5	Energiesparen bei instationärem dynamischen Betrieb	83
6.6	Checkliste zur Verbesserung der Energieverhältnisse elektrischer Antriebe	87
7	Verbesserung der Ausnutzung unter- und überbelasteter Antriebe	89
7.1	Der Normmotor im Teillastbetrieb	89
7.2	Verbesserung der Ausnutzung unterbelasteter Antriebe	92
7.3	Verbesserung der Ausnutzung überbelasteter Antriebe	96
8	Energieökonomisch bedeutende Antriebsanwendungen und Lösungswege	99
8.1	Drehzahlvariable Ventilatoren	99
8.2	Drehzahlvariable Pumpen	102
8.3	Energienutzung durch rückwärtslaufende Kreiselpumpen	106
9	Spezielle Probleme umrichter gespeister Antriebe	110
9.1	Umrichter für elektrische Antriebe	110
9.2	Maschinenprobleme umrichter gespeister Antriebe	116
9.3	Netzprobleme umrichter gespeister Antriebe	124
10	Wirtschaftlichkeit des Energiesparens bei elektrischen Antrieben	135
10.1	Einführung	135
10.2	Grundbegriffe, Rechengrößen	135
10.3	Wirtschaftlichkeitsrechnungen	136
10.4	Aufwandsrechnung für einen Lüfterantrieb	137
10.5	Variantenvergleich	138
	Literatur	139



1 Einleitung

1.1 Einführung, Zielsetzung

Der vorliegende Bericht soll dazu anregen, elektrische Energie in elektrischen Antrieben noch rationaler zu verwenden. Dafür gibt es grundsätzlich mehrere Möglichkeiten:

- Die Erhöhung des Wirkungsgrades aller Komponenten eines Antriebes, insbesondere des Wirkungsgrades der Elektro-Motoren.
- Die Nutzung von neuen Wirkprinzipien bei der Wandlung von elektrischer in mechanische Energie, z.B. im Hinblick auf eine verstärkte Nutzung von Permanentmagneten in Motoren.
- Die systemtechnische Betrachtung des Antriebssystems und die bessere leistungsmässige Anpassung des eingesetzten Elektromotors an die Anforderungen der Arbeitsmaschine, die angetrieben werden soll.
- Die Verbesserung der Betriebsführung des Antriebs durch Prozessbeobachtung und Steuerung bzw. Regelung.

Studien über die Einsparmöglichkeiten elektrischer Energie bei elektrischen Antrieben haben gezeigt, dass sehr viele Antriebe an die tatsächlich auftretenden Leistungsanforderungen nur ungenügend angepasst sind. Dementsprechend sind dabei die Elektromotoren und auch die elektronischen Speisegeräte leistungsmässig überdimensioniert. Die Möglichkeiten der Steuerung und der Umrichter-speisung zur optimalen Anpassung des Antriebes an den Bedarf wird noch zu wenig genutzt.

Dies führt direkt zu energieökonomisch ungünstigen Betriebsbedingungen, wie kleinem Wirkungsgrad und kleinem Leistungsfaktor, indirekt aber auch zu einer Energieverschwendung, wenn man bedenkt, dass jeder Materialeinsatz bei der Herstellung der Motoren und ihrer Einsatzwerkstoffe einem Energieaufwand äquivalent ist.

Der vorliegende Bericht richtet sich sowohl an Planer als auch an Betreiber, welche die Anforderungen an den elektrischen Antrieb aus der genauen Kenntnis des Arbeitsprozesses und seines zeitlichen Ablaufs abzuleiten haben. Je komplexer

und vorausschauender die Kenntnis des Gesamtprozesses sein wird, umso besser wird die Wahl der Antriebskomponenten ausfallen und umso grösser wird schliesslich der "Gesamtwirkungsgrad" des Arbeitsprozesses sein.

Dem Antriebstechniker werden Arbeitsmittel für eine optimale Auslegung zur Verfügung gestellt, welche auf den Grundlagen der an sich schon guten theoretischen Beherrschung des elektrischen Antriebes und seiner Komponenten beruhen.

Zur Motivation, aber auch zur Erweiterung der Basis, werden der vorliegenden Arbeit Betrachtungen über energieökonomische Einsatzschwerpunkte der Antriebe und über die in dieser Hinsicht wichtigsten Antriebskomponenten vorangestellt.

Selbstverständlich sind die Möglichkeiten der Verbesserung des Wirkungsgrades der Energiewandler selbst und auch der Antriebselemente der Arbeitsmaschine ständig zu beobachten und einzubeziehen. Entsprechende Ansatzpunkte hierzu werden erläutert.

1.2 Entwicklung, allgemeine Bedeutung, Energiesparpotentiale der elektrischen Antriebstechnik

Die Entwicklung der Antriebstechnik erfolgte un-
stetig, abhängig von den Erfordernissen und den technischen Innovationen.

Vor der Erfindung der Dampfmaschine waren nur Muskel-, Wasser- und Windkraft als Antriebsmittel verfügbar, in grösserem Umfange nur ortsgebunden und begrenzt.

Mit der Dampfmaschine wurde der Industrie ein ortsunabhängiger Antrieb zur Verfügung gestellt, welcher zentral aufgestellt werden musste und dessen Antriebsenergie mechanisch an kleinere Arbeitsmaschinen verteilt wurde.

Die Erfindung der elektrischen Maschine vor ca. 100 Jahren und die Möglichkeit elektrische Energie beliebig übertragen und verteilen zu können, brachte neue Impulse in die Antriebstechnik. Die

Anpassungs- und die Regelfähigkeit der elektrischen Maschine ermöglichte eine enge Kopplung mit der Arbeitsmaschine sowie eine beliebige Anpassung an die Erfordernisse des Prozesses.

Diese Anpassungsfähigkeit wurde dann durch die Entwicklung der Stromrichtertechnik noch weiter verbessert. Sie wurde im weiteren durch die Mikroelektronik und die Prozessrechnertechnik, welche komplexe Steuerungs-, Regelungs-, Schutz- und Optimierungsaufgaben übernehmen kann, unterstützt.

Die verschiedenen Möglichkeiten der Motoren- und Stromrichtertechnik erlauben heute die Realisierung von Antrieben mit den verschiedensten Eigenschaften. Als sinnvoll hat sich erwiesen, die Antriebe zu klassifizieren in:

- A: Ungesteuerte Antriebe für konstante Belastungen oder geringe Genauigkeitsanforderungen oder Lastreaktionen
- B: Gesteuerte Antriebe für variablen, anpassungsfähigen Betrieb
- C: Geregelte Antriebe für einen Betrieb mit höherer Genauigkeit und der Fähigkeit, sich den Lastverhältnissen anpassen zu können
- D: Rechnergeführte Antriebe mit Optimierungs- und Koordinationsaufgaben.

Im weiteren hat man zwischen Einzel- und Gruppenantrieben zu unterscheiden, wobei gerade hier die Verlustminimierungen und die Betriebskoordination sehr bedeutend sein können.

Es ist allgemein sehr schwierig, die Häufigkeit und Grössenverteilung der verschiedenen Antriebsarten zu erfassen. Auswertungen zeigen, dass der Energieumsatz im wesentlichen mit ungesteuerten Antrieben erfolgt, wobei eine steigende Tendenz zu den geregelten Antrieben zu erkennen ist.

Eine allgemeine Einschätzung über Grösse und Schwerpunkte des Energieeinsatzes in der elektrischen Antriebstechnik lassen nur grosse, wirtschaftlich autarke Industrieländer wie die USA zu.

Nach [14] werden in den USA mehr als 50% der ins-

gesamt erzeugten elektrischen Leistung in elektrischen Antrieben umgewandelt.

In der Schweiz ergab sich 1990 die im **Bild 1.1** dargestellte relative Aufteilung der insgesamt erzeugten elektrischen Energie von 167 670 TJ in die vier Energieformen: Wärmeenergie, mechanische Energie, Licht- (bzw. Wärme) Energie und Prozessenergie, wobei wiederum der Anteil der Umwandlung in mechanische Energie in der Industrie 58% betrug.

Die **Tabelle 1.1** zeigt den Verbrauch der Schweizer Industrie an elektrischer Energie im Jahre 1990.

Industriezweige	Elektr. Energie [TJ]	① %	② %
Maschinen, Apparate	11 950	22	—
Chemie	8 574	16	55
Metallindustrie (Aluminiumproduktion)	5 801	100	—
Zellstoff und Papier	5 292	10	87
Textil	3 813	7	76
Steine und Erden	2 682	5	90
Nahrungsmittel (Getränke, Tabak)	1 230	2	—
Bau	288	0.5	—
Kunststoffe	242	0.5	—

Tabelle 1.1: Die in der Schweiz im Jahr 1990 verbrauchte elektrische Energie

Die wichtigsten Zweige sind bezüglich ihres relativen Anteils am Verbrauch an elektrischer Energie ① und, soweit durch die Analysen der einzelnen Verbände bekannt [11], hinsichtlich des relativen Anteils an Antriebsenergie ② gekennzeichnet.

Zur Einschätzung der am Energieverbrauch beteiligten Arbeitsmaschinen müssen gebräuchliche Relationen internationaler Industrieländer herangezogen werden (vgl. **Bild 1.2**).

Leider gibt es für die Schweiz noch keine entsprechenden Erhebungen. Offensichtlich sind aber Pumpen-, Verdichter- und Ventilatorantriebe hinsichtlich des Energieverbrauches überall dominierend. In der Schweiz wird auch der Verarbeitungsmaschinenbau eine relativ grosse Rolle spielen.

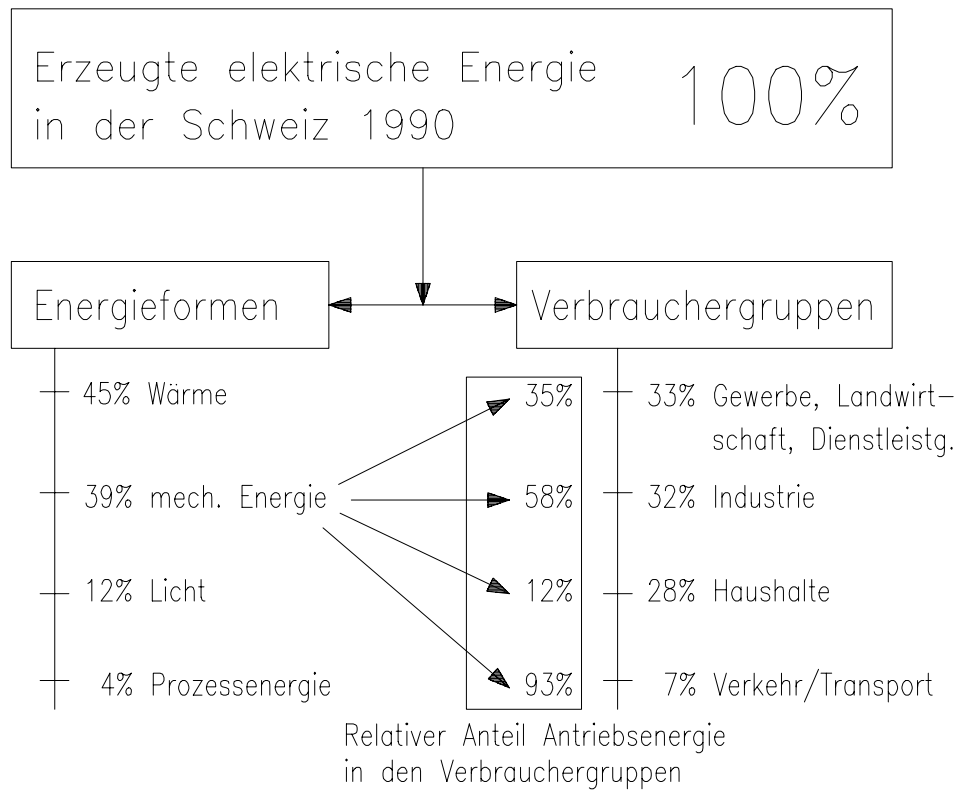


Bild 1.1: Umwandlung der in der Schweiz 1990 erzeugten elektrischen Energie und relativer Anteil an Antriebsenergie in den Verbrauchergruppen

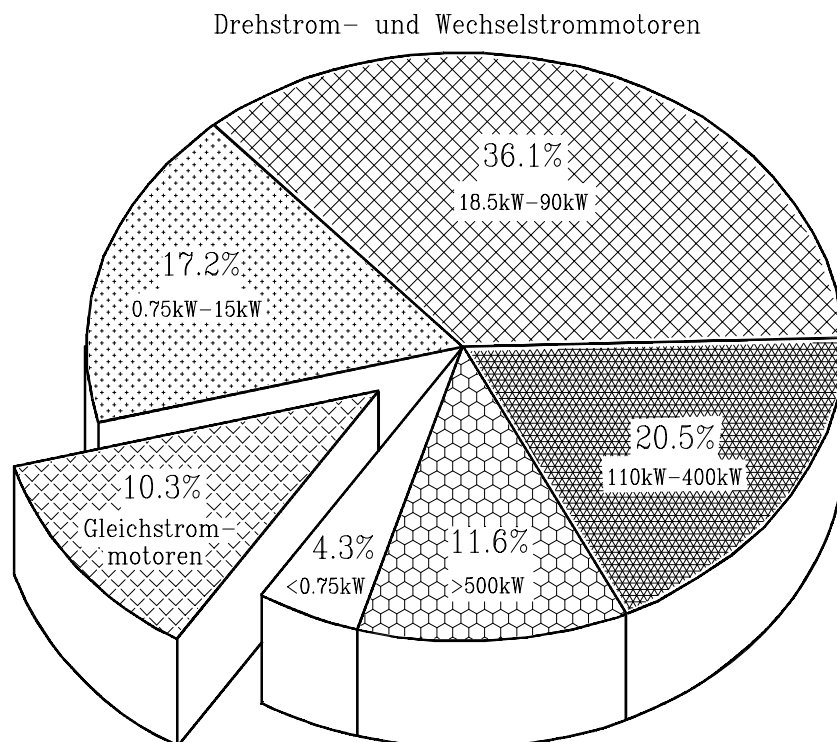


Bild 1.2: Energieverbrauch der wichtigsten Motorgruppen in den USA [1]

Bild 1.2 zeigt, dass die Antriebstechnik von Drehstrommotoren und zwar der Asynchronmotoren für Niederspannung beherrscht wird. Wie später noch näher begründet wird, ist sogar die Bedeutung des Drehstrommotors für die Gestaltung der Energieökonomie vom Leistungsbereich abhängig. Sind nämlich die grossen Motoren bereits gewissenhaft zu grossen energetischen Wirkungsgraden entwickelt worden und spielen bei den kleinen Leistungen energieökonomische Gesichtspunkte wegen der kleinen jährlichen Betriebszeiten keine grosse Rolle, so ist im mittleren Leistungsbereich wegen des angestrebten Kompromisses zwischen Preis und Wirkungsgrad eine relativ grosse Reserve für die Verbesserung der Energieökonomie vorhanden. In der erwähnten amerikanischen Studie [1] äussert sich das darin, dass der im **Bild 1.2** hervorgehobene Bereich 0.75 kW bis 15 kW ein grösseres Energiesparpotential aufweist als alle anderen Bereiche zusammen.

Für Europa wird laut PROGNOS (Europäisches Zentrum für Angewandte Wirtschaftsforschung in Basel) die Dominanz des Asynchronmotors unter den Industriemotoren in den nächsten Jahren weiter zunehmen (vgl. **Bild 1.3**).

In der Schweiz stellt sich der Schwerpunkt "Niederspannungs-Asynchron-Normmotoren" gemäss PROGNOS so dar, wie es die **Tabelle 1.2** zeigt.

Leistungsklasse	T Stück	Mio. SFr.	Anteil %
unter 0.375 kW	65.0	9	10
$0.375 - 7.5\text{ kW}$	130.0	45	52
$7.5 - 75\text{ kW}$	13.0	28	32
$75 - 200\text{ kW}$	0.5	5	6
Σ	208.5	87	100
Getriebemot.	25.0	15	
Gesamt	233.5	102	

Tabelle 1.2: Drehstrom Niederspannungs-Asynchron-Normmotoren, Schweiz, 1989

Das Verhältnis zwischen Drehstrom- und Gleichstromantriebstechnik wird sich in Zukunft zugunsten der Drehstromantriebstechnik verschieben, da die früher dominierende Rolle der Gleichstromma-

schinen bei der Realisierung drehzahlvariabler Antriebe in zunehmendem Masse vom umrichter gespeisten Asynchronmotor übernommen wird.

In der Bundesrepublik Deutschland wurden bereits 1989 gleiche Anteile von Gleich- und Drehstrommotoren beim Einsatz drehzahlvariabler Antriebe erreicht. Die Steigerungsraten für die Produktion der einzelnen Antriebselemente

Gleichstrommotoren	$\approx 10\%$
Asynchronmotoren	$\approx 12\%$
Frequenzumrichter	$\approx 21\%$

belegen die Tendenz zur Drehstromtechnik [43].

Hinsichtlich der Verbesserung der Energieökonomie in der Antriebstechnik verdienen die drehzahlvariablen Drehstromantriebe doppelte Aufmerksamkeit:

- Sie erlauben Energieeinsparungen bei der Steuerung von Fördermittelströmen in Pumpen und Ventilatoren, die sonst mit mechanischen und Nutzenergie vernichtenden Mitteln bewerkstelligt werden müssten.
- Sie ermöglichen eine energiesparende Betriebsführung des Gesamtprozesses.

Dieser zweite Gesichtspunkt ist beinahe der bedeutendere.

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

- Der Niederspannungs-Asynchronmotor mittlerer Leistung stellt einen Schwerpunkt bei der energieökonomischen Gestaltung dar.
- Der Frequenzumrichter ist ein wichtiges Mittel zur Verbesserung der Energieökonomie des Antriebes wie auch des Gesamtprozesses.

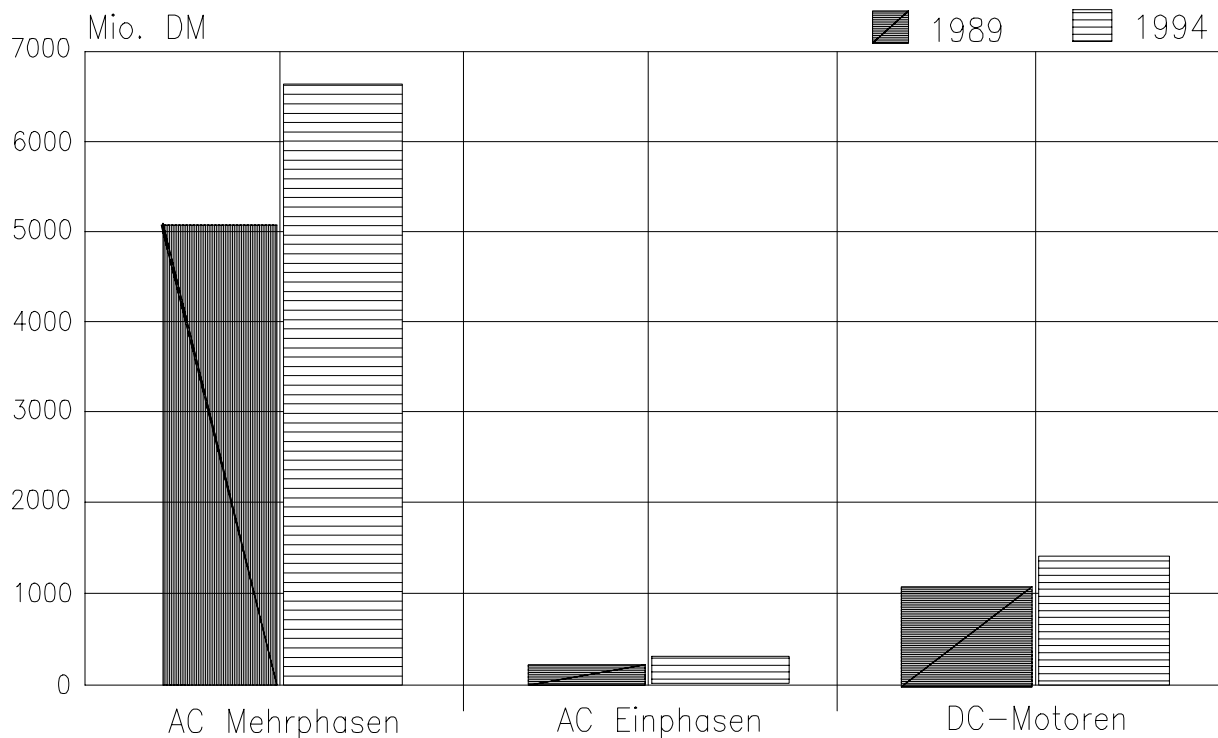


Bild 1.3: Industriemotoren, Markt Europa nach Produkttypen

1.3 Systematik des Vorgehens

Bei der Verbesserung der Antriebssysteme und beim Einsatz der Antriebskomponenten muss systematisch vorgegangen werden.

Es ist selbstverständlich, dass eine Minimierung der Verluste im Motor, in der Speisung, im Getriebe, in der Arbeitsmaschine und eine optimale Ausnutzung des Motors anzustreben ist.

Ein grosses Energiesparpotential liegt in der energie- und verlustminimalen Auslegung des Antriebes. Statistische Erhebungen haben gezeigt, dass die durchschnittliche Ausnutzung elektrischer Maschinen ca. 60% beträgt d.h., dass sie nicht im Bereich des bestmöglichen Wirkungsgrades und daher

mit relativ grossen Leerlaufverlusten betrieben werden.

Aber auch die Verbesserung des Arbeitsprozesses, die Wahl eines geeigneten Motors, die Anpassung des Betriebes an den Bedarf durch den Übergang von einem ungesteuerten Betrieb in einen gesteuerten oder geregelten Betrieb mit Hilfe einer geeigneten Schaltung oder eines Umrichters als Stellglied, kann zu beträchtlichen Energieeinsparungen führen.

Eine Verbesserung dieser Situation kann nur durch ein systematisches Vorgehen erreicht werden. Dazu gehört nicht nur eine genaue Analyse des Arbeitsprozesses, sondern auch eine systematische Auswahl der Komponenten und Anpassung an die Betriebsverhältnisse.

2 Grundgesetze und Kenngrößen der Antriebskomponenten

Grundsätzliches:

- El.Maschinen erzeugen eine Schubkraft, bzw. ein Drehmoment, mit den Wirkprinzipien "Kraft auf Strom im Magnetfeld" und "Kraft auf Eisen im Magnetfeld".
- Der Strom kann eingeprägt sein, wie beim Gleichstrommotor oder induziert sein, wie bei der Asynchronmaschine.
- Das Drehmoment ist begrenzt durch die Sättigung des Eisens und durch Kühlungsverhältnisse.
- Das Volumen des Motors wird vom Drehmoment bestimmt.
- Bei einer Vergrößerung der Abmessungen wächst bei gleicher Ausnützung die Leistung stärker als die Verluste, der Wirkungsgrad nimmt zu, die relativen Kosten nehmen ab.
- Gruppenantriebe haben im Vergleich zu Einzelantrieben bei gleicher Gesamtleistung einen höheren Wirkungsgrad, einen kleineren Materialverbrauch und eine schlechtere Dynamik.

gen der Wicklungen, der Eisenteile und der Dauermagnete im Stator und Rotor.

Elektrisches Netz

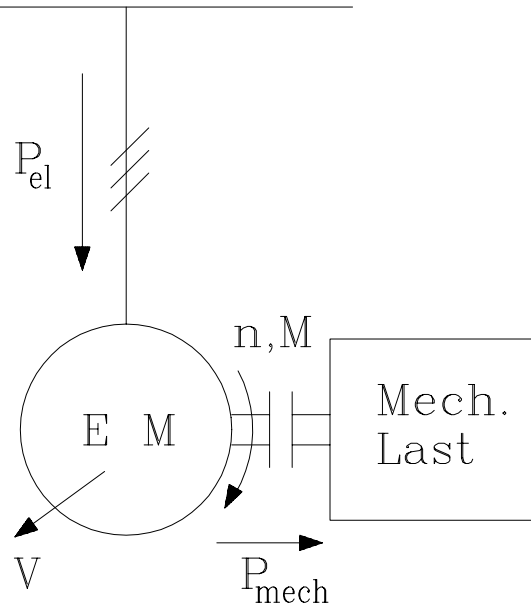


Bild 2.1: Energieumwandlung in elektrischen Maschinen

Die Energiebilanz der elektrischen Maschine ergibt (vgl. Bild 2.1) in jeden Augenblick die Grundbeziehung

$$P_{el} = P_{mech} + V + \frac{dW_{magn}}{dt}$$

wobei im stationären Betrieb im Mittel die magnetische Energie W_{magn} zeitlich konstant bleibt (Ausnahme: Schrittmotoren).

Da die Verluste V im allgemeinen sehr klein sind, erreicht der Wirkungsgrad η

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}} = 1 - \frac{V}{P_{el}}$$

sehr grosse Werte, theoretisch den Wert von 100%, wenn man die Verluste vernachlässigt.

Die aus der Energiebilanz ableitbaren Grundbeziehungen für das Drehmoment M bzw. für die mechanische Leistung $P_{mech} = 2\pi n M$, bei der Drehzahl n werden von den Modellvorstellungen für die Energieumwandlung bestimmt.

2.1 Kraft- und Drehmomenterzeugung in elektrischen Maschinen

Die elektrische Maschine (EM) hat in einem Antriebssystem die Aufgabe

- mechanische Arbeit zu leisten, d.h. elektrische Energie in mechanische Arbeit, bzw. elektrische Leistung P_{el} in mechanische Leistung P_{mech} umzuwandeln,
- bei einer vorgegebenen Drehzahl n an der Welle ein bestimmtes Drehmoment M zu erzeugen.

Dieser Energieumwandlungsprozess beruht auf den Wechselwirkungen des elektromagnetischen Feldes in der elektrischen Maschine, entsprechend den physikalischen Verhältnissen, d.h. den Anordnun-

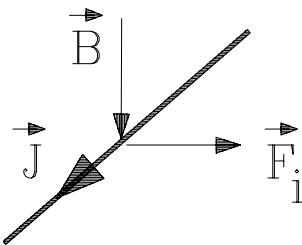
Betrachtet man die **Verhältnisse im Kleinen**, so erhält man die folgenden Modelle für die Kraftbildung vgl. **Bild 2.2**:

- a) Auf einen Leiter der Länge l mit dem Strom $\vec{J}$ wirkt in einem Magnetfeld mit der Flussdichte $\vec{B}$ die Kraft $\vec{F}$:

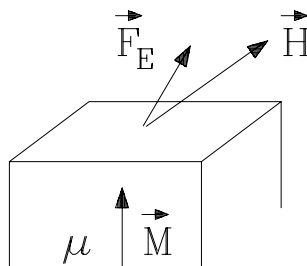
$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \cdot l$$

- b) Auf einen magnetisierbaren Körper mit der Magnetisierung $\vec{M}$ wirkt im Magnetfeld mit der Feldstärke $\vec{H}$ die Kraft $\vec{F}$:

$$\vec{F} = \text{div} \vec{M} \vec{H} - \mu_0/2 \vec{H}^2 \text{grad} \mu$$



Kraft auf Stromfaden



Kraft auf Eisen

Bild 2.2: Kräfte im elektromagnetischen Feld

Bei einer **Betrachtung im Grossen** geht man von der Wechselwirkung zwischen stromdurchflossenen Spulen, bzw. zwischen einer stromdurchflossenen Spule und Eisen aus (vgl. **Bild 2.3**).

Man erhält dann aus der Energiebilanz die

- Kraftwirkung auf eine vom Strom i_1 durchflossene Spule im Magnetfeld einer anderen, vom Strom i_2 durchflossenen Spule, d.h. bei einer drehbaren Anordnung das entsprechende Drehmoment M (Stromdrehmoment):

$$M = i_1 i_2 \partial L_{12} / \partial \alpha$$

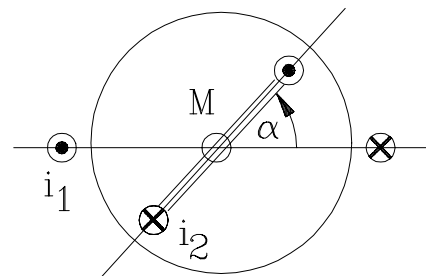
entsprechend der Kraft auf einen stromführenden Leiter im Magnetfeld, abhängig von der

Änderung der Gegeninduktivität L_{12} mit dem Winkel α .

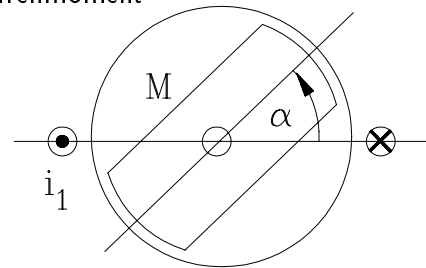
- Kraftwirkung auf einen magnetisierbaren Körper im Magnetfeld einer vom Strom i_1 durchflossenen Spule, d.h. bei einer drehbaren Anordnung das entsprechende Drehmoment M (Reluktanzmoment):

$$M = 0.5 i_1^2 \partial L_1 / \partial \alpha$$

abhängig von der Änderung der Selbstinduktivität L_1 mit dem Winkel α .



Stromdrehmoment



Reluktanzmoment

Bild 2.3: Drehmomente bei Spulensystemen

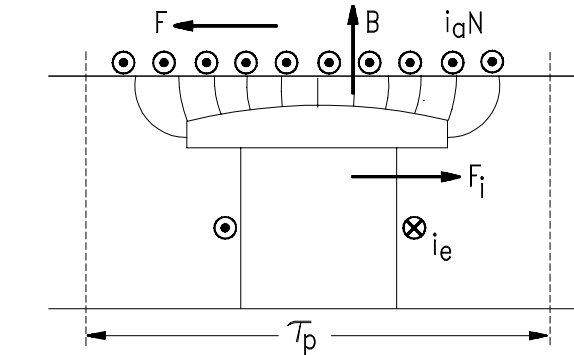
Das **Strom-Drehmoment** tritt vor allem in den klassischen Maschinen, den Gleichstrom-, Asynchron- und Synchronmaschinen auf.

Das **Reluktanz-Drehmoment** ist bei den Schrittmotoren und bei den Synchronmaschinen mit ausgeprägten Polen wirksam.

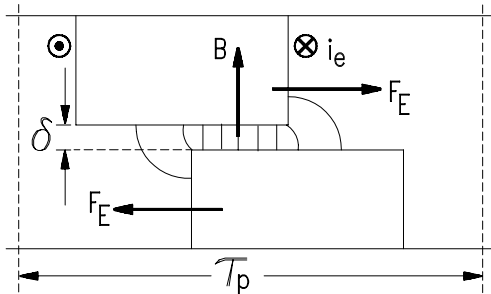
Eine lineare Abhängigkeit der Induktivitäten L_1 bzw. L_{12} vom Winkel α ergibt ein konstantes Drehmoment.

Beim **Vergleich der beiden Anordnungen** müssen die lokalen Feldbeanspruchungen und Strombelastungsgrenzen der Spulensysteme berücksichtigt werden. Dabei kann man davon ausgehen, dass sich die Verhältnisse periodisch wiederholen und die Anordnungen stets $2p$ Pole besitzen, wenn man mit p die Polpaarzahl bezeichnet.

Das **Bild 2.4** zeigt die beiden Elementarsysteme für die Wirkprinzipien: "Kraft auf Strom" und "Kraft auf Eisen" im Magnetfeld, wie sie in jeder elektrischen Maschine anzutreffen sind.



Stromkraft



Reluktanzkraft

Bild 2.4: Vergleich der Elementarsysteme

Als Vergleichsgröße für die beiden Wirkprinzipien wird die Schubkraft f_s pro Flächeneinheit verwendet:

- Für die Anordnung "stromführende Leiter im Magnetfeld" gilt für die Schubkraft f_i die Beziehung:

$$f_i = F_i / \tau_p \cdot l = B i_a N / \tau_p = B A$$

mit $A = i_a N / \tau_p$ dem Strombelag, B der Flussdichte und mit τ_p der Polteilung.

- Für die Anordnung "Eisen im Magnetfeld" gilt für die Schubkraft f_E die Beziehung:

$$f_E \approx 0.5 B^2 / \mu_0 \delta / \tau_p$$

In der Praxis sind der Flussdichte B durch die Sättigung des Eisens und durch den Aufwand zur Erzeugung des Magnetfeldes, dem Strombelag A durch die Verluste, bzw. durch die Kühlmöglichkeiten, Grenzen gesetzt:

Flussdichte $B \leq 1.5 \text{ T}$

Strombelag $A \leq 100 \text{ kA/m}$

welche die folgenden Grenzwerte für die Schubkräfte ergeben:

$$f_i \leq 150 \text{ kN/m}^2$$

$$f_E \leq 90 \text{ kN/m}^2$$

wenn man bei der Anordnung "Eisen im Magnetfeld" für δ / τ_p den praktischen Wert 0,1 annimmt.

Diese Grenzwerte für die Schubkräfte sind vor allem bei der Entwicklung von Direktantrieben zu berücksichtigen. Sie führen zwangsläufig zur Tendenz, elektrische Maschinen für Direktantriebe mit einem möglichst grossen Durchmesser auszuführen, um das gewünschte Drehmoment zu erreichen.

Bei den üblichen Industriemotoren (Gleich- und Drehfeldmaschinen) werden allerdings nur Schubkräfte von $20 - 40 \text{ kN/m}^2$ erreicht, bedingt durch die Nutung der Blechpakete und die dementsprechend kleineren Flussdichten im Luftspalt ($B \leq 0.7 \text{ T}$) und die bei indirekter Luftkühlung erreichbaren Strombeläge von nur $40 - 60 \text{ kA/m}$.

Bezüglich **Steuerbarkeit** unterscheiden sich die beiden Drehmomenterzeugungs-Prinzipien grundsätzlich:

- Beim Prinzip "Kraft auf Eisen" ist die Kraftwirkung lageabhängig und unipolar, d.h. unabhängig vom Vorzeichen, bzw. der Richtung des Stromes i_1 . Im Gleichgewichtszustand, wenn sich die beiden Pole gegenüber stehen, ist die Kraft gleich Null, da dann das Minimum der magnetischen Energie erreicht ist.
- Beim Prinzip "Kraft auf Strom" ist die Kraft praktisch vom Weg unabhängig, solange sich die stromführenden Leiter im Magnetfeld befinden. Durch das Vorzeichen, bzw. durch die Richtung des Stromes, kann die Krafttrichtung beeinflusst werden.

Die technischen Probleme der Kraft- und Drehmomenterzeugung in elektrischen Maschinen sind bedingt durch die Anforderungen, aber vor allem auch bedingt durch die Physik und durch die Technik.

Die **stromführenden Wicklungen** und die **magnetischen Elemente** (Eisen und Dauermagnete) müssen so angeordnet und mit Strom versorgt werden, dass eine möglichst gleichmässige Kraftwirkung zustande kommt, z.B. durch eine geeignete räumliche Verteilung der Wicklungen und durch eine Speisung mit einem Mehrphasensystem.

Die **Erzeugung des Magnetfeldes** der Flussdichte B soll mit möglichst kleinem Aufwand erfolgen, d.h.

- das Eisen darf nicht bis zur Sättigung beansprucht werden,
- die Luftspalte sollten möglichst klein sein (Ausnahme Synchronmaschinen),
- der Einsatz von Dauermagneten ist in Betracht zu ziehen.

Die Führung der Ströme soll gezielt, mit minimalem Aufwand und mit minimalen Verlusten erfolgen, d.h.

- parasitäre Ströme (Wirbelströme) sind zu unterdrücken,
- die stromführenden Elemente sind möglichst gut zu kühlen um die Temperatur und die Verluste zu begrenzen. So können für den Strombelag A und die Stromdichte S die Grenzwerte $A : 60 - 100 \text{ kA/m}$ und $S : 4 - 6 \text{ A/mm}^2$ erreicht werden.

Die Wechselwirkung (Ankerrückwirkung) zwischen den stromführenden Leitern ist zu begrenzen, z.B. durch :

- besondere Anordnungen,
- Kompensationswicklungen (bei Gleichstrommaschinen),
- grosse Luftspalte (bei Synchronmaschinen).

2.2 Ausnutzung elektrischer Maschinen

Für die stromführenden Wicklungen, die Führung des magnetischen Feldes und die kraftübertragenden Konstruktionselemente ist in einer elektrischen Maschine ein bestimmtes Volumen vorzusehen (vgl. **Bild 2.5**). Dabei stellt sich die Frage, welcher Zusammenhang zwischen dem Volumen, insbesondere dem Rotorvolumen: $V = \pi/4 \cdot l D^2$, der

an der Welle abgegebenen Leistung P_{mech} , bzw. dem Drehmoment M , der Drehzahl n und der elektrischen und magnetischen Ausnutzung besteht.

Die Ausnutzung des Volumens der elektrischen Maschine kann durch die Ausnutzungsziffer C , d.h. durch das Verhältnis Drehmoment M zu Rotorvolumen:

$$C = \frac{M}{V} = \frac{M}{\pi/4 \cdot D^2 l}$$

gekennzeichnet werden.

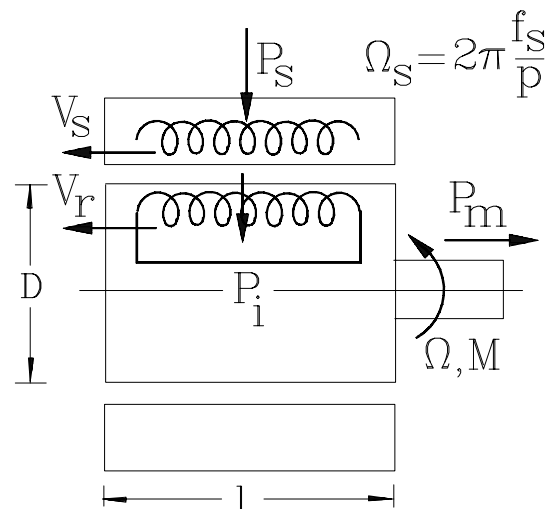


Bild 2.5: Leistungsfluss in einer elektr. Maschine

Für das Drehmoment M einer m -strängigen Drehfeldmaschine (Synchron- oder Asynchronmaschine) gilt die Beziehung:

$$M = m E I_a \cos \varphi_i / \Omega_s$$

wobei E die induzierte Spannung, I_a der Strangstrom, $\cos \varphi_i$ der Leistungsfaktor und Ω_s die synchrone Drehzahl ist.

Nach dem Induktionsgesetz gilt für die induzierte Spannung in der Statorwicklung die Beziehung:

$$E = p \Omega_s 2/\pi \cdot \tau_p l N \xi \hat{B} / \sqrt{2}$$

wobei N die Windungszahl und ξ der Wicklungsfaktor (≤ 1) bedeutet.

Mit der Polteilung $\tau_p = \pi D/2p$ und dem Strangstrom $I_a = \pi D A/2 m N$ wird daraus die Ausnutzungsziffer C :

$$C = \frac{M}{\pi/4 \cdot D^2 l} = \frac{P_{mech}}{\pi/4 \cdot D^2 l \cdot 2 \pi n}$$

oder:

$$C = \sqrt{2} \xi \hat{B} A \cos \varphi_i$$

Geht man von den Maximalwerten für die Flussdichte $\hat{B}$ und für den Strombelag $\hat{A}$ aus, so besteht zwischen der Ausnutzungsziffer C und dem Drehschub f_s die Proportionalität

$$C = f_s \xi \cos \varphi_i,$$

d.h. die Ausnutzungsziffer C ist gleich der oben definierten Schubkraft f_s , für $\xi \cos \varphi_i = 1$.

Die Beziehung für die Ausnutzungsziffer C zeigt, dass die Leistung P_{mech} pro Volumeneinheit proportional zur Drehzahl n_s , zur spezifischen Schubkraft f_s und damit wiederum proportional zur Flussdichte B und zum Strombelag A ist.

Schnellaufende Maschinen haben daher bei gleicher Leistung ein kleineres Bauvolumen als langsam laufende, wobei allerdings keine strenge Proportionalität bestehen kann, da bei zunehmender Drehzahl die Verluste nicht in gleichem Masse abnehmen und die Kühlungsverhältnisse schlechter werden.

Bei gegebener Schubkraft $f_s = \hat{B} \hat{A}$, bzw. bei gegebener Flussdichte B und bei gegebenem Strombelag A wird das Volumen der elektrischen Maschinen unabhängig von der Drehzahl n_s durch das geforderte Drehmoment M bestimmt.

Die Ausnutzungsziffer C bzw. die Schubkraft f_s hängt, wie oben gezeigt wurde, von den magnetischen Beanspruchungen und von den Kühlungsverhältnissen ab, wobei sich diese Abhängigkeiten allgemein in den Grössen: Luftspaltinduktion B , Strombelag A und Stromdichte S ausdrücken lassen.

Bei luftgekühlten Maschinen müssen die elektrischen Verluste über die Oberfläche abgeführt werden. Betrachtet man eine verteilte Wicklung, so stellt man fest, dass die Wicklungs-Verluste V_{Cu} pro Oberfläche $\pi D l$:

$$V_{Cu}/\pi D l = \rho A S$$

dem Produkt $A S$ und dem spezifischen elektrischen Widerstand ρ der Wicklung proportional sind, d.h. aber auch, dass bei einer gegebenen Wärmeübergangszahl α die Wicklungsüberetemperatur ΔT

$$\Delta T = V_{Cu}/\alpha \pi D l \sim A S$$

proportional zum Produkt $A S$ ist.

Da die Temperaturfestigkeit der Wicklungsisololation begrenzt ist, kann damit auch das Produkt $A S$ einen oberen Grenzwert nicht übersteigen. Dieser liegt in der Grössenordnung von $100 - 150 \text{ kA}^2/\text{m} \cdot \text{mm}^2$ bei kleinen, schlecht ausgenutzten Maschinen und $150 - 300 \text{ kA}^2/\text{m} \cdot \text{mm}^2$ bei grossen, gut ausgenutzten Maschinen.

Selbstverständlich entfällt bei direkter Kühlung diese Begrenzung weitgehendst, es sind jedoch dort andere Gesichtspunkte für die Wahl des Strombelages A , wie z. B. die Überlastbarkeit, die Grösse des Kippmomentes usw. entscheidend.

Auswertungen an ausgeführten Maschinen zeigen, dass:

- die Ausnutzungsziffer C mit der Leistung P_{mech} zunimmt,
- mehrpolige Ausführungen ($p \geq 1$) eine grössere Ausnutzungsziffer C haben,
- die Kühlungsart einen sehr starken Einfluss auf die Ausnutzungsziffer C hat,
- der Strombelag A bei kleinen Leistungen P_{mech} nach einem Wurzelgesetz von den linearen Abmessungen abhängt und bei grossen Leistungen konstant ist.

Typische Werte für die Ausnutzungsziffer C von Gleichstrom- und Drehfeldmaschinen sind $0,4 - 0,6 \text{ kVA} \cdot \text{min}/\text{m}^3$ für kleine und mittlere Leistungen ($\leq 10 \text{ kW}$).

2.3 Wachstumsgesetze

Bei der Planung und Projektierung von Antrieben werden unter anderem die folgenden Fragen gestellt:

1. Wie verändern sich typische Maschinenparameter, wie z.B. die Leistung P , die relativen Verluste, das Drehmoment M , oder die Anlaufzeit T_A bei einer Vergrösserung der geometrischen Abmessungen (Durchmesser D , Länge l) um ein Vielfaches, gekennzeichnet durch den Skalierungsfaktor k :

$$D = D^* \cdot k \quad \text{und} \quad l = l^* \cdot k$$

2. Welche Abhängigkeiten bestehen damit auch zwischen der Leistung P , bzw. dem Drehmoment M , den relativen Verlusten, dem Gewicht G , der Anlaufzeit T_A usw.

Diese Fragen sind z.B. bei einem Vergleich verschiedener Maschinenarten, oder bei einer Entscheidung über den Einsatz von Einzelantrieben anstelle eines Gruppenantriebes zu beantworten, insbesondere dann, wenn energieökonomische Bewertungen entscheidend sind.

Grundsätzlich muss man bei der Ableitung der Wachstumsgesetze alle inneren und äusseren Parameter, wie die Stromdichte S , die Induktion B , der Strombelag A , die effektive Wärmeübergangszahl α usw. und deren Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor k in Betracht ziehen, wobei zu beachten ist, dass zwischen diesen Grössen auch direkte Abhängigkeiten bestehen.

Bei **indirekt gekühlten Maschinen** ist bei gegebener Wärmeübergangszahl α und Erwärmung ΔT das Produkt $S \cdot A$ konstant. Da die Widerstandsverluste

$$V_{Cu} = \rho q_{Cu} l S^2 \sim k^3 S^2$$

und die Oberfläche der Kühlfläche

$$O = \pi D l \sim k^2$$

ebenfalls vom Skalierungsfaktor k abhängig sind, besteht für die Erwärmung ΔT die Beziehung:

$$\Delta T = V_{Cu} / \alpha O \sim k S^2$$

d.h. bei konstanter Erwärmung ΔT ist die Stromdichte $S \sim 1/\sqrt{k}$ und wegen der Konstanz des Produktes $A \cdot S$ auch der Strombelag $A \sim \sqrt{k}$. Bei einer Vergrößerung der Abmessungen nimmt die Stromdichte S ab und der Strombelag A zu. Dieser Zusammenhang ist bei kleineren Maschinen festzustellen.

Bei grossen, **direkt gekühlten Maschinen**, wird jedoch der Strombelag A konstant gehalten, um andere Kriterien, wie den relativen Leerlaufstrom, den Kurzschlussstrom, die Überlastbarkeit und das Kippmoment konstant halten zu können.

Aufgrund der grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen den Eigenschaftsgrössen (Leistung P ,

Drehmoment M , Verluste V_{Cu} usw.), den Parametern (A, S) und den geometrischen Abmessungen (Durchmesser D , Länge l) ergeben sich bei einer Vergrößerung der geometrischen Abmessungen, multiplikativ um den Faktor k die in der **Tabelle 2.1** dargestellten Abhängigkeiten.

	Kleine Maschinen $A \sim k^{1/2}$		Grosse Maschinen $A = konst.$	
Abmessungen: $D \sim k, l \sim k$	1	$P^{2/7}$	1	$P^{1/3}$
Gewicht: $G \sim D^2 l$	k^3	$P^{6/7}$	k^3	P
Oberfläche: $O \sim D l$	k^2	$P^{4/7}$	k^2	$P^{2/3}$
Leistung: $P \sim B A D^2 l n$	$k^{7/2}$	1	k^3	1
Drehmoment: $M \sim P$	$k^{7/2}$	P	k^3	P
Rel. Verluste: $V \sim G S / P$	$k^{-3/2}$	$P^{-2/7}$	k^{-1}	$P^{-1/3}$
Anlaufzeit: $T_a \sim D^2 / A$	$k^{3/2}$	$P^{3/7}$	k	$P^{1/3}$

Tabelle 2.1: Wachstumsgesetze elektrischer Maschinen

mit: k = Vergrößerungsfaktor für die Abmessungen:
Durchmesser D , Länge l usw.
 P = Leistung

Diese Wachstumsgesetze gelten praktisch für alle Maschinenarten, auch für die Reluktanzmaschinen.

Betrachtet man die Abhängigkeit der Eigenschaftswerte der Maschinen von dem Skalierungsfaktor k bzw. von der Leistung P , so kann folgendes festgestellt werden:

- Bei einer Verkleinerung der Leistung P einer Maschine nehmen die relativen Kosten und die Verluste zu und damit der Wirkungsgrad ab. Dagegen wird die Maschine dynamisch schneller, da die Anlaufzeit abnimmt.
- Bei einer Vergrößerung der Leistung P einer Maschine steigt der Wirkungsgrad und die relativen Verluste. Die relativen Kosten und die Anlaufzeit nehmen ab.

Anwendungsbeispiel:

Ein Gruppenantrieb (G) mit der Leistung P soll durch 4 Einzelantriebe (E) mit der Leistung $P/4$ ersetzt werden. Hat diese Lösung energiewirtschaftliche Vorteile?

Man erhält dann mit Hilfe der Wachstumsgesetze die folgenden Verhältnisse:

Gewichte	G-/E-Antrieb	3,28/4
Rel.Verluste	G-/E-Antrieb	0,67/1
Abmessungen	G-/E-Antrieb	1,48/1
Anlaufzeit	G-/E-Antrieb	1,81/1

das heisst, der Gruppenantrieb ist energiewirtschaftlich gesehen besser. Es wird weniger Material verwendet. Die Verluste sind um ein Drittel geringer und die Abmessungen sind nur um 50% grösser. Bei der Einzelantriebslösung kann allerdings das Getriebe, welches die Leistung auf die einzelnen Abtriebswellen verteilt, mit seinen Verlusten eingespart werden. Einzelantriebe sind dynamisch schneller, die Anlaufzeit geht auf die Hälfte zurück und damit verkleinern sich auch wieder die Verluste im Anlauf.

2.4 Grundformen elektrischer Maschinen

Im Laufe der Entwicklung der elektrischen Maschinen haben sich aus den Wirkprinzipien verschiedene Grundformen entwickelt, welche sich folgendermassen klassifizieren lassen:

A: Wirkprinzip: "Kraft auf Strombelag A im Magnetfeld B"

Dabei haben das Magnetfeld B und der Strombelag A die gleiche räumliche Periodizität, sind jedoch nur bedingt voneinander abhängig. Das magnetische Eigenfeld des Strombelags A bewirkt keine Nutzkraft. Das Magnetfeld B muss also fremderzeugt sein, wenn es mit einem Strombelag A eine Kraft bewirken soll.

Mann unterscheidet die beiden Fälle:

- Strombelag A und Magnetfeld B sind von aussen eingeprägt, unabhängig voneinander.

- Nur das Magnetfeld B wird von aussen eingeprägt, der Strombelag A wird induziert:

und im einzelnen:

- a) **Magnetfeld B und Strombelag A sind räumlich gleichphasig**, wie z.B. beim: Gleichstrommotor (GM): Magnetfeld B und Strombelag A sind ortsfest. Die Synchronisierung erfolgt durch die Lage der Bürsten. In den Ankerleitern fliessen Wechselströme, welche durch den Stromwender gleichgerichtet werden bzw. im Bereich der Bürsten ihre Richtung ändern.

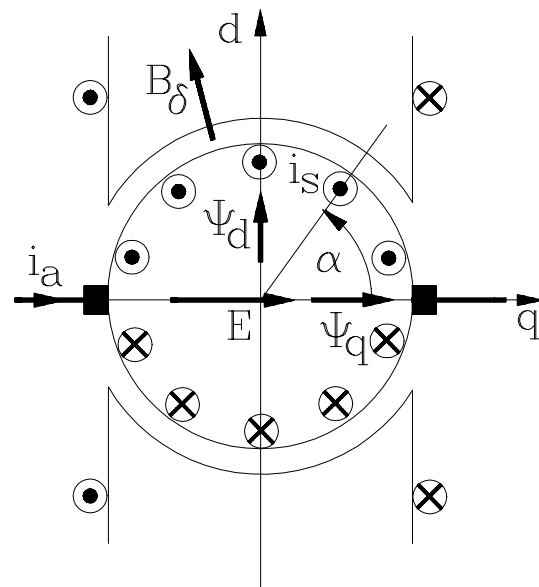


Bild 2.6: Gleichstrommotor

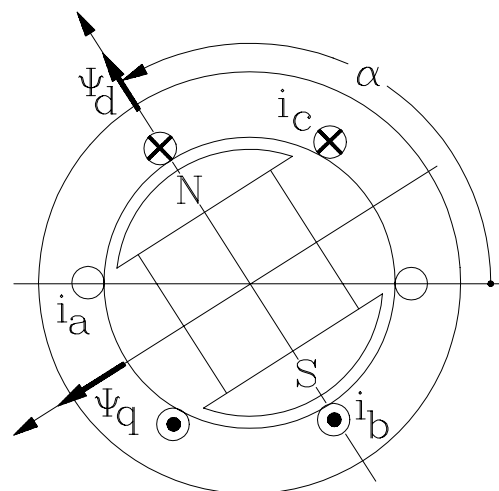


Bild 2.7: Elektronikmotor

Elektronikmotor (EM): Das Magnetfeld B mit der Polpaarzahl p und dem Strombelag A läuft synchron mit der Drehzahl n_s um. Die Synchronisierung erfolgt durch **Pollagegeber** und durch eine entsprechend gesteuerte Umrichterspeisung. In der m -strängigen Statorwicklung fließen Wechselströme mit einer Phasenverschiebung von $2\pi/m, 4\pi/m, \dots$ und der Frequenz $f_s = pn_s$.

- Magnetfeld B und Strombelag A** sind räumlich lastabhängig phasenverschoben, synchron umlaufend, wie z.B. bei der: Synchronmaschine (SM): am Mehrphasennetz mit eingprägten Spannungen oder Strömen (vgl. Bild 2.11).
- Magnetfeld B und Strombelag A** sind gleichpolig, wie z.B. bei der gleichstromgespeisten Unipolarmaschine.
- Magnetfeld B und Strombelag A** sind räumlich lastabhängig, phasenverschoben, synchron umlaufend, der **Strombelag A** ist induziert, wie z.B. bei der:

Asynchronmaschine (ASM), oder auch Induktionsmaschine genannt: Magnetfeld B und Strombelag A laufen synchron mit der Drehzahl n_s um. Der Strombelag A in der Rotorwicklung wird induziert, in Grösse und Phasenlage abhängig vom Schlupf: $s = (n_s - n)/n_s$. Bei Speisung mit der Frequenz f_s und bei der Polpaarzahl p hat das Drehfeld die synchrone Drehzahl $n_s = f_s/p$, welche die Drehzahl n der Asynchronmaschine nie erreicht.

Im Synchronismus ($s = 0$, d.h. $n = n_s$) verschwindet die Induktionswirkung, d.h. der Strombelag A im Rotor und damit auch das Drehmoment werden Null.

Wirbelstrombremse: Das Magnetfeld B ist ortsfest und eingpräg. Der Strombelag A wird im bewegten Teil schlupfabhängig induziert.

B: Wirkprinzip: "Kräfte zwischen magnetisierten Körpern"

Die Anzahl der Pole im Stator und Rotor kann bei diesem Wirkprinzip gleich oder ungleich sein.

Man unterscheidet die beiden Fälle:

- Kraft auf magnetisierte Körper im Magnetfeld B (Reluktanzkraft):

- Kräfte zwischen magnetisierten Körpern:

und im einzelnen, wie z.B. beim:

- "Switched Reluctance" Motor (SRM)**: Das Magnetfeld B wird umlaufend eingpräg, synchronisiert mit dem Rotor durch einen Lagegeber und durch die Umrichterspeisung.

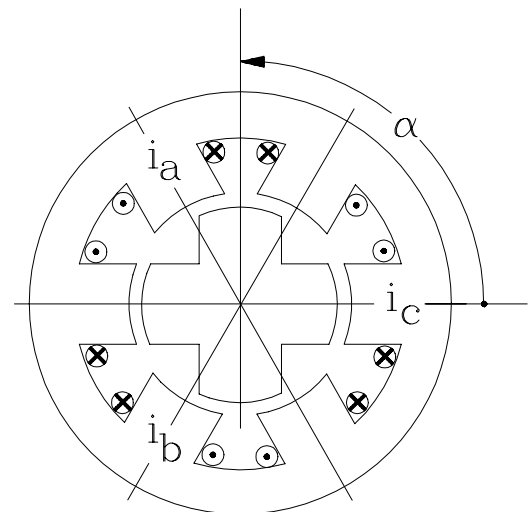


Bild 2.8: Schrittmotor

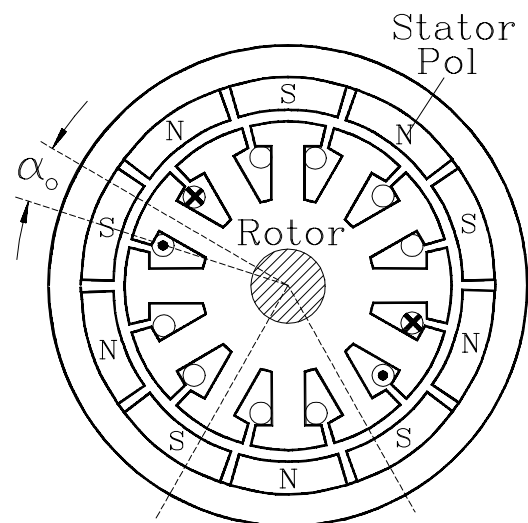


Bild 2.9: Magnetmotor

- Schrittmotor**: Das Magnetfeld B läuft synchron mit der Rotorlage um, mit lastabhängiger räumlicher Phasenverschiebung, jedoch nicht durch einen Rotor-Lagegeber synchronisiert.
- Magnetmotor (MM)**: Das Magnetfeld des Stators wird laufend an das Magnetfeld des Rotors angepasst durch die Umrichterspeisung der Wicklung, entsprechend der Rotorlage.

Die **Erzeugung des Magnetfeldes B** kann bei den beiden Wirkprinzipien erfolgen durch:

- Konzentrische Wicklungen:
GM, SM: von Gleichstrom durchflossen, einsträngig,
SRM, MM: von Impulsströmen durchflossen, mehrsträngig,
- Verteilte Wicklungen mehrsträngig:
ASM, SM: von einem m -Phasen-Wechselstromsystem durchflossen,
- Dauermagnete in verschiedenen Anordnungen (bei EM, SM).

Der **Strombelag A** kann geführt und erzeugt werden durch:

- Ring-, Schleifen- oder Wellenwicklungen, angezapft über Stromwender und Bürsten, gespeist durch Einphasenströme (bei der GM),
- konzentrierte oder verteilte m -strängige Wicklungen, gespeist durch m -phasige Wechselströme, (bei EM, SM, ASM) bzw. kurzgeschlossen bei der Asynchronmaschine,
- eingeprägte, fiktive Magnetisierungsströme eines Dauermagnetsystems (beim MM).

Beim **Wirkprinzip "Kraft auf Strombelag A im Magnetfeld B "** muss die Polzahl des Magnetfeldes B mit der Polzahl des Strombelags A übereinstimmen, um eine möglichst gleichmässige Kraftwirkung zu erreichen. Das Eigenfeld des Strombelages A erzeugt keine Nutzkraft, es kann jedoch das Magnetfeld B beeinflussen, abhängig von der magnetischen Situation (Grösse des Luftspaltes), wenn es nicht durch eine Kompensationswicklung, wie bei grossen Gleichstrommaschinen üblich, unterdrückt wird.

Dagegen muss bei dem **Wirkprinzip "Kräfte zwischen magnetisierten Körpern"** das auslösende Magnetfeld B und die magnetisierbare Anordnung keineswegs gleichpolig sein, um eine umlaufende Kraftwirkung zu erzeugen. Eine gleichpolige Anordnung ist im Gegenteil ungünstiger, da sie stets eine wechselnd erregte Mehrmaschinenanordnung erfordert.

Vom Strombelag A aus gesehen verläuft das räumliche Magnetfeld B stets periodisch zwischen positiven und negativen Maximalwerten. Man erhält

die kleinsten Kraft- bzw. Drehmomentschwankungen, wenn man dem räumlichen Verlauf des Strombelages A denselben Verlauf wie dem des Magnetfeldes B gibt.

Grundsätzlich können bei entsprechender Speisung alle Motoren in beiden Drehrichtungen, mit positivem und mit negativem Drehmoment, als Motor oder als Generator betrieben werden (vgl. **Bild 2.10**).

Die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien können im **geregelten** Betrieb beliebig eingestellt werden, wobei dem Betriebsbereich durch die Speisung, Klemmenspannung und Drehzahl Grenzen gesetzt werden.

Im **gestellten Betrieb**, z.B. direkt am Netz, wirken die inhärenten Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien, wobei ihnen durch die Stromwendung, Erwärmung, Klemmenspannung und Drehzahl, Grenzen gesetzt werden.

a) Bei der **Gleichstrommaschine** und beim **Elektronikmotor** ist das Drehmoment M durch die Beziehung gegeben:

$$M = i_a \cdot \Psi_d$$

wobei i_a der Ankerstrom (entsprechend dem Strombelag A) und Ψ_d der mit der Ankerwicklung verkettete Hauptfluss, entsprechend dem Magnetfeld B ist.

Bei den **Schrittmotoren (SRM, MM)** hängt das Drehmoment M von der Abhängigkeit der Selbst- oder Gegeninduktivität L bzw. L_{ab} vom Drehwinkel α ab:

$$M = 0.5 i_a^2 dL/d\alpha \quad M = i_a i_b dL_{ab}/d\alpha$$

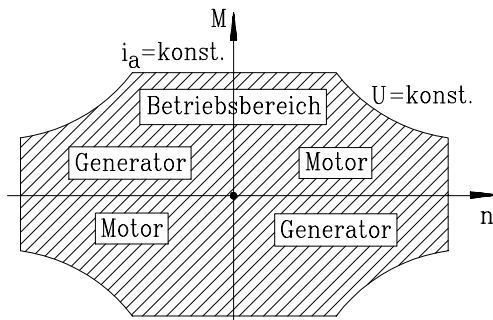
Es wird daher wie bei der Gleichstrommaschine nur vom Strom i_a bestimmt.

Bei **Stromeinprägung (konstanter Strom $i_a, i_b \dots$)** ist bei den Gleichstrommaschinen, dem Elektronikmotor und beim Schrittmotor das Drehmoment M konstant, solange die induzierte Spannung E in der Ankerwicklung

$$E = \Omega \cdot \Psi_d \quad \text{bzw.} \quad E = \Omega i_a dL/d\alpha$$

kleiner als die von aussen vorgegebene Klemmenspannung U ist und damit der Strom konstant gehalten werden kann. Durch eine Schwächung des

Geregelter Betrieb:



Gestellter Betrieb:

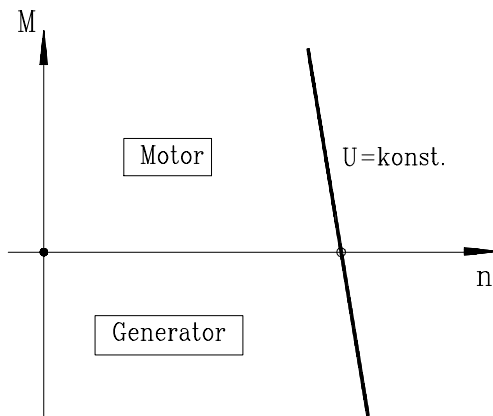


Bild 2.10: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien der GM, EM, SRM und MM

Flusses Ψ_d , bzw. durch eine Verschiebung des Einschaltpunktes beim Elektronikmotor und beim Schrittmotor, kann diese Grenze verschoben werden (vgl. **Bild 2.10**).

Bei **Spannungseinprägung** stellt sich ein Nebenschlussverhalten ein, ausgehend von einer Leerlaufdrehzahl $\Omega_0 = U/\Psi_d$.

b) Bei der **Synchronmaschine** (vgl. **Bild 2.11**) verschiebt sich, abhängig vom Lastmoment, das Polradfeld Ψ_e gegenüber der Leerlauflage um den Polradwinkel δ .

Das Drehmoment M ist vom Polradwinkel δ abhängig (vgl. **Bild 2.12**), wenn die Maschine mit der Spannung U_s bei der Frequenz f_s gespeist wird:

$$M = -\frac{m}{\Omega_s} \frac{U_s E_p}{X_d} \sin \delta$$

wobei m die Strangzahl, U_s die Klemmenspannung, E_p die Polradspannung, X_d die Synchronreaktanz, Ω_s die Winkelgeschwindigkeit, entspre-

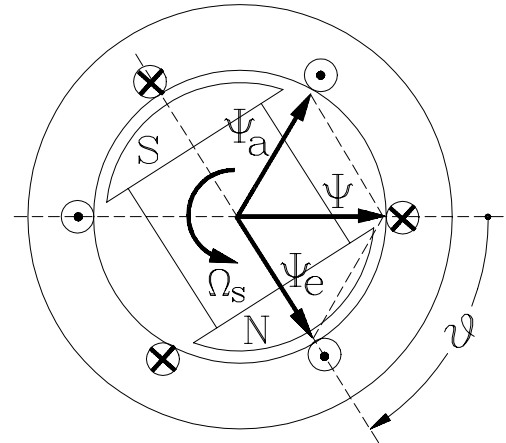


Bild 2.11: Synchronmaschine

chend der Frequenz f_s sind. Die Polradspannung E_p ist bei Stromerregung dem Erregerstrom I_e proportional, bei Dauermagneterregung ist E_p konstant.

Auch bei einer **Stromspeisung** ist das Drehmoment M der Synchronmaschine von einem Winkel, dem Winkel β zwischen dem Statorstrom I_s und der Polradspannung E_p , abhängig:

$$M = -\frac{m}{\Omega_s} E_p I_s \cos \beta$$

Wird das Erregerfeld durch Permanentmagnete erzeugt, so müssen diese in Synchronmaschinen durch einen geeigneten Einbau in das Blechpaket und durch einen Kurzschlusskäfig vor der entmagnetisierenden Wirkung asynchroner Magnetfelder geschützt werden. Mit Hilfe der Käfigwicklung kann die Synchronmaschine dann auch asynchron anlaufen.

c) Bei der **Asynchronmaschine** (**Bild 2.13**) wird bei Speisung mit einem m -Phasen Wechselspannungssystem ein Drehfeld Ψ von den Stator- und von den Rotorströmen aufgebaut, welches sich mit der synchronen Drehzahl n_s dreht. Dieses Feld induziert in der kurzgeschlossenen Rotorwicklung eine Spannung E , welche dem Schlupf s und der Spannung im Stillstand E_{st} proportional ist: $E = sE_{st}$. Im Rotor wird dann von dieser Spannung der Strom I_r , entsprechend der Streureaktanz $X_\sigma = \Omega_s L_s$ und dem Rotorwiderstand R_r erzeugt:

$$I_r = \frac{sE_{st}}{sX_\sigma + R_r}$$

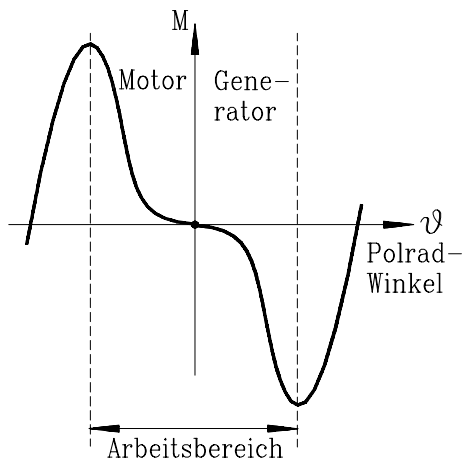
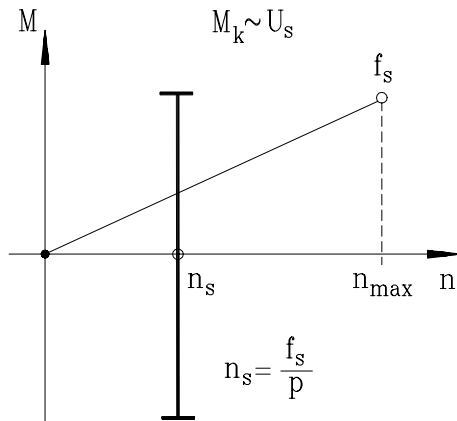


Bild 2.12: Drehmoment der Synchronmaschine

Ein dem Rotorstrom I_r entsprechender Rotorstrombelag A_r bewirkt zusammen mit dem Hauptfeld Ψ ein vom Schlupf s abhängiges Drehmoment $M(s)$:

$$\frac{M}{M_k} \approx \frac{2}{s/s_k + s_k/s}$$

welches beim Kippschlupf $s_k = R_r/X_s$ den Maximalwert

$$M_k = 0.5m(U_s/\Omega_s)^2 1/L_\sigma$$

hat (vgl. **Bild 2.14**). Diese Beziehung gilt für grosse Maschinen, allgemein nur dann, wenn der Statorwiderstand und die Stromverdrängung vernachlässigt werden kann.

Das Anlaufmoment $M_a(s=1)$ der Asynchronmaschine hängt von der Rotorimpedanz: $R_r + j\Omega_r L_\sigma$ ab. Diese kann durch Ausnützen von Stromverdrängungseffekten so beeinflusst werden, dass

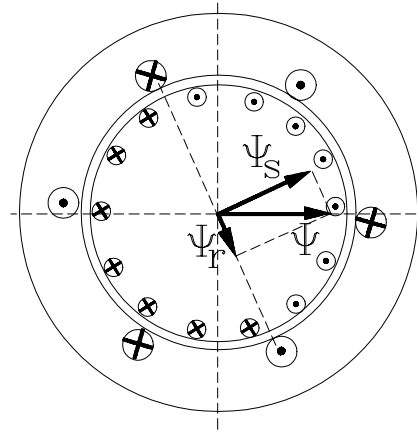


Bild 2.13: Asynchronmaschine

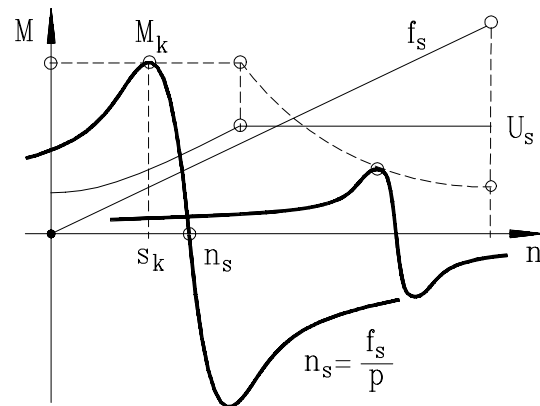


Bild 2.14: Drehmoment der Asynchronmaschine

das Anzugsmoment M_a in die Größenordnung des Kippmomentes M_k kommt.

2.5 Vergleich der Energiewandler

a) Anlaufverhalten

Bei einer geeigneten Spannungs- und/oder Frequenzspeisung sind alle elektrischen Maschinen selbstanlaufend, d.h. sie entwickeln ein hinreichend grosses Anlaufmoment M_a . Begrenzt werden muss der Anlaufstrom bei allen grösseren Maschinen ($> 3 \text{ kW}$) durch eine entsprechende Spannungs- oder Stromsteuerung.

3 Entwicklungstendenzen elektrischer Antriebe

Grundsätzliches:

- **Der Aufwand für die Verbesserung des Wirkungsgrades ist beträchtlich: Die Erhöhung des Wirkungsgrades eines 7.5kW Asynchronmotors um 1% erhöht den Materialeinsatz um ca. 25 %.**
- **Neue Wirkprinzipien für El. Maschinen stehen nicht zur Verfügung.**
- **Durch den gezielten Einsatz der Umrichtertechnik, neuer Magnetwerkstoffe sowie unkonventioneller Wirkprinzipien (Reluktanz-Prinzip) können elektrische Antriebe mit besonderen Eigenschaften verwirklicht werden: Elektronikmotor, Schrittmotor, "Switched-Reluctance-Motor", Magnetmotor.**
- **Permanentmagnetwerkstoffe werden in steigendem Masse in Sondermotoren eingesetzt, zur Verbesserung des Betriebsverhaltens und des Wirkungsgrades.**
- **Bei den weichmagnetischen Werkstoffen, zur Führung des magnetischen Feldes, werden Werkstoffe mit kleine Verlusten und guter Magnetisierbarkeit bevorzugt.**

3.1 Einführung

In der Praxis muss man bei der Auslegung und Betriebsoptimierung von elektrischen Antrieben von gegebenen Antriebskomponenten mit einem bestimmten Entwicklungsstand, von industriell gefertigten Motoren und elektronischen Umrichtern u.a. ausgehen. Die Betrachtungen über die energieoptimale Auslegung und Betriebsführung elektrischer Antriebe geht jedoch in dieser Beziehung von keinen Voraussetzungen aus. Es wird gezeigt, dass vor allem der sachgemässe Einsatz dieser Komponenten die wichtigste Quelle für die Erhöhung der Energieökonomie ist. Es wäre jedenfalls unangebracht, auf die Erhöhung der Wirkungsgrade der Komponenten allein oder gar auf die Erfindung neuer Wirkprinzipien zu warten. Allerdings sollte man wissen, welche Entwicklungstendenzen

für die Erhöhung der Energieökonomie Bedeutung haben und wie man Antriebskomponenten hinsichtlich ihres Entwicklungsstandes energieökonomisch einschätzen muss.

Die folgenden Aussagen müssen sich zwangsläufig auf Aussagen über Entwicklungsfortschritte beschränken, welche sich auf energie- oder materialökonomische Aspekte beziehen, um den Rahmen nicht zu überschreiten.

3.2 Energieoptimale Auslegung von Elektromotoren

Heutzutage ist der Elektromotor gut berechenbar. Einerseits kann man eine sehr gute Übereinstimmung zwischen vorausberechneten und im Prüffeld am gebauten Motor gemessenen Eigenschaften erzielen, andererseits kann man unter tausenden von denkbaren Entwürfen mit Auslegungen eines bestimmten Leistungstyps, z.B. eines 7.5kW-Asynchronmotors den besten automatisch auswählen. Ein solcher optimaler Entwurf - die Methode ist in der Technik allgemein bekannt als Computer Aided Design - hat die geforderten Leistungsdaten zu erfüllen und genügt einem Optimierungskriterium oder minimiert eine Zielfunktion. Vom Standpunkt eines international abgeschlossenen Wirtschaftssystems aus gesehen, kann diese Zielfunktion nur die Summe aller Aufwendungen sein, die bei der Produktion und beim Betrieb dieses Elektromotors in dem erwähnten Wirtschaftsgebiet entstehen. Der Aufwand im Einzelnen entsteht durch die Erzeugung der verwendeten Materialien, durch die Arbeitsaufwendungen bei der Herstellung des Motors und durch den Energieverbrauch beim Betrieb des Motors. Der Rahmen des Wirtschaftssystems wurde deshalb ausdrücklich erwähnt, weil die den Aufwendungen zugrundeliegenden Preise für Material, Arbeitskraft und Energie den Gegebenheiten und Erschliessungsmöglichkeiten dieses Systems angemessen sind.

Es wäre also unwirtschaftlich und einseitig, wenn bedingungslos Elektromotoren mit höherem Wirkungsgrad gefordert würden, ohne Rücksicht auf die höheren Materialaufwendungen, welche durch

eine, für den elektrischen Strom und für den magnetischen Fluss bequemere, grössere Ausführung des Motors entstehen. Schliesslich ist ja auch der Wert der Werkstoffe zu wesentlichen Teilen durch die Energieaufwendungen für ihre Herstellung bedingt.

Bei der Optimierung des Motors wird die Zielfunktion minimiert:

$$Z = K_F + K_M + K_B T_E \Rightarrow \min!$$

Dabei bedeuten:

- K_F = Fertigungskosten
- K_M = Materialkosten
- K_B = Jährliche Betriebskosten, d.h.
Kosten für Wirk- und Blindleistung
- T_E = Effektive Nutzungsdauer

Die effektive Nutzungsdauer T_E berücksichtigt die Tatsache, dass die während einer kalendarisch vorgesehenen, sogenannten normativen Nutzungsdauer T_N entstehenden Kosten, nicht den zum gegenwärtigen Zeitpunkt festzustellenden Kosten gegenübergestellt werden können. Denn die gegenwärtig festgestellten Kosten oder Werte könnte man in diesem kalendarischen Zeitraum mit dem Tempo des allgemeinen Kapitalwachstums oder der Akkumulationsrate q wachsen lassen:

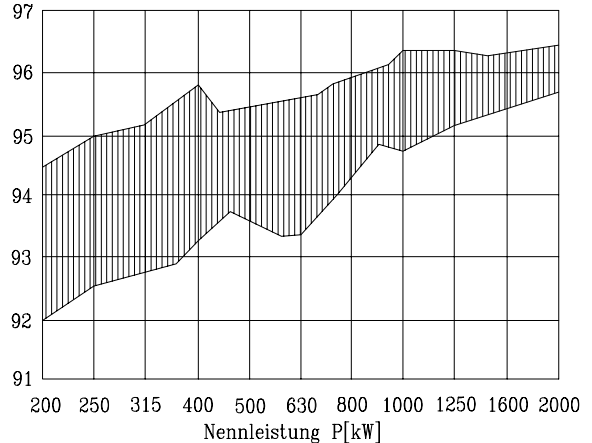
$$T_E = \frac{q^{T_N} - 1}{q^{T_N}(q - 1)}$$

Bei einer normativen Nutzungszeit des Motors T_N von 20 Jahren und einer Akkumulationsrate von $q = 1.13$ beträgt die effektive Nutzungsdauer $T_E \approx 7$ Jahre, d.h. es können nur die Betriebskosten der zukünftigen 7 Jahre den gegenwärtig aufzubringenden Investitionskosten für den Motor gegenübergestellt werden.

Das Wechselspiel zwischen Materialaufwand und Wirkungsgrad soll durch die Ergebnisse von Optimierungsrechnungen illustriert werden. Unter der Voraussetzung, dass die Preise in diesem Zusammenhang nicht von Interesse sind, die effektiven Nutzungsdauer $T_E = 5$ Jahre und die Betriebszeit 1500 Stunden/Jahr beträgt, ergaben sich die in der **Tabelle 3.1** dargestellten Zusatzkosten für eine Wirkungsgraderhöhung.

Die Unterschiede in den notwendigen Materialeinsatzerhöhungen spiegeln natürlich den Entwicklungsstand der jeweiligen Erzeugnisreihen und auch

77 Wirkungsgrad vierpoliger Asynchronmotoren mit Käfigläufer und Luft-Luft Kühler 6kV, IP44



Masse-Leistungs-Verhältnis vierpoliger Asynchronmotoren mit Käfigläufer und Luft-Luft-Kühler 6kV, IP44

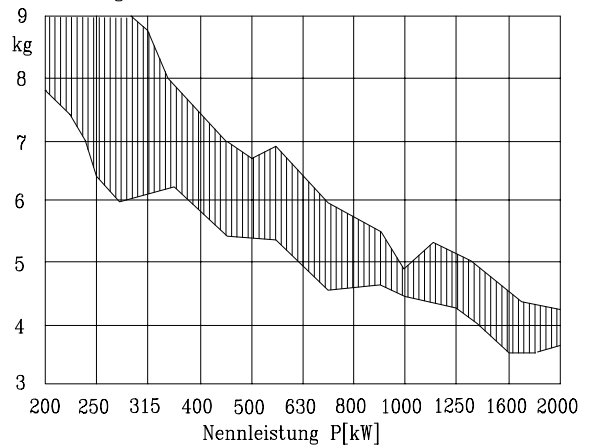


Bild 3.1: Wirkungsgrade und Masse-Leistungsverhältnisse einer Leistungsreihe von Asynchronmotoren verschiedener Hersteller

die Sorgfalt einer energieökonomisch günstigen Auslegung bei grossen Leistungen wieder.

Selbstverständlich wird nicht für jeden Einzelfall bei Leistungen unter 100 kW ein individueller, optimaler Motor entworfen und gebaut. Der Motor wird aus einer Leistungsreihe entnommen, die international vergleichbare Wirkungsgrade und Materialeinsatzwerte verkörpert. **Bild 3.1** zeigt solche Werte für die Leistungsreihe eines Motorherstellers, die im internationalen Vergleichsband dem erforderlichen Kompromiss zwischen Energie- und Materialökonomie gut gerecht wird.

Für Leistungen unter 100 kW bieten die Elektromotorhersteller in Anbetracht der energieökonomisch unterschiedlichen Einsatzfälle neben der Norm-

Standardreihe eine Energiesparmotoren-Reihe an, für die ein Kompromiss zwischen Material- und Energieaufwand gefunden wurde.

Motor-Leistung kW	Wirkungsgrad- erhöhung von	Zusatz- Kosten
132	0.93 auf 0.94	13 %
7.5	0.84 auf 0.85	7 %
0.75	0.73 auf 0.74	2.5 %

Tabelle 3.1: Zusatzkosten bei Wirkungsgraderhöhung

Die Modifikation des Normmotors zum Energiesparmotor soll am Beispiel eines Motorenherstellers erläutert werden, der bisher sowohl den westlichen Markt nach IEC-Norm als auch den östlichen Markt nach der bezüglich Leistungs-Achshöhen-Zuordnung progressiveren RGW-Norm belieferte.

In **Bild 3.2** wird sichtbar, dass im Rahmen der IEC-Norm ein 1.5 kW Niederspannungs-Asynchronmotor sowohl in Normalausführung als auch als Energiesparmotor, lediglich durch Änderung der Wicklungsauslegung, lieferbar ist. Dabei folgt die angedeutete Preisrelation den natürlichen Wachstumsgesetzen.

Dementsprechend haben sich in den verschiedenen Ländern unterschiedliche Normen ergeben, so dass zum Beispiel für die gleiche Leistung Motoren unterschiedlicher Achshöhe geliefert werden.

Das bedeutet aber, dass die IEC-Norm mit einer materialintensiven und kompakten, aber natürlich energieökonomischeren Ausführung erfüllt werden kann ohne dass die Konstruktion verändert werden muss. **Bild 3.3** zeigt Wirkungsgrade der Normmotoren-Reihe nach IEC und der Energiesparmotoren-Reihen verschiedener Hersteller.

Die ökonomische Wertung der Wirkungsgradsteigerung ist von den jeweiligen Tarifbedingungen abhängig. In der Industrie darf man nur überschlagsweise einen Wert für ein Prozent Wirkungsgrad oder ein Watt Verluste ansetzen. Für den 7.5 kW-Motor wurde für die einprozentige Wirkungsgraderhöhung eine mögliche äquivalente Erhöhung des Einkaufspreises um 26.2% angenommen [35]. In vielen Fällen lohnt sich die Verwendung von Energiesparmotoren, d.h. bisher waren die Normmotoren-Reihen noch nicht unter Berücksichtigung der vollen Zielfunktion optimiert.

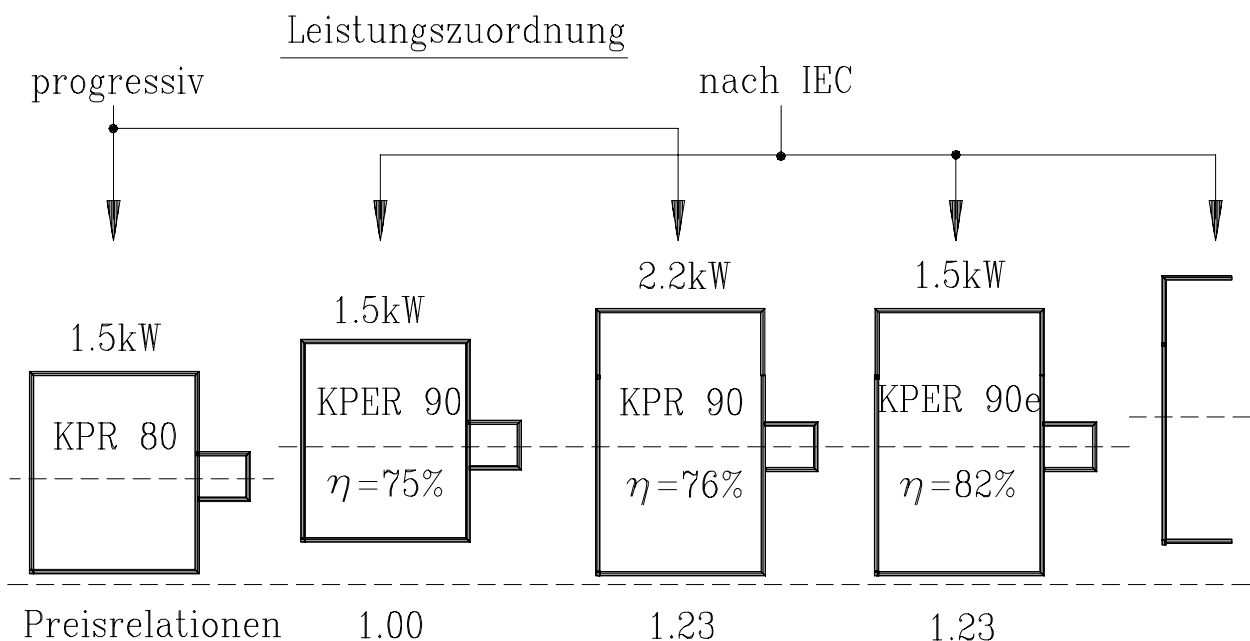


Bild 3.2: Modifikation zum Energiesparmotor

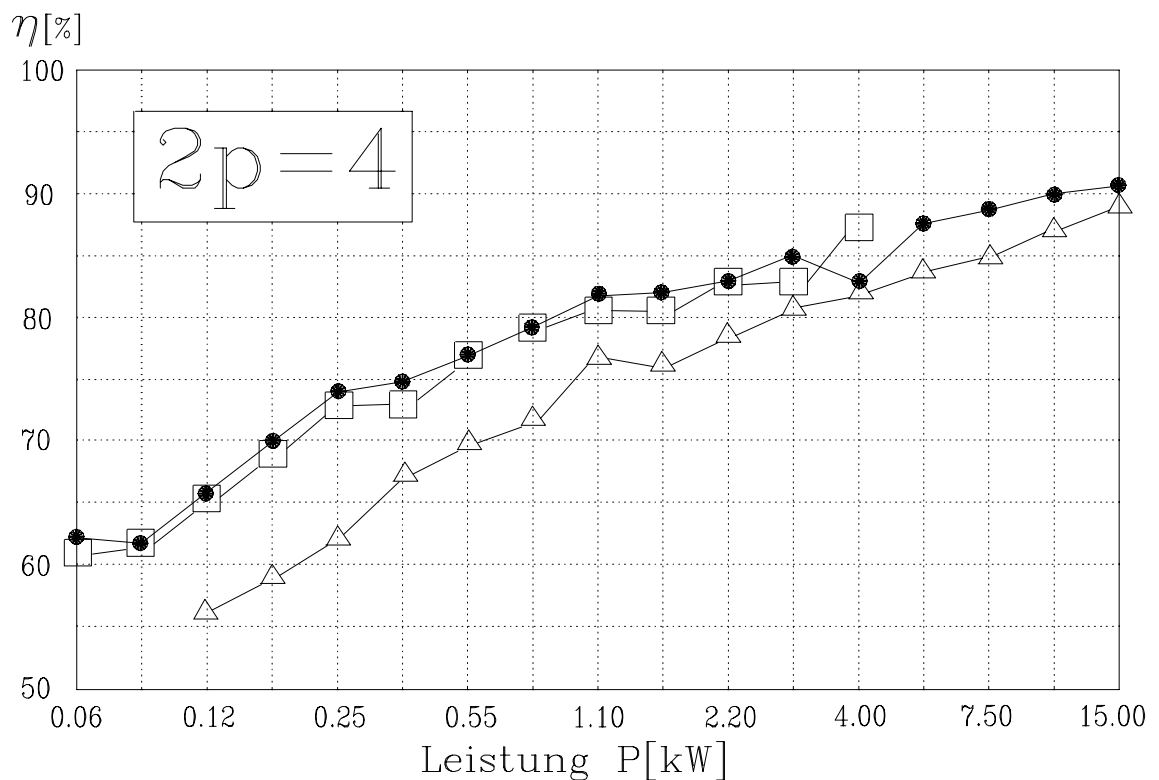
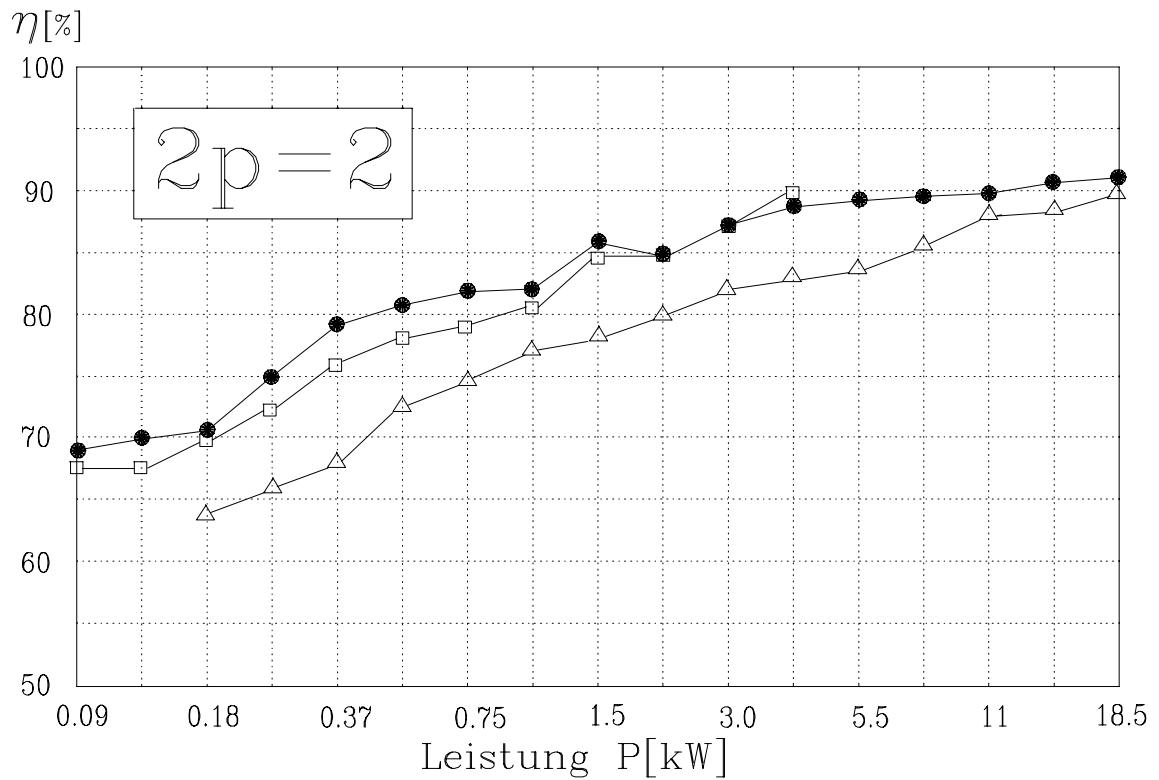


Bild 3.3: Wirkungsgrade von 2- und 4-poligen ASM - Energiesparmotoren im Vergleich zu Normmotoren

Δ : Normmotoren $\bullet$, $\square$: Energiesparmotoren verschiedener Hersteller

3.3 Neue Wirkprinzipien bei elektrischen Antrieben

Grundsätzlich beruht die elektromagnetisch-mechanische Energieumwandlung auf den folgenden Grundprinzipien:

- Stromführende Leiter erfahren im Magnetfeld eine Kraft, wobei sich die magnetische Energie nicht wesentlich verändert.
- Magnetisierte Körper (Eisen, Permanentmagnete) ziehen sich an, bzw. stoßen sich ab, abhängig von der Polarisierung, wobei die Kraftwirkung der Änderung der magnetischen Energie proportional ist.

Die Umsetzung dieser Wirkprinzipien in konstruktive Lösungen hat eine lange Tradition. Interessanterweise wurde zuerst die sogenannte "Magnetmaschine" entwickelt, z.B. für den Antrieb eines Schiffes (ca. 1830 in St. Petersburg), welche das Prinzip der "Kraft zwischen magnetisierten Körpern" ausnützt.

Die auf dem Prinzip der "Kraft auf stromführende Leiter im Magnetfeld" beruhenden Gleichstrom-, Asynchron- und Synchronmaschinen wurden erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts erfunden, bzw. industriell genutzt.

Von den Grundprinzipien her gesehen sind keine neuen Entwicklungen festzustellen oder zu erwarten.

Dagegen lassen sich in der Realisierung immer noch Fortschritte feststellen; sie beruhen auf :

- der Anwendung der Stromrichtertechnik zur Speisung der elektrischen Maschine,
- einer Kombination der Prinzipien, wie z.B. bei der Reluktanzmaschine, einer Drehfeldmaschine mit magnetischer Anisotropie im Rotor,
- einer verlustminimalen Magnetfelderzeugung, wie z.B. bei den synchronisierten Asynchronmaschinen mit Permanentmagneterregung,
- einer besonderen Wicklungsauslegung und Anordnung, wie z.B. beim Magnetmotor, einem Schrittmotor mit Permanentmagneterregung,
- einer besonderen Ausführung des magnetischen Kreises, bzw. der Magnetpole, wie z.B. beim

Schrittmotor, ohne oder mit Rotorlagerückmeldung ("Switched Reluctance" Motor),

- einer zusätzlichen, äusseren Beschaltung, mit passiven oder aktiven Elementen, wie z.B. beim Permanentmagnet-Synchronmotor durch Drosselspulen zur Erweiterung des Betriebsbereiches in Richtung Feldschwächung oder beim Asynchronmotor mit Schleifringläufer mit rotorseitigem Stromrichter (Stromrichtererkaskade),
- der speziellen Auslegung der elektrischen Maschine in die Richtungen: Grosser Drehschub, langsamlaufend od. grosse Drehzahl, bzw. grosse Umfangsgeschwindigkeit.

Die folgenden Entwicklungen können für eine Weiterentwicklung der Antriebstechnik beachtenswert werden:

a) Drehfeldmaschinen mit Permanentmagneterregung und Käfigrotor für den Anlauf

Dabei werden die Permanentmagnete (Ferrit, Sm Co5, NdFeB) im Rotorinnern angebracht, so dass sie im Anlauf durch die aussenliegende Käfigwicklung gegen das entmagnetisierende Drehfeld abgeschirmt werden. Der Stator ist geblecht und gleichmässig genutet und enthält eine verteilte dreisträngige Wicklung wie bei einer Asynchronmaschine.

Durch Permanentmagnete werden im Synchronbetrieb die Rotorwicklungs-Verluste eliminiert, d.h. die Erregerverluste verkleinert. Insgesamt können dadurch die Verluste um 17 – 25% im Vergleich zu einem Asynchronmotor vermindert werden. Die zusätzlichen Aufwendungen (Permanentmagnete) werden durch die Energieeinsparungen innerhalb eines Jahres amortisiert. Trotzdem hat sich dieser Motortyp am Markt noch nicht durchgesetzt. Als Ursachen sind leider auch technische Probleme zu nennen, wie z.B. das Anlauf- und Synchronisierungsproblem bei grossen Lastträgheitsmomenten, die grossen Einschaltströme und die Temperaturempfindlichkeit der Permanentmagnete, neben der komplexeren Technologie im Vergleich zur Asynchronmaschine.

b) Sychrone Reluktanzmotoren

Diese Drehfeldmaschinen erreichen die Eigenschaften von Asynchronmaschinen, wenn der Rotor so

strukturiert oder axial lamelliert wird, dass das Verhältnis der synchronen Reaktanzen X_d/X_q den Wert von 5 übersteigt. Sie müssen allerdings mit Umrichtern (U/f-Typ) gespeist werden, wenn nicht zusätzlich ein Anlaufkäfig vorgesehen wurde (wobei dann wieder die vorher genannten Probleme auftreten können). Der Stator ist wie bei einer Asynchronmaschine ausgeführt, wobei die Wicklung auch vielsträngig ($m > 3$) sein und dann auch mit Rechteckströmen gespeist werden kann.

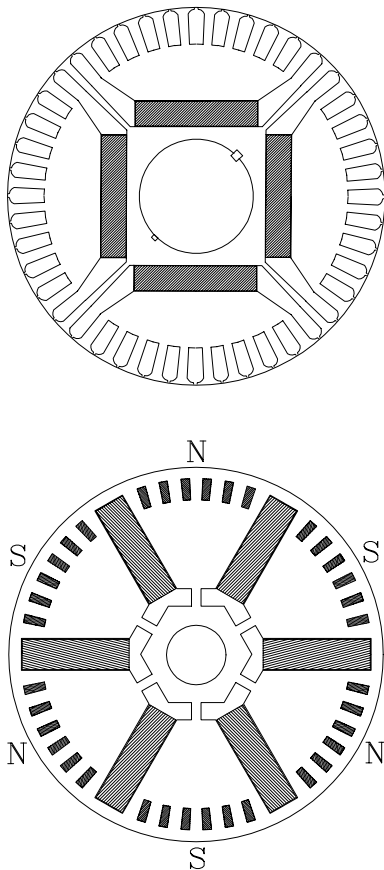


Bild 3.4: Rotoren selbstanlaufender Synchronmaschinen mit Permanentmagneten und Anlauf-Kurzschlusskäfigen

c) Schrittmotor und "Switched Reluctance" Motor

Grundsätzlich kann die verteilte m -strängige Wicklung, welche bei Speisung mit einem m -Phasen-Stromsystem ein Drehfeld im Luftspalt und im Rotor erzeugt auch durch eine konzentrierte Wicklung ersetzt werden, welche jedoch nur noch in einem Nutpaar pro Strang untergebracht ist (vgl. **Bild 3.6**).

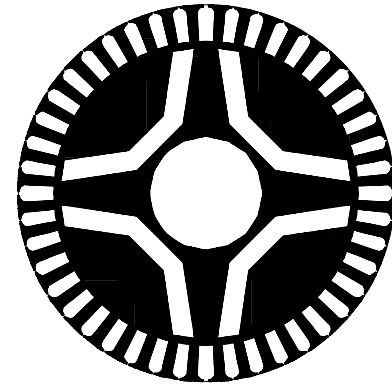
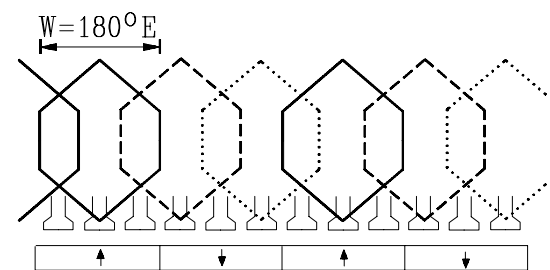
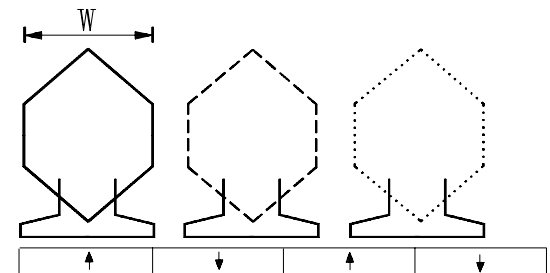


Bild 3.5: Rotor eines Reluktanzmotors



a) verteilte, 3-sträng. Wicklung mit vier Polen



b) konzentrierte, 3-sträng. Wicklung mit vier Polen

Bild 3.6: Übergang von der verteilten Wicklung auf eine konzentrierte

Die Spulenweite W ist dann kleiner als $2\pi/Z_s$, wenn mit Z_s die Anzahl der Spulen bezeichnet wird. Der Rotor besteht aus Weicheisen und hat Z_R Zähne, welche einer Polzahl von $2p$ entsprechen. Der Motor kann dann in m einzelnen Wicklungssträngen $m = Z_R/(Z_s - Z_R)$ unipolar eingespeist werden und bewegt sich bei jedem Stromimpuls um den Schrittwinkel $\alpha_0 = 2\pi(1/Z_R - 1/Z_s)$ weiter, wenn gemäss **Bild 3.7** jeweils nur ein Strang erregt wird.

Schrittmotoren und "Switched Reluctance" Motoren (SRM) können nicht direkt am Drehstromnetz betrieben werden. Sie müssen aus einem m strängigen, unipolaren Umrichter gespeist werden.

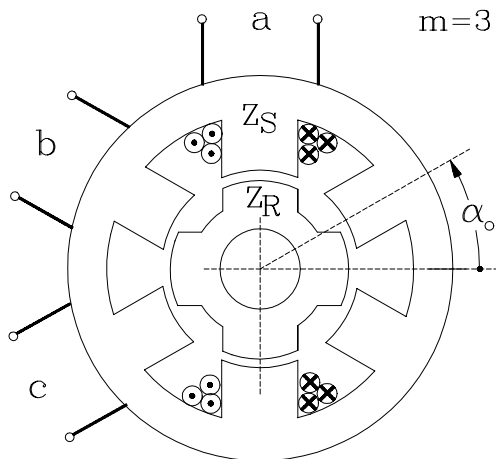


Bild 3.7: Aufbau eines "Switched Reluctance" Motors

Ein Schrittmotor hat keine Rotorlageerfassung zur Synchronisierung der Umrichterspeisung. Er verhält sich demnach wie eine Synchronmaschine mit Spannungsspeisung, d.h. er ist nur begrenzt selbstanlaufend und belastbar. Schrittmotoren neigen zu Schwingungen. Sie sind daher nur für einfache, gut definierbare Antriebsaufgaben einsetzbar.

Bei einem "Switched Reluctance" Motor wird der Umrichter durch eine Rotorlageerfassung synchronisiert. Demnach verhält er sich wie eine Gleichstrommaschine mit Fremderregung und Ankerstrombegrenzung, d.h. er ist selbstanlaufend und beliebig steuerbar.

"Switched Reluctance" Motoren erreichen verhältnismässig hohe Wirkungsgrade (80 – 85 %), vergleichbar mit Asynchronmaschinen. Sie haben eine Reihenschlusscharakteristik und entwickeln im Stillstand ein sehr grosses Drehmoment (das 1.5-2 - fache der Asynchronmaschine) ohne dass Verluste im Rotor auftreten (vgl. **Bilder 3.8** und **3.9**).

d) "Magnetmotoren" (Schrittmotoren mit Permanentmagneten und Rotorlageerfassung)

Beim Magnetmotor wird der Rotor mit $2p$ Permanentmagneten bestückt. Der Stator hat, wie der "Switched Reluctance" Motor, Z_s ausgeprägte Pole mit konzentrierten Wicklungen, welche in m Wicklungssträngen zusammengefasst sind. Die Wicklungen werden bipolar über Umrichter, entsprechend der Rotorlage, gespeist. Bei jedem

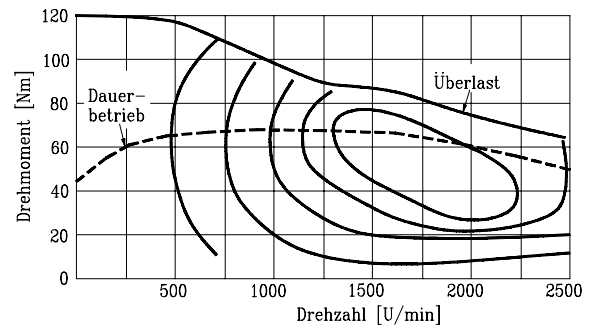


Bild 3.8: M,n-Kennlinie eines "Switched Reluctance Motors", $P = 10 \text{ kW}$

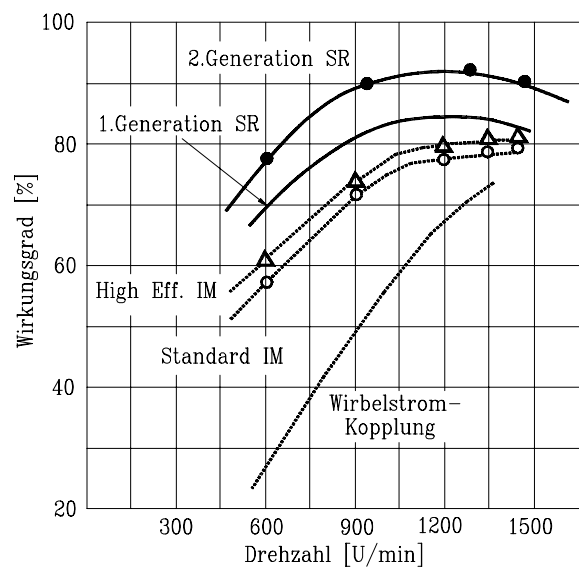


Bild 3.9: "Switched-Reluctance Motor" $P = 22 \text{ kW}$ für einen Ventilatorantrieb, Wirkungsgradvergleich mit Asynchronmaschinen

Stromimpuls dreht sich der Rotor um den Winkel $\alpha_0 = 2\pi(1/2p - 1/Z_s)$ weiter.

Bei der im **Bild 3.10** dargestellten Ausführung dreht sich der aussenliegende, mit Permanentmagneten bestückte Rotor, um den innenliegenden Stator. Dadurch entfallen die Befestigungsprobleme der Permanentmagnete. Magnetmotoren erreichen sehr grosse Wirkungsgrade (92 % bei Leistungen von 10 kW) und sehr grosse Schubkräfte. Sie sind daher besonders geeignet für Direktantriebe, welche bei niedrigen Drehzahlen ein hohes Drehmoment verlangen: im Ergebnis sind sie mit den fremderregten, ankerstrom-eingeprägten Gleichstrommaschinen vergleichbar. Problematisch ist sowohl beim "Switched Reluctance" Motor

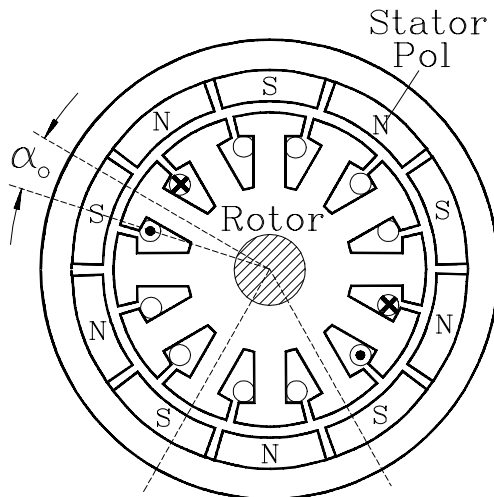


Bild 3.10: Aufbau eines Magnetmotors mit $m = 3$ Wicklungssträngen

als auch beim Magnetmotor die Kühlung der konzentrierten Wicklungen und die hohen Schaltfrequenzen bei grossen Drehzahlen mit den entsprechenden Verlusten im Umrichter und im Motor, da es nur sinnvoll ist, die Maschinen mit einer grossen Anzahl von Zähnen, bzw. Polzahlen auszuführen, um grosse Ausnützungen zu erreichen.

Zusammenfassend muss leider festgestellt werden, dass alle diese Entwicklungen noch keine grosse Beachtung in der Fachwelt gefunden haben. Es scheint jedoch sinnvoll zu sein, ihren Einsatz bei neuen Anwendungen stromrichter gespeister Antriebe und bei integrierten Systemen in Betracht zu ziehen, da damit auch bei kleinen Leistungen hohe Wirkungsgrade und kostengünstige Systeme realisiert werden können.

3.4 Materialfortschritte

Von den in Antriebskomponenten eingesetzten Materialien sind im wesentlichen nur die in Elektromotoren eingesetzten Magnetwerkstoffe energieökonomisch relevant, wenn man davon absieht, dass in absehbarer Zeit die Supraleitfähigkeit in den Wicklungen von Elektromotoren genutzt werden kann. Auch der Einsatz sogenannter "warmer" Supraleiter, welche schon bei der Temperatur des verflüssigten Stickstoffs funktioniert, erlangt zunächst keine Bedeutung für Antriebsmotoren. Sauerstofffreies Leiterkupfer bringt einen

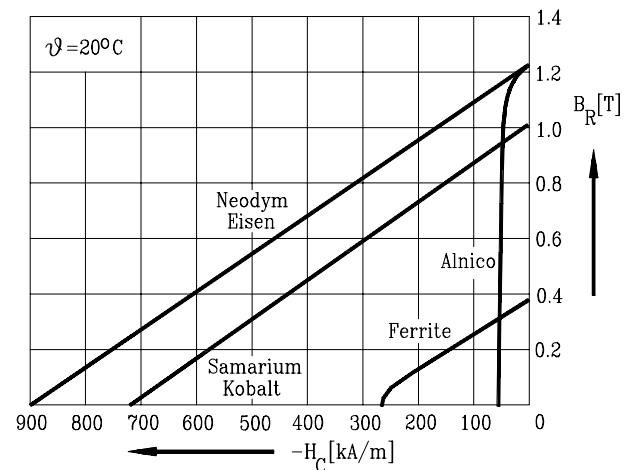


Bild 3.11: Vergleich von heute verfügbaren Permanentmagnetwerkstoffen anhand der Entmagnetisierungs-Kennlinien: Remanenzflussdichte B_R als Funktion der Koerzitiv-Feldstärke H_C . Das Energieprodukt $B_R \cdot H_C$ ist ein Kennwert für die Leistungsfähigkeit des Materials

Leitfähigkeitsgewinn, dessen ökonomisch umsetzbarer Effekt jedoch zu gering ist.

A: Permanentmagnetwerkstoffe

Bei den Magnetwerkstoffen haben die **Permanentmagnetwerkstoffe** in letzter Zeit die stürmischste Entwicklung durchlaufen. In den vergangenen Jahren führte der Einsatz von Selten-Erden-Kobalt-Magneten, speziell von Samarium-Kobalt (SmCo), vor allem zur Miniaturisierung von Kleinmotoren und zur bedeutenden Parameterverbesserung bei Servomotoren. Sie verhalten damit der Drehstromvariante gegenüber der Gleichstromvariante zum Durchbruch. Der relativ hohe Preis der dabei vorwiegend eingesetzten SmCo-Magnete war bei diesen hochwertigen Antrieben kein Hinderungsgrund für den Einsatz, auch bei hohen Fertigungsstückzahlen.

Die in den letzten Jahren entwickelte Variante auf der Basis von Neodym-Eisen-Bor hat bei zwar niedrigerem Preis den Nachteil des Verlustes der Magnetisierung bei relativ niedrigen Temperaturen, wie sie in Motoren im Überlastfall leicht auftreten können. **Bild 3.11** zeigt eine Gegenüberstellung der B-H-Kennlinien der heute verfügbaren Permanent-

magnetwerkstoffe.

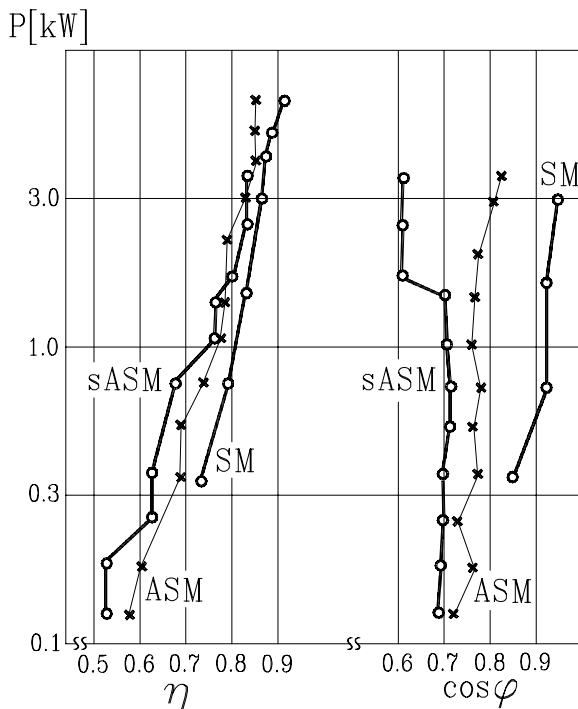


Bild 3.12: Synchronmotoren (SM) mit hohen Werten von Wirkungsgrad η und Leistungsfaktor $\cos \varphi$ im Vergleich zu Asynchronmotoren (ASM) und synchronisierfähigen Asynchronmotoren (sASM)

Wenn heute aus energieökonomischen Gründen Permanentmagnete bei Elektromotoren eingesetzt werden, dann sind es bei Motoren bis zu wenigen kW Leistung Samarium-Kobalt-Magnete, so auch bei den mit hoher Stückzahl eingesetzten Motoren für Heizungsumwälzpumpen. Die Entscheidung zu einer Antriebsvariante mit Permanentmagnetanregung an Stelle des Einsatzes eines Asynchronmotors, kann für Massenanwendungen wesentlich durch die Weiterentwicklung von Neodym-Eisen-Bor-Magneten in Richtung geringerer Temperaturempfindlichkeit gefördert werden.

Bild 3.12 zeigt einen Vergleich zwischen mit Samarium-Kobalt-Magneten bestückten Synchronmotoren (SM), Asynchronmotoren (ASM) und synchronisierfähigen Asynchronmotoren (sASM) hinsichtlich ihrer energetischen Parameter Wirkungsgrad η und Leistungsfaktor $\cos \varphi$.

Für grössere Leistungen von Antriebsmotoren, bei denen die Energieökonomie im Vordergrund steht

Wirkungsgrade $\eta\%$			
Leistung	SM	ASM	GM
100 kW	96.2 %	94.8 %	91.0 %
200 kW	96.6 %	95.5 %	92.0 %

Tabelle 3.1: Wirkungsgrade von Synchronmaschinen (SM), Asynchronmaschinen (ASM) und Gleichstrommaschinen (GM) mit **Ferrit-Magneten** bei 1500U/min

und an die Regelbarkeit keine hohen Anforderungen gestellt werden, (das ist zum Beispiel bei Druckmaschinen- Hauptantrieben der Fall), verbietet sich aus Preisgründen der Einsatz von SmCo-Magneten. Aber auch Ferrit-Magnete können zu energieökonomischen Fortschritten führen (vgl. **Tabelle 3.1**).

Vergleichende Untersuchungen zum Einsatz von Permanentmagneten gibt es nach [12] bis zu Leistungen von über 3 MW.

B: Weichmagnetische Werkstoffe (Dynamoblech)

Die weichmagnetischen Werkstoffe für elektrische Maschinen werden oft als **Dynamobänder** bezeichnet. Sie sind gekennzeichnet durch die Verlustziffer $V(B)$, eine auf die Masse bezogene Summe von Wirbelstrom- und Hystereseverlusten und die Magnetisierungskennlinie, wobei die Abhängigkeit der Flussdichte B von der magnetischen Feldstärke H , in ihrer Lage grob durch den Wert der Flussdichte B_{25} bei einer Feldstärke von 25 A/cm gekennzeichnet wird. Besonderes Merkmal der Dynamobänder ist die Unabhängigkeit dieser Werte von der Richtung der Magnetisierung in der Ebene der Bleche, aus denen Magnetkörper von Elektromotoren aufgebaut sind. Um ein Drehfeld in der Maschine erzeugen zu können, müssen alle Feldrichtungen gleich gut verwirklicht werden. Dynamobänder müssen isotrop sein.

Die besten magnetischen Eigenschaften erreicht man allerdings, wenn man die Elementarbestandteile des Magnetmaterials, die einzelnen Eisen-Silizium Kristalle, gleichrichtet. Das ergibt zwar

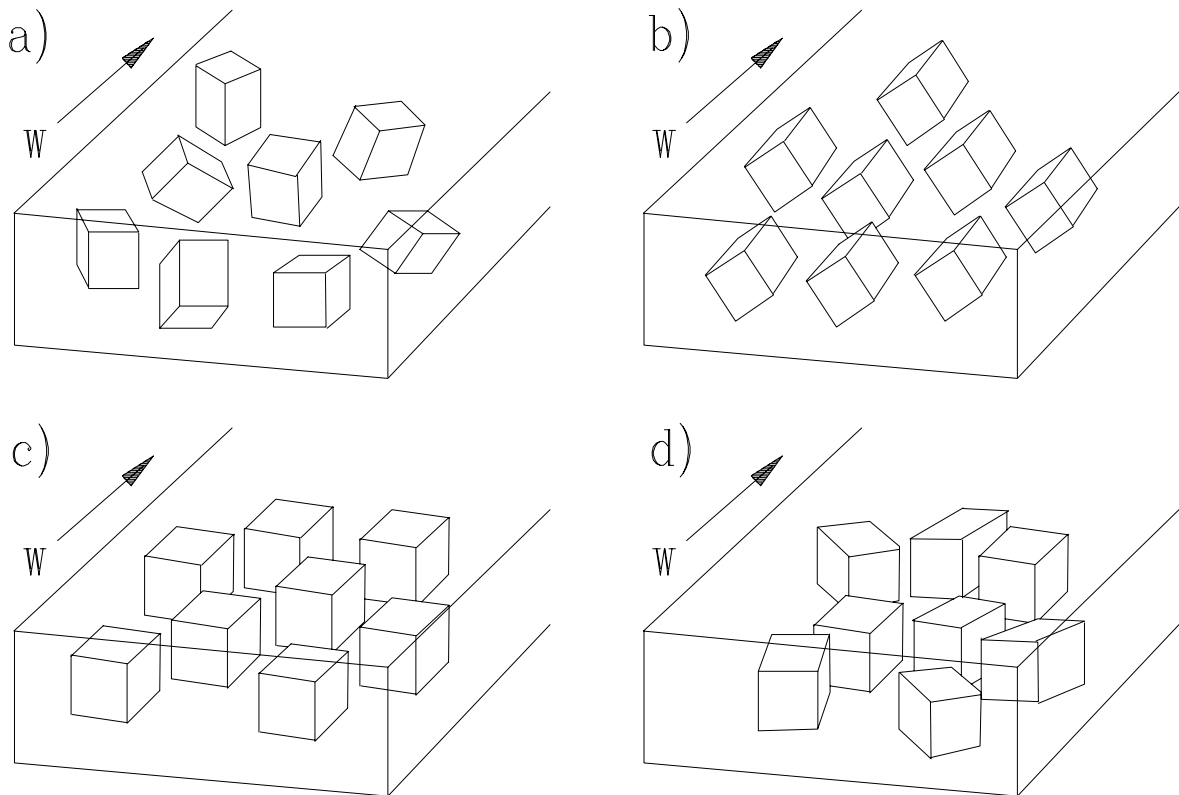


Bild 3.13: Anordnung der Gefügebausteine in Elektroblechen (W = Walzrichtung)

- a) Ohne Ausrichtung: isotrope Eigenschaften
- b) Ausrichtung für Transformatoren-Anwendung (anisotrop)
- c) Würfelkanten-Textur, ebenfalls nur für Transformatoren geeignet
- d) Würfelflächen-Textur, für Elektromotoren geeignet da isotrop

eine Anisotropie, die im Transformator mit seinen rechtwinklig zueinander stehenden Schenkeln nicht stört. Für die rotierende elektrische Maschine erfordert sie aber eine noch weitergehende Orientierung, um nach aussen hin Isotropie zu erzielen.

Für Elektromotoren sind Dynamobänder mit sogenannter Würfel-Flächen-Textur nach **Bild 3.13** notwendig. Gerade jetzt bahnt sich eine solche Entwicklung [21] von Dynamobändern mit Würfel-Flächen-Textur an.

Die Bewertung von Dynamobändern aus energieökonomischer Sicht darf sich nicht auf die Bewertung der Verlustziffern beschränken, obwohl sie allein mit dem Energieverbrauch in Verbindung zu stehen scheint. Es müssen vielmehr die beiden genannten Kennziffern $V(B)$ und B_{25} zur Beurteilung herangezogen werden.

In **Bild 3.14** sind in einem entsprechenden Diagramm Linien gleicher Magnetkörperlängen von

Asynchronmotoren eingetragen worden. Die Richtung des Fortschritts für den Elektromotor ist leicht aus der Wertefolge der beiden Geraden ablesbar: Die Länge des Magnetkörpers und damit die eingesetzte aktive Masse ist umso kleiner, je niedriger die Verlustziffer $V(B = 1.5 T)$ und je höher die Flussdichte B_{25} ist. Damit ist in Anbetracht der Äquivalenz von Masse und Wirkungsgrad, wie im nächsten Abschnitt noch gezeigt wird, auch der Fortschritt im Hinblick auf den erzielbaren Wirkungsgrad des Motors gekennzeichnet. Besonders wichtig bei der Beurteilung von Dynamobändern ist die Wirkung des Stanzens beim Fertigungsprozess auf die magnetischen Werkstoffe. In **Bild 3.14** ist diese Wirkung für ein bestimmtes Dynamoband demonstriert. Die magnetischen Eigenschaften werden schlechter. Somit ist auch ein technologischer Aspekt angesprochen: Die energetischen Kennwerte des Motors sind am besten, wenn die aus Dynamobändern gestanzten Ronden nochmals gegläht werden. Das geschieht im Rahmen eines

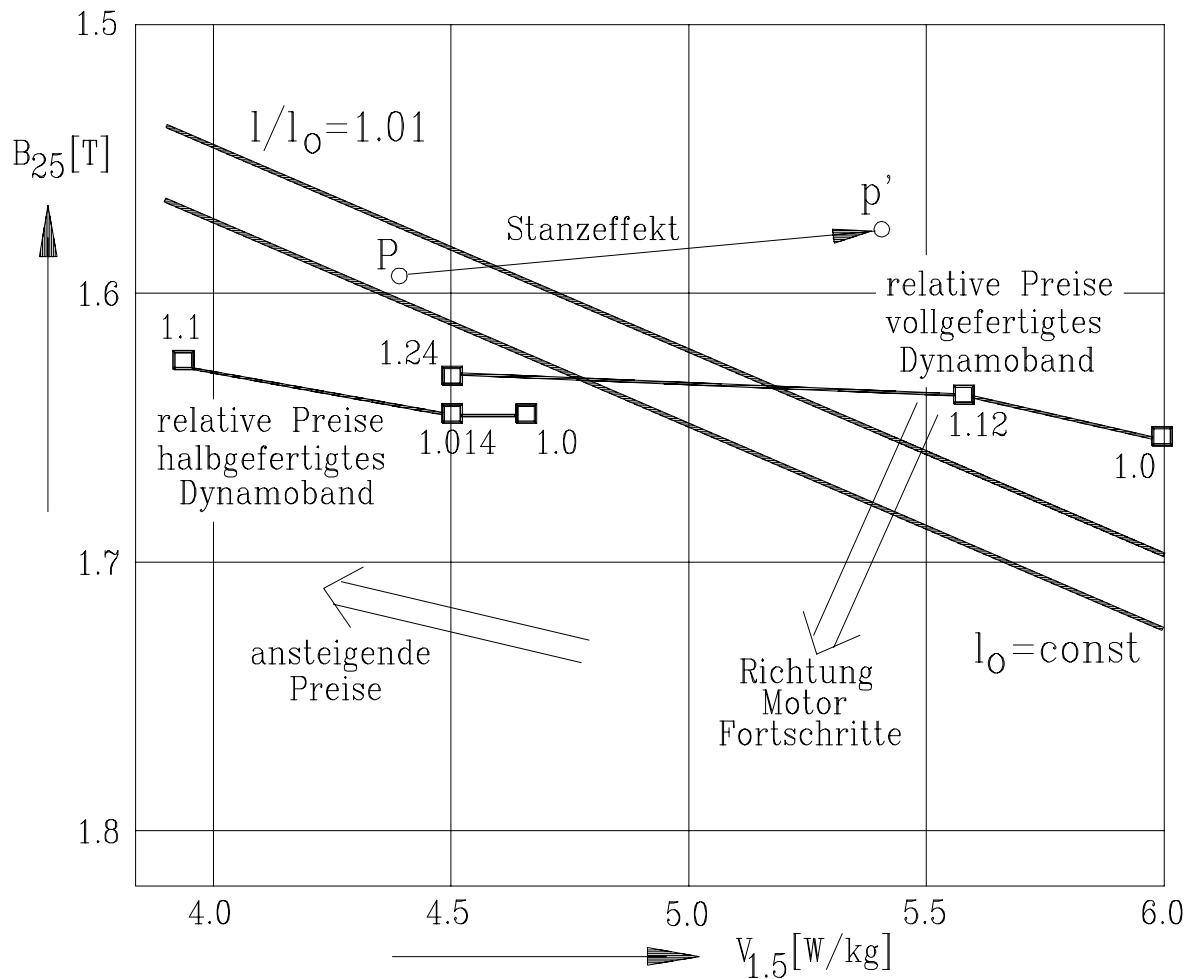


Bild 3.14: Bewertung von Dynamobändern (Erklärung siehe Text)

sogenannten "semifinished" Prozesses [30]. Ein weiterer Effekt der Glühung besteht darin, dass die Bleche der Magnetkörper allseitig durch Oxydation isoliert sind. Diese verbessert wiederum die Eignung der Drehstrommotoren für die Frequenzstellung mittels Umrichter.

Bei Dynamobändern besteht noch die Möglichkeit der Verbesserung des Wirkungsgrades durch den Übergang zu dünneren Blechdicken. In den USA wurde bereits ein solcher Weg begangen, allerdings bei einem wesentlich schlechteren Ausgangspunkt

von 0.7 mm auf die in Europa übliche, aber vielleicht noch nicht optimale Blechdicke von 0.5 mm .

Eine kurze Bemerkung zu **amorphen Bändern**, die sich im Rahmen eines sehr rationellen Herstellungsprozesses mit Dicken von 0.05 mm bei kleiner Flussdichte von $B_{1.5}$ um 1.4 T produzieren lassen. Sie sind trotz sehr kleiner Verluste derzeit für die Herstellung von Elektromotoren mit den angesprochenen industriellen Anwendungszwecken nicht geeignet.

4 Methodik der energieökonomischen Auslegung elektrischer Antriebe

Grundsätzliches:

- Die Mehrheit der elektrischen Maschinen in Antrieben ist unterbelastet, bzw. überdimensioniert, d.h. nicht optimal belastet.
- Nicht optimal ausgenutzte Antriebe bedeutet: Grössere Verluste, kleinerer Leistungsfaktor, grösserer Materialaufwand, höhere Kosten, Energieverschwendung.
- Eine optimale Auslegung kann nur durch die gesamtheitliche Betrachtung erreicht werden, welche aus einem systematischen Ablauf besteht:
1) Analyse des Arbeitsprozesses, 2) Spezifikation, 3) Strukturierung des el. Antriebs, 4) Auslegung, 5) Simulation, Optimierung.
- Bei der Auslegung sollte die Möglichkeit einer kurzfristigen, thermischen Überlastung besser genutzt werden.
- Für die Auslegung von Normmotor- und umrichter gespeisten Antrieben ist benutzerorientierte Software verfügbar.

In **Tabelle 4.1** sind die Belastungsverhältnisse von Norm-Asynchronmaschinen im Bereich bis 100 kW in verschiedenen Einsatzgebieten der Industrie in der ehemaligen DDR dargestellt. Die Maschinen sind, wie man sieht, i.a. nicht 100 %-ig ausgenutzt.

Einsatzgebiete: $\leq 100 \text{ kW}$	P/P_N	T_B
Lufttechnische Anlagen	0.70	0.12
Pumpen, Verdichter	0.63	0.52
Landmaschinen	0.69	0.25
Werkzeugmaschinen	0.20	0.45

Tabelle 4.1: Belastungsgrad P/P_N (mittl. Leistung/Nennleistung) und jährliche Auslastung T_B (Betriebszeit/Jahr) von Norm-Asynchronmotoren

Auch das RAVEL-Untersuchungsprojekt "Gesamtwirkungsgrad von Prozessen (Elektrizität) am Beispiel Textildruckmaschinen" zeigt diese Tendenz:

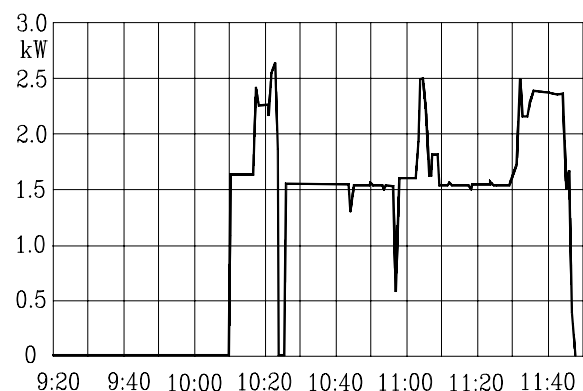


Bild 4.1: Zeitliche Abhängigkeit der Wirkleistung der Einzelantriebe F130, Bandantrieb und M500, Umluftventilator der Tabelle 4.2

Während des kontinuierlichen Druckvorganges sind die Antriebsmotoren von Textildruckmaschinen im Mittel wenig ausgelastet, vgl. **Tabelle 4.2** und **Bild 4.1**.

Aber auch die eigentlichen Produktionszeiten mit kontinuierlichem Druckvorgang sind relativ kurz im Vergleich zu den Umrüstzeiten. Die Gesamtleistungsaufnahme der Druckmaschine schwankt insgesamt sehr stark gemäss **Bild 4.2**.

4.1 Einführung

Ausgangszustand

Ein optimal ausgelegter und betriebener elektrischer Antrieb ist dadurch gekennzeichnet, dass:

- der Motor im Durchschnitt mit seiner Nennleistung belastet und im Punkt des grössten Wirkungsgrades betrieben wird,
- die Leerlauf- und die Stillstandsverluste möglichst klein gehalten werden,
- die Übertragungsverluste im Umrichter und im Getriebe möglichst klein sind und der Wirkungsgrad der Arbeitsmaschine möglichst gross ist.

Die Analyse verschiedener Antriebssysteme zeigt jedoch, dass die Realität wesentlich von dieser Idealvorstellung abweicht.

Elektrische Verbraucher	Schema-Nr.	Nenn-Leistung laut Typenschild [kW]	Leistung gemessen [kW]	$\cos \varphi$
Druckmaschine:				
Band	F130	31.00	3.47	0.18
Heizstäbe	K180	3.10		
Farbpumpe (Wasser)	F190-13	0.55	0.15	0.21
Farbpumpe	F190-14	0.55	0.33	0.67
Bürste	M200	1.50	0.53	0.50
Bürste	M202	1.50	0.48	0.47
Schablonen	M210	0.75	0.37	0.42
Breithalter	Q220	2.20	1.45	0.55
Trockner:				
Umluftventilator 1: Stufe 1	M500	8.00	4.64	0.61
Umluftventilator 1: Stufe 2	M500	25.00	15.20	0.69
Umluftventilator 2: Stufe 1	M510	8.00		
Umluftventilator 2: Stufe 2	M510	25.00	14.90	0.68
Abluftventilator	M560	5.20	2.42	0.78
Trocknerband	M600	2.80		
Abzug Trockner	M610	1.80	0.88	0.50

Tabelle 4.2: Elektrische Auslastung von Antriebsmotoren einer Rundfilmdruckmaschine während des kontinuierlichen Druckvorganges

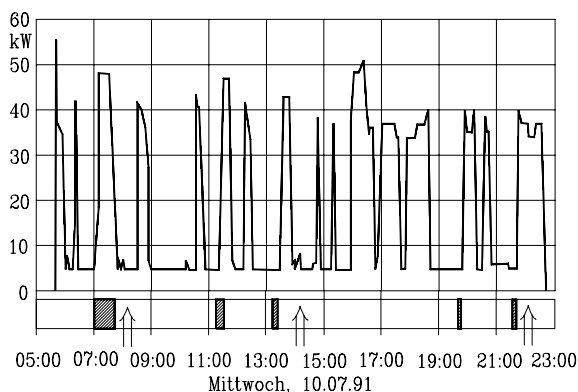


Bild 4.2: Gesamtverbrauch (Wirkleistung) einer Rundfilmdruckmaschine
 ■ Produktionszeiten
 ↑ Auftragswechsel

Die zeitliche Abhängigkeit der Belastung der einzelnen Antriebe ist sehr unterschiedlich und nicht in die bekannten Betriebsarten einzuordnen, wie die Messungen, vgl. **Bild 4.1**, zeigen.

Ein hohes Energiesparpotential stellen auch die Heizungsumwälzpumpen in der Schweiz dar, wie im RAVEL-Umsetzungsprojekt "Umwälzpumpen - Auslegung und Betriebsoptimierung" begründet wurde [8]. Umwälzpumpen in der Haustechnik

verbrauchen rund 3.5 % des Gesamtelektrizitätsverbrauches der Schweiz. Davon können aufgrund der Analyse und der Möglichkeiten zur Verbesserung der Dimensionierung und des Betriebes der Anlagen 40 % eingespart werden. Das Einsparpotential liegt sowohl in der Anpassung der Pumpenleistung an den Bedarf, z. B. durch Drehzahlsteuerung, als auch in einer Verminderung der Überdimensionierung der Antriebe, als Folge des ungenau definierten Heizungsprozesses.

Die Arbeit von Werkzeugmaschinen ist dadurch gekennzeichnet, dass der eigentliche Arbeitsvorgang für die Bearbeitung des Werkstückes nur 5 % bzw. 15 % des gesamten Zeitaufwandes in Anspruch nimmt, je nachdem ob man diesen Anteil auf das Werkstück oder die Werkzeugmaschine bezieht. So wird z.B. für das Drehen heute ein spezifischer Energieaufwand von 630 kJ/kg veranschlagt, obwohl der eigentliche Zerspanungsvorgang nur 52.5 kJ/kg benötigt.

In erster Linie spielen somit Steuerungstechniken für die Minimierung der Nebenarbeiten eine grosse Rolle. Daneben ist natürlich auch immer die Notwendigkeit der sachgemässen Auswahl des Motors

zu beachten, da das zeitlich abhängige Belastungsregime des Motors von der Normalbelastung stark abweicht.

Folgerungen für die Verbesserung der Methodik der Antriebsauslegung

Die Ursachen der Überdimensionierung von Antrieben lassen sich im Falle des Entwurfs von Neuanlagen durch eine verbesserte Projektierung bekämpfen. Dazu bedarf es einerseits einer guten Berechenbarkeit des Antriebes, d.h. eines ausreichend genauen mathematischen Modells der Arbeitsmaschine als Basis für den Entwurf der Gesamtanlage (vgl. **Kapitel 5**) und andererseits eine damit ermittelbare, möglichst genauen Leistungsvorgabe für den Antrieb. Entscheidend ist dabei nicht nur der Wirkungsgrad des Antriebes für sich, sondern der Gesamtwirkungsgrad der Anlage und des auf das Produkt bezogenen Energieaufwandes.

Die Projektierungsmethode für die Anlage muss sich dabei grundsätzlich von der Gepflogenheit unterscheiden, die Leistungsforderung an die Anlage nach einer Toleranzkette auf die untergeordneten

Komponenten zu untersetzen ("Dimensionierung durch Sicherheitszuschläge").

Im **Bild 4.3** wurde zunächst der übliche Weg gezeigt: Für den geforderten Förderstrom wird jeweils der nächstgrössere Typ aus einer Leistungsreihe von Pumpen gewählt. Der Pumpenhersteller wiederum sucht einen Motor aus, dessen Typenleistung auf jeden Fall gleich oder grösser als die Pumpenleistung ist. Und schliesslich wird zum Motor der Frequenzumrichter mit einer ausreichenden Typenleistung ausgewählt. Dieses Auswahlverfahren ist durch den **Weg a** ("Dimensionierung durch Sicherheitszuschläge") im **Bild 4.3** gekennzeichnet.

Hat man aber bei der Projektierung ständig alle Komponenten im Blick, so kann möglicherweise eine Überdimensionierung (**Weg b**) vermieden werden, da der Motor ja nur der Förderleistung anzupassen ist.

Natürlich ist diese Argumentation auf eine komplexe Projektierung nicht ohne weiteres anwendbar und zu vereinfacht. Insbesondere die Möglichkeit einer partiellen Überlastbarkeit der Komponenten

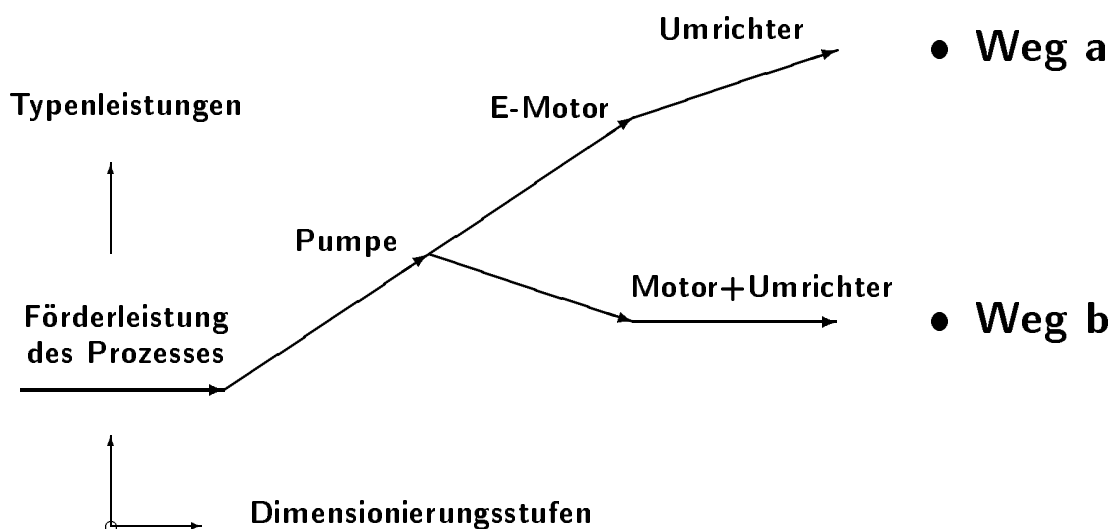


Bild 4.3: Dimensionierung von Komponenten der Arbeitsmaschinen:

- Weg a: Weitergabe der Leistungsforderungen von Komponente zu Komponente (= Überdimensionierung)
- Weg b: komplexe Projektierung, unter ständiger Beachtung der vom Prozess geforderten minimalen Leistung

in den unterschiedlichen Ebenen der Anlagenhierarchie, welche nicht so einfach zu übersehen ist, verstärkt den Trend zur Überdimensionierung.

Die Leistungsvorgaben, bzw. die Identifikation der Parameter und die Modellbildung für die Anlage oder Arbeitsmaschine selbst, stellt ebenfalls ein Problem dar. Einmal besitzt der spätere Anlagenbetreiber keine ausreichenden quantifizierbaren Erfahrungen, andererseits unterliegen Forderungen auch noch unvorhergesehenen Einflüssen, z.B. der Alterung, anderen Veränderungen und auch noch äusseren Bedingungen.

Der Erfahrungssammlung kommt daher eine grosse Bedeutung zu. Das heisst, es muss eine Messtechnik zur Übernahme dieser quantifizierbaren Erfahrungen auf allen Ebenen der Anlage zur Verfügung stehen und genutzt werden.

Zusammenfassung

Zusammenfassend muss daher leider festgestellt werden - und diese Aussage wird auch durch die Ergebnisse weiterer RAVEL-Untersuchungsprojekte noch bestätigt werden -, dass die Mehrheit der elektrischen Antriebe keineswegs energieoptimal ausgelegt oder betrieben wird, d.h. unterbelastet, bzw. überdimensioniert ist.

Die bisherige, immer noch weitverbreitete Praxis der Projektierung, welche darin besteht:

- Die Bemessung der Komponenten nach statischen Gesichtspunkten unter einer einseitigen Berücksichtigung der Toleranzen und der Höchstlasten vorzunehmen,
- die betrieblichen Belastungen und Lastspiele nur beschränkt zu berücksichtigen,
- die Möglichkeiten der Anpassung an die Lastverhältnisse nur beschränkt auszunützen,
- Arbeitsmaschine und Antrieb getrennt zu projektieren und zu optimieren,

muss durch eine gesamtheitliche, systemtechnische Auslegungsmethode ersetzt werden.

Es ist allerdings nicht einfach, die gesamtheitliche Betrachtungsweise und die Verwendung systemtechnischer Methoden in die Praxis einzuführen, da sie wesentlich höhere Anforderungen an die Pro-

jektierenden und Anwender stellen. Das Antriebssystem muss strukturiert, analysiert und optimiert werden. Ausgehend von einer genauen Definition der Aufgabenstellung, einer detaillierten Prozessanalyse, kann der Antrieb im einzelnen spezifiziert und ausgelegt werden, wobei auch schon die Prozessanalyse Hinweise auf die Energiesparmöglichkeit geben kann.

4.2 Systemtechnisches Vorgehen bei der Auslegung elektrischer Antriebe

A: Einführung

Den grundsätzlichen Aufbau eines Antriebssystems zeigt das **Bild 4.4**. Ein elektrischer Antrieb besteht aus:

- Der **Antriebsmaschine**, welche die mechanische Arbeit des Antriebs in einem Prozess verrichtet bzw. umsetzt, z.B. in Bewegung, Materialtransport, Materialverformung usw., jedoch zuletzt immer in Wärme,
- dem **Motor**, welcher elektrische Energie in mechanische Arbeit umwandelt und umgekehrt,
- der **mechanischen Übertragung** zwischen dem Motor und der Arbeitsmaschine, zur Anpassung des Motors an die Arbeitsmaschine, welche im einfachsten Fall aus einer mechanischen Verbindung (Kupplung), in vielen Fällen aus einem Getriebe zur Anpassung der Drehzahlen und Drehmomente des Motors an die Erfordernisse der Arbeitsmaschine besteht,
- dem **Stell- und Steuerglied** zwischen dem Motor und dem elektrischen Netz, welches im einfachsten Fall aus einem Schalter zum Ein- und Ausschalten des Motors, oder aus einer Vorrichtung zum Anlassen des Motors, oder aus einem Umrichter zur Erzeugung der variablen Frequenz oder Spannung des Motors besteht,
- der **Schutz-, Steuerungs-, Regelungs- und Führungstechnik**, welche abhängig von der Komplexität des Antriebs mehr oder weniger stark ausgebildet ist, jedoch mindestens einen Motorschutz und eine einfache Steuerung enthalten sollte.

Bezüglich der Komplexität der Aufgabenstellung unterscheidet man **ungesteuerte, gesteuerte**,

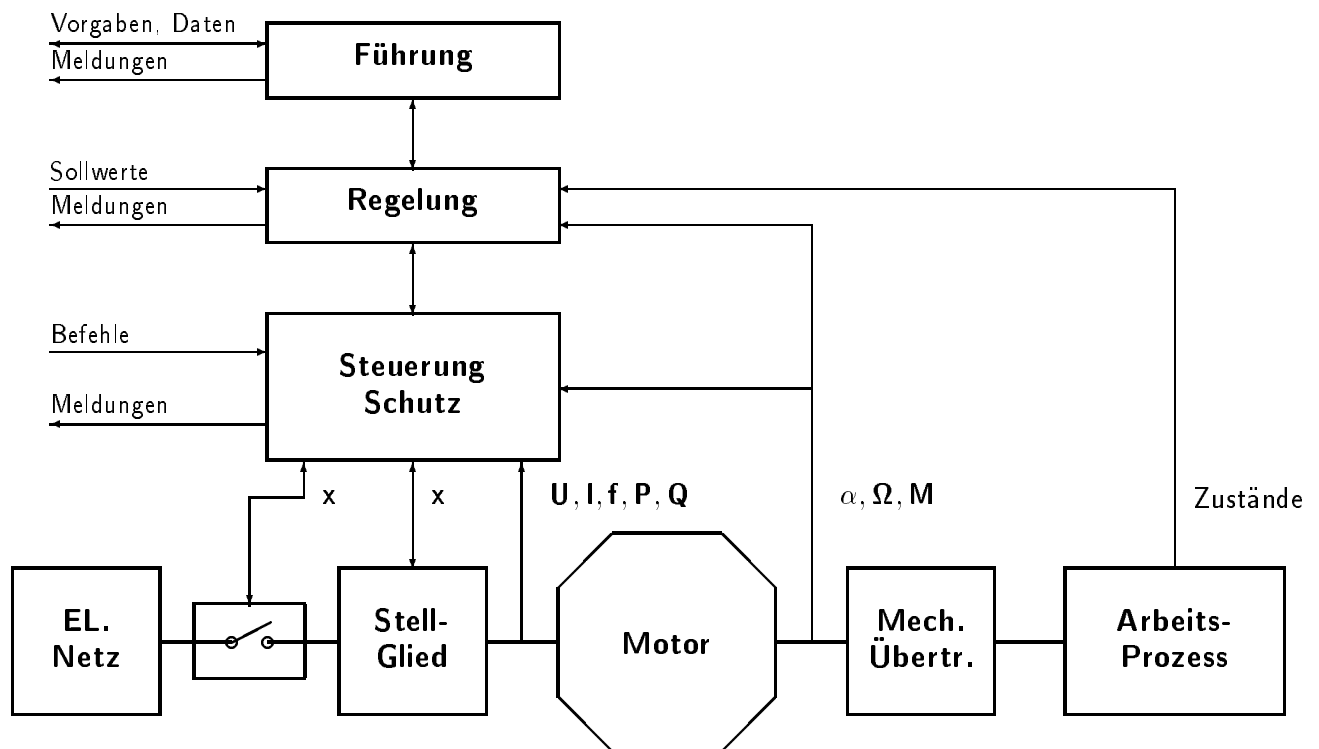


Bild 4.4: Struktur elektrischer Antriebssysteme

geregelte oder rechnergeführte Antriebe, wobei die gesteuerten, geregelten und die rechnergeführten Antriebe gegenüber den ungesteuerten Antrieben zusätzliche Anforderungen an die Steuerung-, Regelungs- und Schutzfunktionen und an die Sensorik zur Erfassung des Zustandes des Antriebes stellen.

Die **Aufgabenstellung der Antriebsauslegung** setzt sich zusammen aus den folgenden Schritten:

- Eine geeignete, kosten- und energieoptimale Struktur des Antriebes, d.h. die Speisung, die Motorart, die mechanische Übertragung sowie die Schutz-, Steuer- und Regeltechnik sind auszuwählen und festzulegen,
- die Parameter der Komponenten des Antriebes - im wesentlichen die Nenn- oder Bemessungsdaten des Stellgliedes -, des Motors und der mechanischen Übertragung, sind den Anforderungen anzupassen, bzw. festzulegen,
- die Funktionsfähigkeit und Optimalität (Energieverbrauch, Regelfähigkeit....) ist zu überprüfen und gegebenenfalls durch Veränderung der Parameter einzustellen.

Dabei erfolgt die Anpassung der Parameter i.A. in zwei Schritten:

a) Zunächst muss ein Antrieb die an ihn gestellten Grundanforderungen erfüllen:

- Anlauf in einer vorgegebenen Zeit,
- Bereitstellung des benötigten Drehmoments bei vorgegebenen Drehzahlen,
- hinreichende Steuer- und Regelbarkeit,
- Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Überlastfähigkeit.

b) Darüberhinaus ist durch eine Feinanpassung und auch durch eine geeignete Struktur und Betriebsführung die Erfüllung übergeordneter Anforderungen sicherzustellen, wie z.B.:

- die Einhaltung der Genauigkeit der Betriebsgrößen,
- das Erreichen eines minimalen Energieverbrauchs,
- das Arbeiten mit maximalem Wirkungsgrad,
- die optimale Ausnutzung,
- die Koordination mit anderen Antrieben.

Die in dieser allgemeinen Form festgelegte Aufgabenstellung kann nur dann befriedigend gelöst werden, wenn der Prozess hinreichend genau bekannt ist. Damit muss auch die Prozessanalyse an den Anfang einer systematischen Antriebsauslegung gestellt werden.

Der **Auslegungsprozess** (vgl. Bild 4.5) besteht damit aus den folgenden Schritten:

- **Prozessanalyse und Festlegung der Anforderungen an den Antrieb**
- **Strukturierung des Antriebes**
- **Anpassung der Parameter des Antriebes**
- **Auslegung der Betriebsmittel**
- **Analyse des Betriebsverhaltens**
- **Korrektur der Auslegung, falls erforderlich**

Im folgenden werden diese Schritte in den einzelnen Abschnitten behandelt.

B: Prozessanalyse und Festlegung der Anforderungen

Die Prozessanalyse soll die Anforderungen, welche an den Antrieb zu stellen sind, liefern d.h.:

- Antriebs- bzw. Lastmoment $M_W(n, t)$ im gesamten Betriebsbereich.
- Nennmoment und Nenndrehzahl, Trägheitsmoment, Stellbereich.
- Umgebungssituation: Temperatur, Klima, Aufstellungshöhe, Störgrößen...
- Genauigkeitsanforderungen, Grenzwerte...

Die Prozessanalyse sollte aber darüber hinaus auch energetische Schwachstellen und Probleme der Arbeitsmaschine erkennen und offenlegen.

Bei der Analyse des Arbeitsprozesses muss unterschieden werden zwischen

- Antrieben mit zeitlich konstanten Lastverhältnissen, d.h. mit Dauerbetriebsverhältnissen, wobei die Betriebsdauer wesentlich grösser als die thermische Zeitkonstante ist, die Lastverhältnisse über einen längeren Zeitraum, z.B. über einen Tag hinweg, jedoch variabel sein können.
- Antrieben mit instationären Lastverhältnissen und dynamischen Belastungen, häufigen Be-

schleunigungen, Bremsen und Drehrichtungswechsel usw..

Bei konstanter Last ist das Widerstandsdrehmoment M_W der Arbeitsmaschine, seine Abhängigkeit von der Drehzahl n , ausgehend vom Stillstand, wegen des Anlaufs über den Nennbetrieb bis zur Überlastgrenze bestimmend für die Auslegung, bzw. die Grösse des Elektromotors.

Typische Abhängigkeiten für das Widerstandsmoment M_w von der Drehzahl n sind:

Arbeiten gegen die Schwerkraft	: $M_W = konst.$
Arbeiten mit Reibung	: $M_W \sim n$
Materialtransport, Ventilation	: $M_W \sim n^2$

Nur beim Arbeiten gegen die Schwerkraft kann das Widerstandsmoment mit Hilfe der Beziehung "Drehmoment = Kraft (Gewicht) x Hebelarm" genau ermittelt werden. Bei den komplexeren Prozessen der Materialumformung oder des Materialtransportes muss man auf Erfahrungswerte oder auf Messungen zurückgreifen. Dabei sollte mit möglichst grosser Sorgfalt vorgegangen werden, um Fehlauslegungen, insbesondere Überdimensionierungen, zu vermeiden (vgl. Kapitel 5).

Im instationären, dynamischen Betrieb wirkt die Differenz zwischen dem Motormoment M und dem Widerstandsmoment M_W beschleunigend oder bremsend auf die rotierenden Massen des Motors, der mechanischen Übertragung und der Arbeitsmaschine.

Für diesen Vorgang gilt das Beschleunigungsgesetz:

$$2\pi J \frac{dn}{dt} = M - M_W$$

J ist das Trägheitsmoment aller rotierenden Massen und n die Drehzahl.

Geht man von einem vorgegebenen Bewegungsablauf aus, welcher z.B. bei einem Aufzug durch ein Weg-Zeit-Diagramm und durch Grenzwerte für die Beschleunigung a und den sogenannten Ruck $r = da/dt$ (Änderung der Beschleunigung a mit der Zeit t) gegeben ist, so ergibt das Beschleunigungsgesetz bei gegebenem Widerstandsmoment M_W und Trägheitsmoment J das für die Realisierung des Bewegungsvorganges erforderliche Motormoment M .

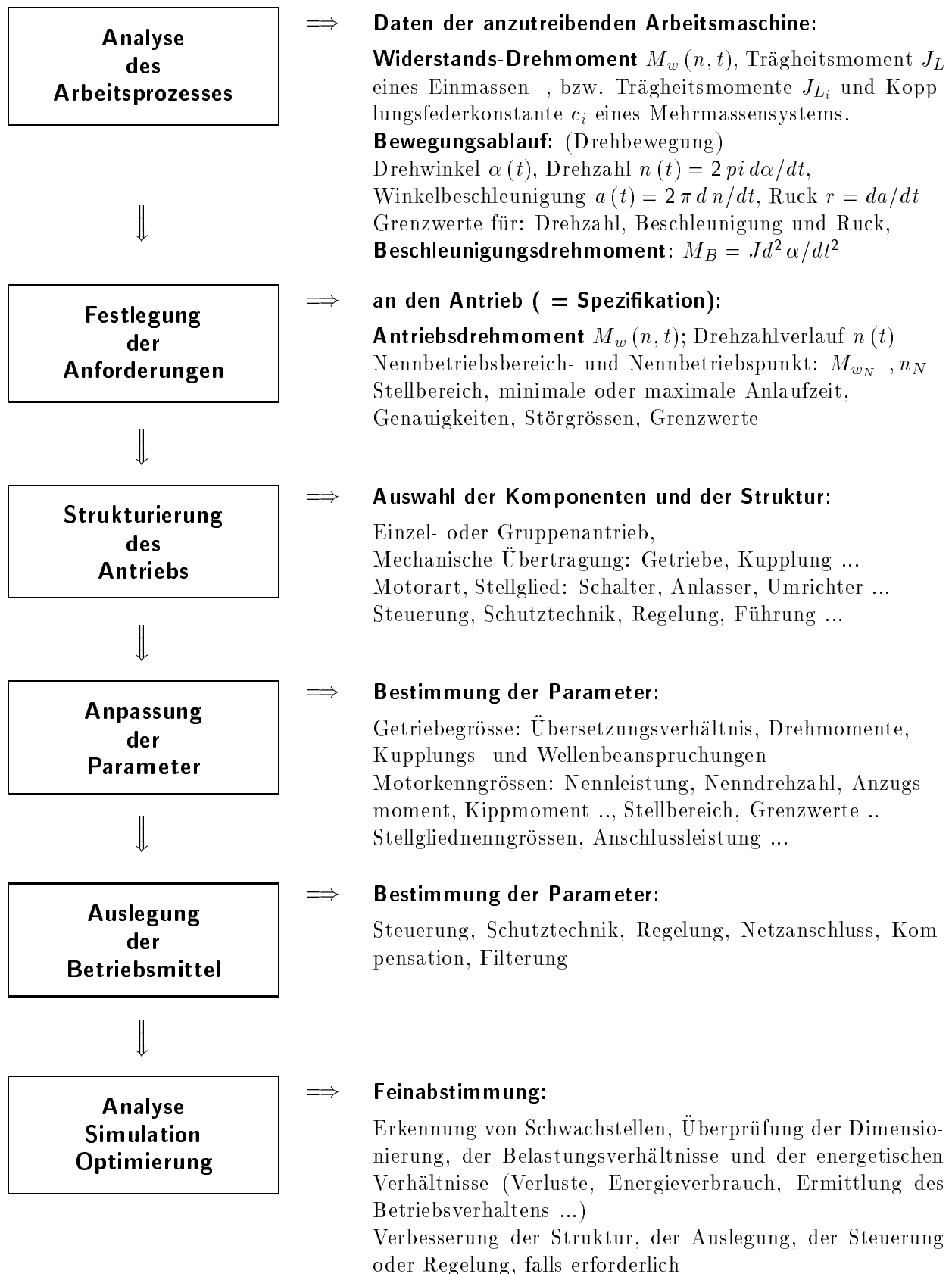


Bild 4.5: Auslegungsprozess bei der Antriebsauslegung

Umgekehrt kann das Beschleunigungsgesetz auch dazu verwendet werden, um bei vorgegebenem Motormoment M , Widerstandsmoment M_W und Trägheitsmoment J den zeitlichen Ablauf der Beschleunigung a , der Drehzahl n usw. zu ermitteln.

Vom energetischen Standpunkt her gesehen, ist die in den rotierenden oder bewegten Massen, mit dem Trägheitsmoment J , bei der Drehzahl n , gespeicherte Energie:

$$A = \frac{1}{2} \pi n^2 J$$

von grosser Bedeutung. Für eine Beschleunigung auf die Drehzahl n ist vom Antrieb und damit auch vom elektrischen Netz mindestens die Energie A/η aufzubringen, wobei η der elektrische Wirkungsgrad des Motors, der Speisung und des Getriebes ist. Beim Abbremsen kann nur die Energie $A\eta$ zurückgeliefert werden, wenn der Antrieb generatorisch arbeiten kann. Die Verlustenergie A_V beträgt daher mindestens:

$$A_V = A(1/\eta - \eta)$$

d.h. bei einem Wirkungsgrad $\eta = 0.8$ werden 45 % der Energie A beim Beschleunigen und Bremsen im Antrieb in Verlustwärme umgesetzt.

Abhängig von der Betriebsweise, der Speisung und der Art des Elektromotors können weitere Verluste auftreten, welche dann die Energiebilanz zusätzlich verschlechtern und für die Grösse des Motors bestimmend sein können.

Besonders ungünstig verhält sich in dieser Beziehung die Asynchronmaschine, wenn sie mit konstanter Speisefrequenz und Spannung, ohne Polumschaltung, während des Hochlaufs betrieben wird. Sie nimmt bei einem Beschleunigungsvorgang auf die Drehzahl n mindestens die doppelte Energie $2A$ auf. Die eine Hälfte A wird im Rotor der Asynchronmaschine in Wärme umgesetzt, während die andere Hälfte A in den drehenden Massen gespeichert wird. Zusätzlich dazu treten auch noch in der Statorwicklung beträchtliche Stromwärmeverluste auf, bedingt durch die grossen Ströme im Anlauf.

Diese Wärmeentwicklung innerhalb der Asynchronmaschine kann bestimmend für die Nennleistung des Antriebs sein, wenn das gesamte Trägheitsmoment J bzw. die Energie A einen kritischen Wert übersteigt.

Beispiel: Beschleunigungsantrieb mit Asynchronmotor

Für den Antrieb einer konstanten Last mit einem vernachlässigbarem Trägheitsmoment ($\ll 0,5 \text{ kg/ms}^2$) wird ein Asynchronmotor mit einer Nennleistung von 5,5 kW benötigt. Wird das Trägheitsmoment auf 2 kg/ms^2 erhöht, so ist ein Motor mit einer Nennleistung von 11 kW einzusetzen, wenn die zulässige Erwärmung der Statorwicklung nicht überschritten werden darf. Dieser Motor wird dann im Dauerbetrieb nur mit halber Leistung betrieben und hat dementsprechend einen schlechteren Wirkungsgrad.

C: Strukturierung des Antriebssystems

Aufgrund der Prozessbeschreibung und Spezifikation kann die Struktur des Antriebssystems festgelegt werden.

Es ist sinnvoll zu unterscheiden zwischen dem:

- gestellten (ungesteuerten / gesteuerten) Antrieb ohne Rückführung von Zustandsgrössen,
- geregelten Antrieb mit Rückführung der Zustandsgrössen,

wobei grundsätzlich zwischen dem ungesteuerten und dem gesteuerten Betrieb bezüglich der Motorkennlinien Drehmoment-Drehzahl: $M(n)$ und Motorstrom-Drehzahl: $I(n)$... kein Unterschied besteht.

Während beim **gestellten** Betrieb die Kennlinien $M(n)$ der verschiedenen elektrischen Maschinen deren inhärentes Verhalten wiedergeben und sich dementsprechend stark unterscheiden, werden beim geregelten Betrieb die Unterschiede ausgeglichen und das Drehmoment, bzw. der Motorstrom nur begrenzt, insbesondere im Nennbetriebsbereich. Unterschiede im Verhalten der einzelnen Maschinenarten sind erst im oberen Drehzahlbereich festzustellen, wenn Massnahmen zur Feldschwächung eingesetzt werden müssen (**Bilder 4.6 und 4.7**).

Im **gestellten Betrieb** ist der Betriebsbereich auf zwei Quadranten: Motor- und Generatorbetrieb, ohne Drehrichtungsumkehr, jeweils in einem beschränkten Drehzahlbereich um den Leerlauf- oder Synchronpunkt beschränkt, wenn keine besonde-

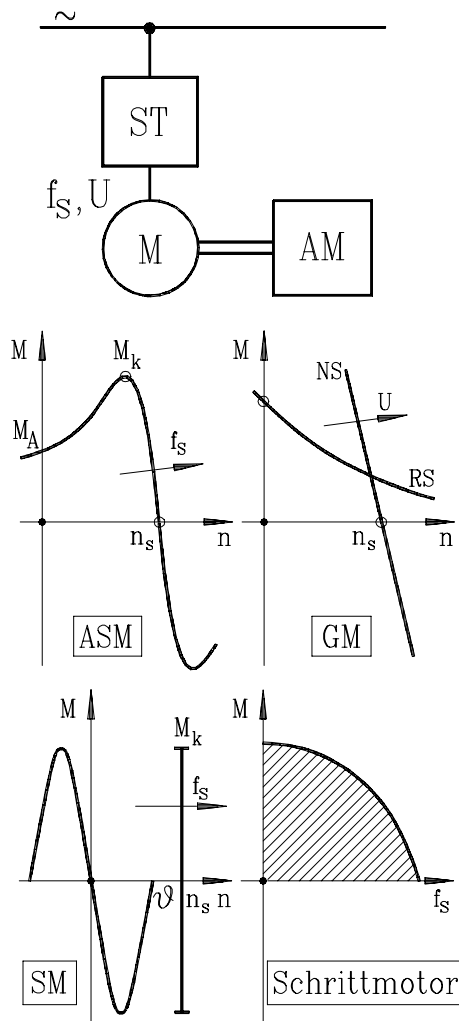


Bild 4.6: Motorkennlinien im gestellten Betrieb

ren Massnahmen ergriffen werden. Ein Vierquadrantenbetrieb erfordert mindestens ein Umschalten der Wicklungen oder der Speisespannung und eine Stellbarkeit der Frequenz und/oder der Spannung.

Im **gestellten Betrieb** ist die Leerlaufdrehzahl n_s

- bei den Drehfeldmaschinen gegeben durch die Frequenz f_s und durch die Polpaarzahl p :

$$n_s = f_s / p$$

- bei den Gleichstrommaschinen durch die Ankerspannung U_a und den magnetischen Fluss.

Das Anlauf- und das Kippmoment liegt bei den Drehfeldmaschinen in der Grössenordnung des 2,5-fachen Nennmomentes. Der Anlaufstrom ist das 5-8 -fache des Nennstromes.

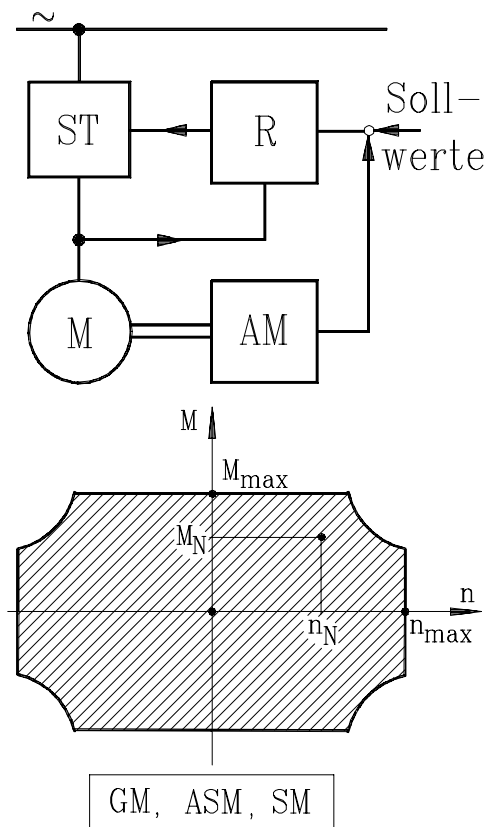


Bild 4.7: Motorkennlinien im geregelten Betrieb

Im **geregelten Betrieb** kann man unabhängig von der Art der elektrischen Maschine, aber abhängig von der Ausführung des Stellers (ST), bzw. der Leistungselektronik, einen Mehrquadrantenbetrieb im ganzen Drehzahlbereich realisieren, allerdings mit beträchtlichen zusätzlichen Kosten (siehe **Tabelle 4.3**).

Durch die Regelung und durch die Speisung können besonders verlustarme, dynamische Antriebssysteme erstellt werden, welche aufgrund des Frequenzbetriebes und der Möglichkeit der Netzurückspeisung z.B. in Lastenaufzügen zu bedeutenden Energieeinsparungen führen können.

Im **geregelten Betrieb** werden die Maximalwerte des Drehmomentes und des Stromes durch die Begrenzungen des Umrichters vorgegeben. Dadurch wird bei einem maximalen Drehmoment vom 2,5-fachen des Nennmomentes auch der Anlauf- und Betriebsstrom das 2,5-fache nicht überschreiten.

D: Auswahl der Antriebskomponenten

Die Auswahl des Motors, des Stellers und des Getriebes hängt ab von

- der Charakteristik der Arbeitsmaschine, gekennzeichnet durch die Lastkennlinie $M_W(n, t)$, den Nennbetriebspunkt: Nennmoment M_N , Nenn-drehzahl n_N , das totale Trägheitsmoment J , die Umgebungssituation usw.,

- den Betriebsverhältnissen der Arbeitsmaschine: Mehrquadrantenbetrieb, Bewegungsablauf, Stellbereich, Schalthäufigkeit usw,

- den Genauigkeitsanforderungen an den Betrieb.
- Die **Tabellen 4.3 und 4.4** geben Hinweise für die Motorauswahl und für das Verhalten der Motoren, vor allem bezüglich des Drehzahl-Drehmomentverhaltens.

Anforderungen	Motorart	Drehzahl- und Drehmomentverhalten	Betriebsverhalten	Kosten-Index	Einsatzgebiete
Keine Drehzahlstellung	Asynchron-M. Käfigläufer	geringer, linearer Abfall der Drehzahl	$M(n)$, $I(n)$ gegeben, natürlich	1	Einfache Antriebe: Lüfter Pumpen Krane Werkzeug-Maschinen
Grobstufige Drehzahlstellung	Polumschaltbarer Asynchron-M. Käfigläufer	geringer linearer Abfall der Drehzahl	$M(n)$, $I(n)$ natürlich abhängig von Polzahl	2	Aufzüge Gebläse Werkzeugmaschinen
Kleiner Drehzahl-Stellbereich, Schwer-/Sanft-Anlauf	Schleifringläufer-Asynchron-M. Drehstrom-Steller	Drehzahlabfall einstellbar	$M(n)$, $I(n)$ einstellbar	1.5 - 2	Aufzüge Krane Lüfter Zentrifugen
Einstellbare Drehzahl	Umrichter-gespeiste Asynchron-M. Synchron-M. U/f-Stellung	Drehzahlabfall einstellbar	$M(n)$, $I(n)$ einstellbar	≥ 2	Lüfter Gebläse Zentrifugen Textil-Maschinen Werkzeug-Maschinen
Grosser Drehzahlstellbereich Regelung: M , n	Umrichter-gespeister Gleichstrom-, Asynchron-M.	einstellbar	einstellbar regelbar	2 - 4	Werkzeug-Maschinen Förder-Maschinen Textil-Maschinen Druck-Maschinen
Beliebige Regelung: Lage Drehzahl Drehmoment Strom ...	Umrichter-gespeister Gleichstrom-, Asynchron-, Synchron-, Schrittmotor	einstellbar	einstellbar regelbar	2 - 4	Servuantriebe Werkzeug-Maschinen Druck-Maschinen

Tabelle 4.3: Motorauswahl

Motorarten:	Einsatzgebiete:	Anwendungsgrenzen und -probleme
Asynchron-Motor mit Käfigläufer	Einfache Antriebe, Stellgetriebe	Natürliches Verhalten: $I_A, M_A, \cos\phi, M_K$ direktes Einschalten
Asnchron-Motor mit Schleifringläufer	Einfache Antriebe, Schweranlauf, begrenzter Stellbereich	Schleifringe Verschleiss
Asynchron-Motor von Drehstromsteller gespeist	Einfache Antriebe Schweranlauf, regelbar	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	Regelbare 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 Leistungs-faktor	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, Feldschwächbereich

Tabelle 4.4: Einsatzgebiete, Anwendungsgrenzen und -probleme der Motoren

Es können jedoch an dieser Stelle noch keine Aussagen über die Wirkungsgrad- und Verlustverhältnisse gemacht werden. Dazu ist eine eingehendere Analyse erforderlich. Allgemein kann jedoch festgehalten werden, dass Synchronmaschinen kleinere Verluste aufweisen als Asynchronmaschinen und dass der Energieverbrauch eines Antriebssystems vor allem durch die Betriebsweise bestimmt wird.

Bei der Wahl des Getriebes ist folgendes zu berücksichtigen:

- Drehfeldmaschinen (Asynchron- und Synchronmaschinen) haben bei Direktspeisung mit der

Frequenz f_s ihren Nennbetriebsbereich in der Nähe der Synchrondrehzahl $n_s = f_s/p$, wobei die Polpaarzahl p die Werte 1, 2, 3 annehmen kann.

- Die Grösse einer elektrischen Maschine wird vom Drehmoment bestimmt, d.h. eine höhere Maschinendrehzahl ergibt bei gleicher Leistung eine kleinere Baugrösse.
- Im Getriebe treten Verluste auf, wie die **Tabelle 4.5** zeigt, ca. 1 – 2 % Verlust pro Stufe. Einstufige Getriebe erreichen Wirkungsgrade von 97 %, mehrstufige haben höhere Verluste. Bei den Schneckengetrieben sind die Verluste stark abhängig von der Übersetzung.

Davon ausgehend ist folgendes zu empfehlen:

- Direktantriebe sind im Drehzahlbereich 500 –

Art der Übersetzung	Wirkungsgrad
Direkte Kupplungen	$\geq 99 \%$
Getriebe:	
- Stirnradgetriebe:	$\geq 94 - 97 \%$
- Kegelradgetriebe:	$\geq 94 - 97 \%$
- Schneckengetriebe:	$\geq 30 - 90 \%$
Riemenantriebe:	
- Keilriemen:	$\geq 88 - 93 \%$
- Kunststoffbänder:	$\geq 81 - 85 \%$
- Gummibänder:	$\geq 81 - 85 \%$
- Flachriemen:	$\geq 97 - 99 \%$
- Zahnriemen:	$\geq 97 - 99 \%$
Ketten:	$\geq 90 - 96 \%$
Drahtseil:	$\geq 91 - 95 \%$

Tabelle 4.5: Getriebewirkungsgrade

3000 min^{-1} (bei 50 Hz) realisierbar mit Asynchronmaschinen, wenn mit festen Drehzahlen, in der Nähe der synchronen Drehzahlen $n_s = f_s/p$ gearbeitet werden kann.

- Bei Arbeitsdrehzahlen unterhalb 500 min^{-1} sind Getriebe zu verwenden.
- Bei Arbeitsdrehzahlen über 3000 min^{-1} ist Umrichterspeisung ($f > 50 \text{ Hz}$) sinnvoll.

E: Auslegung der Antriebskomponenten

Bei der Auslegung des Motors unterscheidet man

- die Anpassung der Kennlinie $M(n)$ des Motors an die Kennlinie $M_W(n)$ der Arbeitsmaschine,
- die Motorauslegung, d.h. die Bestimmung der Nenndaten.

Bei der Kennlinienanpassung geht man davon aus, dass die Lastkennlinie an der Motorwelle (Prozesskennlinie $M_W(n)$) der Getriebeübersetzung entsprechend modifiziert, gegeben ist.

Gesucht wird die Motorkennlinie $M(n)$, so dass: (vgl. Bild 4.8)

- das Anzugsmoment M_A im Stillstand grösser als das Lastmoment M_W ist,
- das Beschleunigungsmoment $M_B = M - M_W$ hinreichend gross ist, so dass die Anlaufzeit T_A (Zeit bis zum Erreichen der Nenndrehzahlen)

$$T_A = \frac{M - M_W}{2\pi n_N J}$$

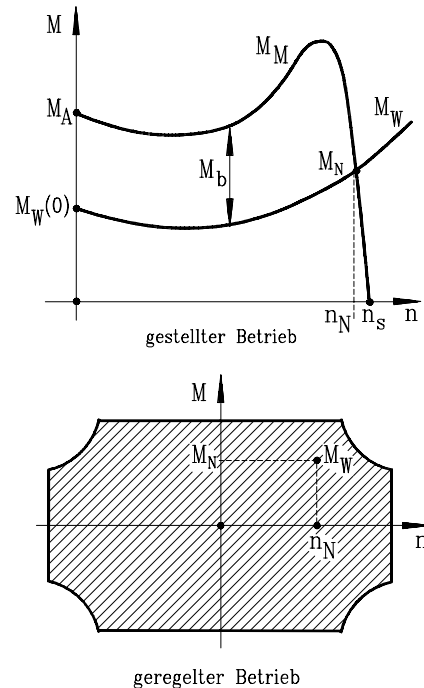


Bild 4.8: Kennlinienanpassung bei der Antriebsauslegung

vorgegebene Werte erreicht,

- der stationäre Arbeitspunkt im Nennbereich (M_N, n_N) liegt und stabil ist d.h. dass die Steigung der Motorkennlinie: dM/dn grösser als die Steigung der Lastkennlinie: dM_W/dn ist,
- das im ungünstigsten Fall auftretende Lastmoment M_W das Kippmoment M_K des Motors nicht übersteigt.

Bei der Motorauslegung ist die Typenleistung, bzw. Bemessungsleistung P_N

$$P_N = 2\pi n_N M_N$$

so zu bestimmen, dass

- die Nennbetriebsbedingungen, die Anlauf- und die Überlastfähigkeit, eingehalten werden,
- die Erwärmung des Motors, vor allem der Wicklung, im Anlauf (insbesondere bei Arbeitsmaschinen mit grossen Trägheitsmomenten J) und im Dauerbetrieb im zulässigen Bereich liegt, welcher durch die Isolierklasse der Motorwicklung gegeben ist,
- das Energie- und Wärmespeichervermögen des Motors ausgenutzt wird, namentlich dann, wenn die Betriebsdauer t_B wesentlich kleiner als die

Erwärmungszeitkonstante des Motors ist, welche bei Normmotoren in der Grössenordnung von 15 – 25 Minuten liegt.

Die Erwärmung der Wicklung hängt ab von:

- der Kühlungsart, der Drehzahl des Kühlgebläses und von der Umgebungstemperatur,
- der Höhe der Verluste, welche wiederum durch die Betriebsart, aber auch durch die Speisung (Umrichter) bestimmt werden (vgl. **Bild 4.10**).

In der VDE-Richtlinie 0530 werden acht Nennbetriebsarten nach **Bild 4.10** festgelegt, welche den in der Praxis am häufigsten auftretenden Belastungsfällen entsprechen.

Der Elektromaschinenbau fertigt Motoren für diese Nennbetriebsarten an, und zwar vorzugsweise für die Betriebsarten *S1* und *S3* mit den normierten Einschalt Dauern gemäss **Tabelle 4.6**.

Die Einflüsse der Betriebsart und der Speisung werden bei der Bestimmung der Typenleistung P_N aufgrund der tatsächlichen Leistung P der Arbeitsmaschine durch einen Leistungssteigerungsfaktor K berücksichtigt. Abhängig von der Betriebsart und der Speisung ergeben sich die folgenden Werte für den Leistungssteigerungsfaktor $K = P/P_N$:

- **Dauerbetrieb S1** : $K = 1$
- **Kurzzeitbetrieb S2** :
 $K = 1.1$ $K = 1.2$ $K = 1.4$
 $t_b = 60[\text{min}]$ $t_b = 30[\text{min}]$ $t_b = 10[\text{min}]$
- **Aussetzbetrieb S3**:
 $K = 1.10$ $K = 1.15$
 $ED = 60\%$ $ED = 40\%$
- **Umrichterspeisung**: $K = 0.85 - 0.95$

Für Motoren im Schaltbetrieb *S4* – *S8* sind die Anzahl der Schaltungen pro Stunde sowie der Trägheitsfaktor FI zu berücksichtigen. Diese Einflüsse sind komplex und grössenabhängig. Es ist daher nicht ohne weiteres möglich, dafür einen Faktor K anzugeben. Dieser muss im Einzelfall ermittelt werden, wofür heute Computerprogramme zur Verfügung stehen (siehe **Kap. 4.3**).

Die derzeit übliche Projektierungsmethode geht davon aus, dass die Wicklungstemperatur einen maximalen Wert entsprechend der Isolierstoffklasse nicht überschreitet. Damit erreicht die Wicklung

eine Lebensdauer, welche in der Grössenordnung von 100'000 Stunden bei Dauerbetrieb liegt. Dieser Wert und diese Beanspruchung entspricht jedoch nicht den Verhältnissen der Wirklichkeit. Ein Antrieb wird nur im Ausnahmefall dauernd mit seiner Höchstlast belastet. Die Lebenszeit eines Antriebssystems ist heute wesentlich kleiner als 100'000 Stunden, da es schon vorher veraltet oder durch ein neues System ersetzt worden ist.

In letzter Zeit wurde daher die thermische Überlastung der Motorwicklung in die Betriebsarten-Ordnung aufgenommen, weil nur eine zeitweise Überlastung (bei Einschränkung der Wicklungs-Lebensdauer) gegen die im Mittel bei allen Antrieben zu verzeichnenden Unterlast bzw. Überdimensionierung wirken kann. Die neue Betriebsart *S10* ermöglicht die Definition einer Überlast, wie ein Ausschnitt aus der betreffenden IEC-Empfehlung in **Bild 4.9** zeigt.

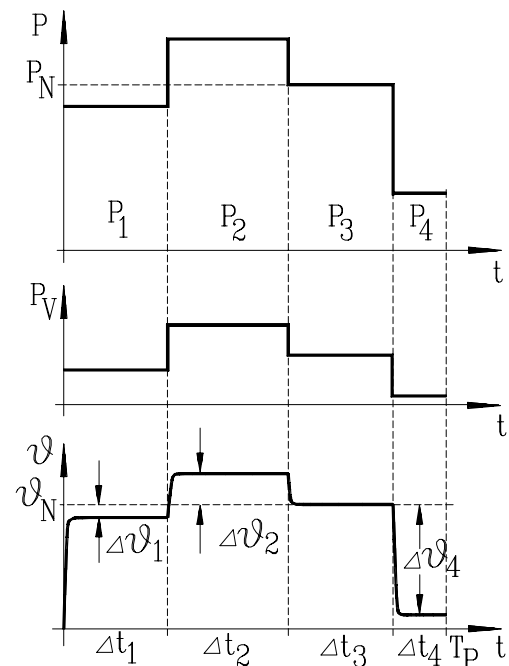


Bild 4.9: Zur Definition der thermischen Überlast gemäss *S10*, mit:

P	=	Last
P_N	=	Nennlast
T_p	=	Zeit für einen Lastzyklus
$\Delta\vartheta$	=	Temperaturerhöhung
ΔT_n	=	Zeit für einen Lastintervall
P_V	=	Verluste
ϑ	=	Temperatur

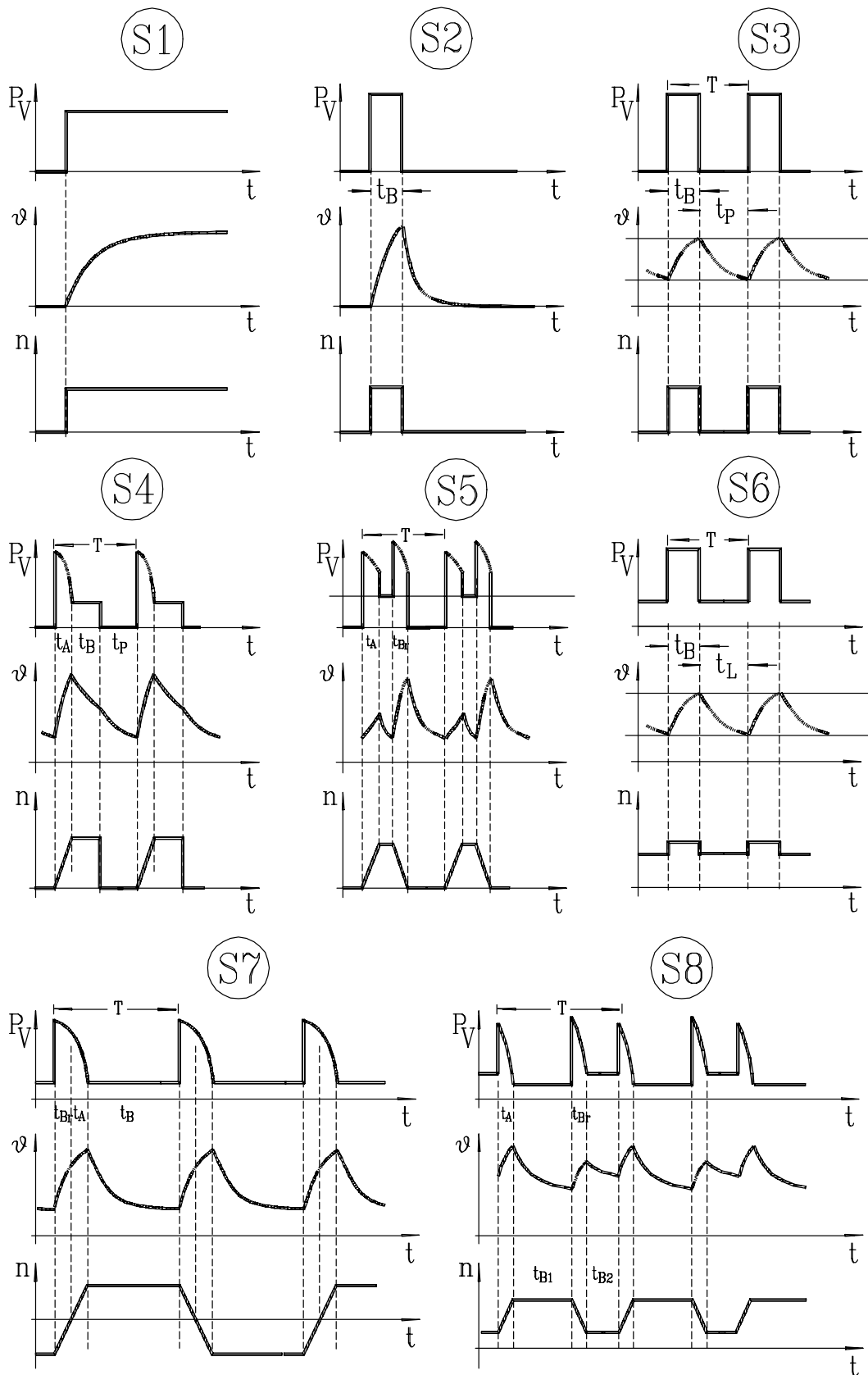


Bild 4.10: Nennbetriebsarten von Antrieben

Angabe	Bezeichnung	Vorzugswert	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Betriebszeit	t_B	0.5; 1; 3; 5; 10; 30; 60; 90 min dauernd (dd)	dd		X					
Spieldauer t_{sp}	10 min			X			X			
Schaltungen je Stunde		60; 90; 120; 240; 600 c/h				X	X		X	X
Relative Einschalt- dauer	ED_N	15; 25; 40; 60 %			X	X	X	X		X
Trägheits- faktor	FI	1.2; 1.6; 2; 2.5; 4				X	X		X	X

Tabelle 4.6: Kennzeichnung der Nennbetriebsarten. Dabei bedeuten:

- ED die relative Einschaltdauer, das Verhältnis: Betriebsdauer t_B zu Spieldauer T
- FI der Trägheitsfaktor, das Verhältnis: Gesamt- zu Motorträgheitsmoment.
- t_B Betriebsdauer

Diese Möglichkeit der thermischen Überlastung der Wicklung muss in Zukunft besser genutzt werden, um eine bessere Auslastung der Antriebe und damit auch des Materials und der Energie zu erreichen. Die der Projektierung bisher zugrundeliegende Maximaltemperatur der Wicklung wird dann durch die Vorgabe der Wicklungslebensdauer abgelöst. So wie auch bei anderen Antriebselementen, z. B. bei Getrieben, die gewünschte Lebensdauer die Basis für die Wahl der Typengrösse des Getriebes ist.

4.3 Software zur Auslegung und Simulation von Antrieben

A: Zielsetzung und Aufgabenstellung

Software zur Auswahl, Auslegung und Simulation von Antrieben wird entwickelt und eingesetzt, um

- die Komponenten eines Antriebssystems auf der Grundlage der jeweiligen Belastungssituation auswählen zu können,
- das Ergebnis der Projektierung nach verschiedenen Gesichtspunkten bewerten zu können,
- den Dialog zwischen dem Antriebstechniker und dem Verfahrenstechniker über die Erarbeitung

des "Anforderungsprofils" für den Antrieb rational zu unterstützen,

- die Projektierungsqualität von Anlagen zu verbessern,
- die Konsequenzen aus der zeitweiligen thermischen Überlastung des Antriebes abschätzen zu können,
- neue Projektierungsverfahren, wie die lebensdauerorientierte Projektierung anzuwenden.

Die Anwendung dieser Projektierungshilfsmittel ist eine entscheidende Voraussetzung für den optimalen Einsatz der Mittel, für die Entwicklung energiesparender, optimal ausgelasteter Antriebssysteme.

Nicht optimal ausgenutzte Antriebe bedeuten:

- Schlechte energetische Bedingungen beim Betrieb, kleiner Wirkungsgrad, kleiner Leistungsfaktor, unnötig grosse Verluste,
- Grosser Materialaufwand und damit indirekt Energieverschwendung.

Die Aufgaben der Software zur Auswahl, Auslegung und Simulation von Antrieben lassen sich folgendermassen unterteilen:

- Auswahl der Komponenten der Antriebe (Motoren, Getriebe, Umrichter ...) aufgrund von Kenngrössen, wie z.B. Nennwerte, Wirkungsgrade, Leistungsfaktor ... aus einer Datenbank.
- Auslegung der Komponenten eines Antriebssystems aufgrund des Anforderungsprofils und Ermittlung der für die Beurteilung der Auslegung wesentlichen Parameter: Beanspruchung, Ausnutzung, Verluste, sowie Wirkungsgrad, Wicklungstemperatur und Lebensdauer.

- Simulation des Antriebssystems zur Ermittlung des :
 1. Mechanischen Verhaltens: Bewegungsablauf, Kräfte, Drehmomente, Leistungen, Beanspruchungen, Schwingungen, Eigenfrequenzen ..
 2. Elektrischen Verhaltens im Betrieb und bei Störungen: Ströme, Spannungen, Verluste, Drehmomente, Drehzahlen ...
 3. Thermischen Verhaltens der Komponenten: Temperaturen, Wärmeflüsse, Kühlmittelströmungen, Isolationsbeanspruchungen, Lebensdauererwartungen.
- Durchführung und Auswertung von Messungen des elektrischen, thermischen und mechanischen Verhaltens von Antriebskomponenten und Bestimmung ihrer Modellparameter.

Die heute zur Verfügung stehende Software kann interaktiv benutzt werden, sie arbeitet mit Datenstrukturen und Datenbanken und kann auf Arbeitsplatzrechnern eingesetzt werden. Eine Übersicht über die z. Zt. verfügbare Software wird am Ende dieses Kapitels gegeben. Der Schwerpunkt der verfügbaren Entwicklungen und Programme liegt z. Zt. noch bei der Auslegungssoftware für Motoren, netz- und stromrichter gespeist mit Leistungen bis 200 kW. Für die Prozessanalyse und für die Simulation stehen nur anwendungsspezifische Programme zur Verfügung.

B: Software für die belastungsgerechte Auswahl von Drehstrom Asynchronmotoren

Der Dialog des Anwenders mit dem Arbeitsplatzrechner, bzw. mit der Auslegungssoftware, beginnt mit den Fragen nach der gewünschten Leistung, der erforderlichen Drehzahl, den Betriebsdaten (Wärmebeständigkeitsklasse, Kühlmitteltemperatur, Spannungsbereich) und dem Trägheitsmoment der Arbeitsmaschine (vgl. Bild 4.12).

Der Computer errechnet aus diesen Orientierungswerten sofort einen Richtwert für das Drehmoment. Auf dieser Basis kann dann der Drehmoment-Zeit-Verlauf als Folge von Intervallen, einschliesslich der Information über den Schaltzustand (Leerlauf oder abgeschalteter Motor), vom Nutzer entworfen und eingegeben werden (vgl. Bild 4.11).

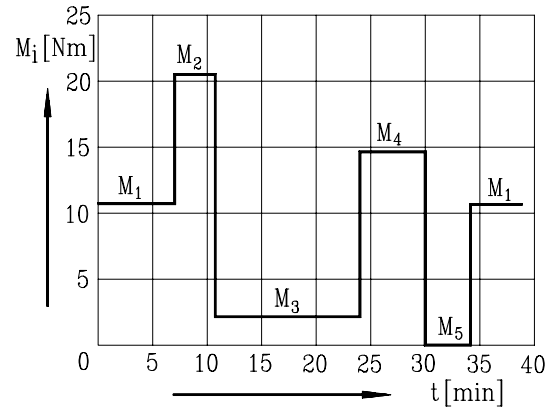


Bild 4.11: Drehmoment M als Funktion der Zeit t , dargestellt als Intervallfolge, das als Ausgangsinformation für die Auswahl des Motors dient

Da das Lastträgheitsmoment der Arbeitsmaschine meist nur in Relation zum Eigenträgheitsmoment des Motors abgeschätzt werden kann, wird möglicherweise dieser Wert nach der Auswahl des Motors noch präzisiert werden müssen.

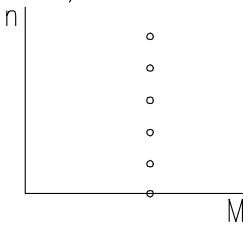
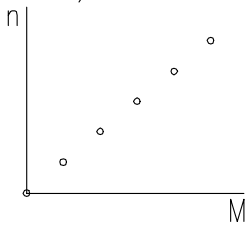
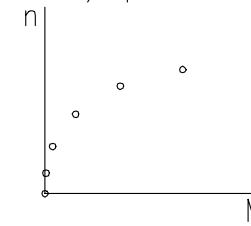
Mit den nun vorhandenen Ausgangsinformationen berechnet der Computer zunächst für die Vorauswahl eines Motors das Effektivmoment:

$$M_{eff} \approx \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

das für den Betrieb mit konstanter Belastung (wobei in den Intervallen t_1 bis t_n jeweils das thermische Gleichgewicht erreicht wird) bereits die Auswahl des richtigen Motortyps ermöglicht. Für alle komplizierten Fälle stellt dieser Motortyp aber nur eine Vorauswahl dar, die bei der dann folgenden automatischen Durchrechnung der Erwärmungs- und Abkühlvorgänge in den einzelnen Anlauf- und Laststufen präzisiert wird (vgl. Bild 4.14). Die endgültige Wahl des Motortyps erscheint dann auf dem Bildschirm.

Der Ergebnisausdruck Bild 4.13 stellt dann das Protokoll des Auswahlvorganges dar.

Auf Wunsch kann der nächst kleinere Motortyp auf seine thermische Belastung hin berechnet werden. Dies dient zur Einschätzung eines möglicherweise übernehmbaren Risikos hinsichtlich einer thermischen Überlastung, die auf Kosten der Lebensdauer gehen würde.

PRODRIVE A	Eingabedaten: Angaben zum Motor	Vers. 4.10
Betrieb bei Sonderfrequenz 60 Hz	(j/n) : < n >	
gewünschte Leistung	[kW] : 15.00	
gewünschte Synchrozahl	[1/min] : 1500	
result. Drehmomentrichtwert	[Nm] : <u>95</u>	
Leistungszuordnung	(DIN=1, progressiv=2) : 1	
Wärmebeständigkeitsklasse	[B/F/F+] : F	
Grundausführung	(j/n) : j	
max. Kühlmitteltemperatur (zul. Werte sind: 0 ... 60)	[°C] : <40 >	
Breitspannungsausführung	(j/n) : n	
Stern – Dreieck – Anlauf	(j/n) : n	
Spannungseinbruch beim Anlauf	(j/n) : j	
verbleibende Spannung	[%] : 90	
qualitativer Verlauf der Drehzahl–Drehmoment–Kennlinie		
1) konstant  2) linear  3) quadratisch 		
Kennzahl der gewünschten Kennlinie (1...3) : <2 >		
Zusatzträgheitsmoment an der Motorwelle [kgcm ²] : 1500.00		

PRODRIVE A		Eingabedaten: Angaben zum Belastungsverlauf	
Nr.	Lastmoment [Nm]	Dauer des Intervalles [min]	Intervallparameter
1	<58.00>	12.00	2
2	17.00	5.00	3
3	0.00	0.01	0
4	17.00	5.00	2
5	0.00	4.00	1
6	61.00	30.00	3
7	0.00	1.00	0

Bild 4.12: Bildschirmausgabe des rechnergeführten Dialogs mit dem Nutzer

PRODRIVE A	Der optimale Motor	
Aus unserem Lieferprogramm empfehlen wir Ihnen den Motor:		
Typ KPER 160 M 4	Modifikation – Standardausführung	
Nenndaten des Motors	Angaben zum Lastfall	
Leistung : 11.00 kW Drehzahl : 1440 1/min Moment : 72.95 Nm Spannung: 220/380 V Strom : 23.00 A (Y) WBK : F – J(eigen) : 350.0 kgcm ²	max. Anlaufzeit : 0.37 s max. Bremszeit : 0.17 s Reversierzeit : 0.00 s Belastungsgrad : 61 % max. Erwärmung: 59 K	

PRODRIVE A	Kontrollrechnung nächst kleinerer Typ	
Aus unserem Lieferprogramm empfehlen wir Ihnen den Motor:		
Typ KPER 132 M 4	Modifikation – Standardausführung	
Nenndaten des Motors	Angaben zum Lastfall	
Leistung : 7.50 kW Drehzahl : 1440 1/min Moment : 49.74 Nm Spannung: 220/380 V Strom : 16.50 A (Y) WBK : F – J(eigen) : 280.0 kgcm ²	max. Anlaufzeit : 0.70 s max. Bremszeit : 0.26 s Reversierzeit : 0.00 s Belastungsgrad : 102 % max. Erwärmung: 98 K Wünschen Sie Einsatzhinweise (j/n)?:	

- * Unter Einhaltung nachfolgender Einschränkungen ist ein Einsatz des Motors zulässig:
 - Kontrollieren Sie, ob eine geringere Kühlmitteltemperatur zugelassen werden kann (Kontrollrechnung)!
 - Für den vorliegenden Einsatzfall verbleibt unter Berücksichtigung der erhöhten Wicklungserwärmung eine Wicklungslebensdauer von 107%. Kontrollieren Sie ob dies ausreichend ist!
 - Die genannten Einschränkungen entfallen bei Umrüstung der Ständerwicklung auf Wärmebeständigkeitsklasse H durch eine VEM – Vertreterfirma. Rücksprache mit dem Hersteller ist unbedingt erforderlich! Beachten Sie die Modifikationshinweise!
- * Modifikationshinweise:
 - Einsatz entsprechend temperaturbeständiger Lager und Schmierfette
 - Austausch von Plastlüfter gegen Metalllüfter
 - Einsatz entsprechend temperaturbeständiger Dichtungen
 - Kontrolle der Zulässigkeit der erhöhten Gehäusetemperatur

Bild 4.13: Ergebnis der Motorauswahl als Rechnerausdruck: Wahl des Motortyps und Kontrollrechnung für den nächst kleineren Motortyp

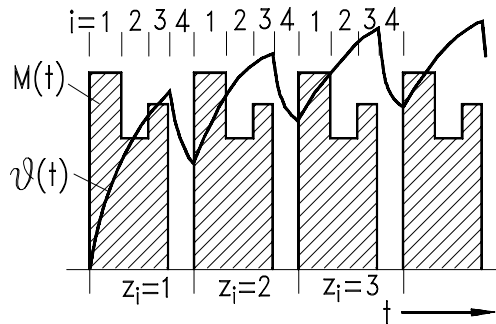


Bild 4.14: Drehmoment- und Temperaturverlauf

Für die Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Rechnerprogrammes zur automatischen Auswahl ist die Kenntnis des zugrundeliegenden Algorithmus auch für den Anwender von Bedeutung. Der Algorithmus ist im **Bild 4.15** als Flussdiagramm schematisch wiedergegeben worden. Eine nähere Erklärung erübrigt sich. Es muss aber bemerkt werden, dass in diesem Schema nur ein einzelner Erwärmungsvorgang behandelt wird und nur die wesentlichsten Entscheidungen und auch die nur in vereinfachter Form, enthalten sind. Das thermische Modell ist gegenüber dem im **Kapitel 5** angegebenen vereinfacht. Es stellt ein Zweikomponentenmodell nach Vogel [39] dar, dessen Bestimmungsstücke für jeden Typ einer Leistungsreihe von Drehstromasynchronmotoren durch eine Typenprüfung bestimmt und natürlich vom Hersteller des Motors auch garantiert werden müssen. Das ist die Begründung für die Reduktion auf insgesamt 4 Parameter, deren Festlegung aber zugleich eine Qualitätserweiterung des Motors darstellt. Im **Kapitel 5** wird das Modell im Abschnitt "Modelle zur Ermittlung der Motortemperaturen" noch weiter erläutert.

C: Software zur Auswahl von Drehstromasynchronmotoren bei Speisung durch Frequenzumrichter und Auswahl des Umrichters

Bei Umrichterspeisung des Drehstromasynchronmotors, zum Zwecke der Drehzahlvariation, sind zwei Einflüsse zu beachten:

- die Abhängigkeit der Verluste von der Frequenz und der Drehzahl im Motor und die Abführung der Wärme,
- die Strom- und/oder Spannungs-Oberwellen.

In Anbetracht der bei Frequenzumrichtern zu erwartenden Fortschritte tritt der zweite Einfluss gegenüber der im Hinblick auf eine gewissenhafte Berücksichtigung des Belastungsregimes qualifizierten Projektierung zurück. Die heute noch übliche Projektierungstechnik bei drehzahlvariablen Antrieben geht von einer sogenannten thermischen Grenzkennlinie aus, die Aussagen über den Rückgang des zulässigen Motormomentes bei kleinen Drehzahlen (schlechter Kühlung) und hohen Frequenzen (höhere Verluste) macht. Diese veraltete Methode unterstellt, dass in den beiden genannten Extremfällen die Dauerbelastung herrscht. Sie führt demnach immer zu überdimensionierten Motoren und Frequenzumrichtern.

Die folgenden Computerausdrucke geben einen Einblick in die Arbeitsweise der Software zur antriebsgerechten Auswahl von Drehstrommotoren und der zugehörigen Umrichter für einen drehzahlvariablen Belastungsfall wieder (vgl. **Bild 4.16**). Auch hier, wie im **Bild 4.11** für die Auswahl eines Motors bei zeitlich variablem Drehmoment, wird versucht, durch Wahl des nächstkleineren Motors und entsprechenden Umrichters eine höhere Ausnutzung der Antriebskomponenten zu erreichen. Es ist auch hier z.B. gewissenhaft abzuschätzen, ob etwa eine Umgebungstemperatur von 40°C lebensdauer-relevant anzusetzen ist. Der Umrichtertyp wird allerdings der gleiche bleiben müssen, da seine Nennleistung von der Betriebsspannung und von den Betriebsströmen bestimmt wird.

Bisher wurde Oberwelleneinflüssen ein vordergründiges Interesse eingeräumt und dabei der Drehzahlabhängigkeit der Antriebseigenschaften keine ausreichende Aufmerksamkeit gewidmet. Selbstverständlich ist je nach Entwicklungsstand der Umrichtertechnik und gegebenenfalls unter intimer Kenntnis der vorzugsweise genutzten Umrichterreihe, der Oberwelleneinfluss zu berücksichtigen. Entsprechende Prüffelduntersuchungen am Gesamtantrieb sind dazu erforderlich. Es kann aber auch bei Kenntnis der Oberwellenanteile die Reduktion des Motormomentes bei den verschiedenen Stillfrequenzen berechnet werden. Glücklicherweise wird aber der Oberwelleneinfluss im Verlaufe der Entwicklung der Umrichtertechnik immer mehr in den Hintergrund treten.

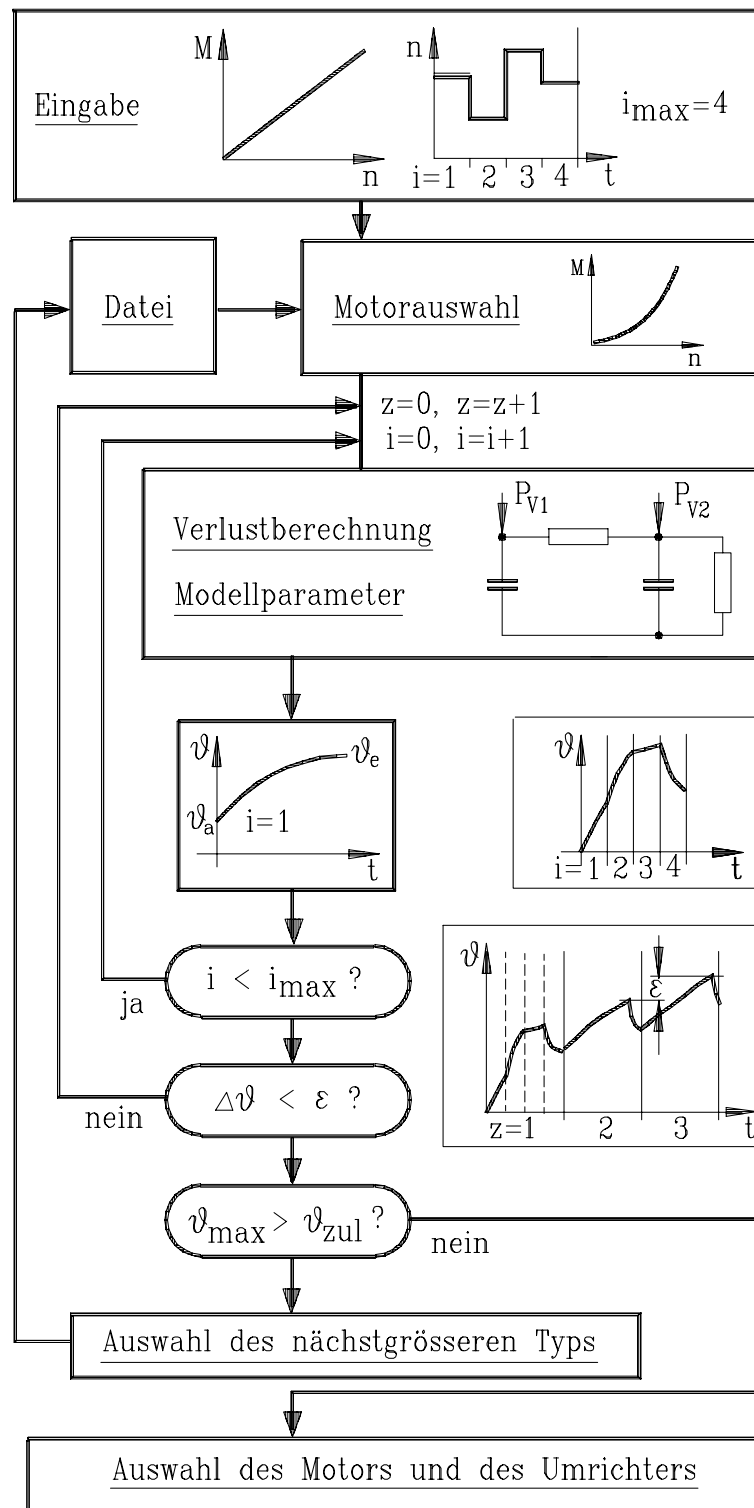
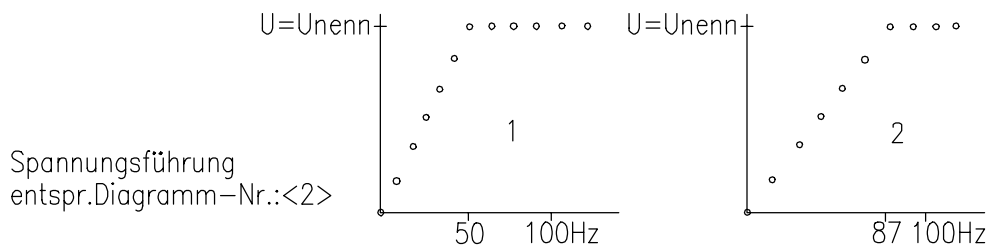


Bild 4.15: Auswahlalgorithmus

PRODRIVE U	Eingabedaten: Angaben zum Umrichter	Vers. 4.10
------------	-------------------------------------	------------

Idealisierter Verlauf der Umrichter-Ausgangsspannung (U_{enn}) in Abhängigkeit von der Frequenz (Spannungsanhebung nicht dargestellt)
(Hinweis: Erforderliche Motorschaltung (Stern/Dreieck) $\rightarrow$ <F1>)



PRODRIVE U	Eingabedaten: Angaben zum Motor	Vers. 4.10
------------	---------------------------------	------------

Syn.-drehzahl (50Hz)	Polzahl
3000	2
1500	4
1000	6
750	8

gewünschte Polzahl des Motors : <2>

Leistungszuordnung [DIN=1, progressiv=2] : 1

Art der Belüftung [1=Eigen, 2=Fremd] : 1

erf. Wärmebeständigkeitsklasse [B/F] : F

max. Kühlmitteltemperatur (°C) : 40

Drehzahl – Drehmoment – Kennlinie:

- linear.....l
- konstant.....k
- quadratisch.q
- beliebig.....b

gewünschter Typ : k

Punkt auf der Kennlinie : Drehzahl : <2920.0> 1/min
bei Drehmoment : 62.00 Nm

PRODRIVE U	Eingabedaten: Angaben zum Lastspiel	Vers. 4.10
------------	-------------------------------------	------------

Nr.	Lastmoment [Nm]	Dauer des Intervalles [min]	Intervallparameter
1	875.00	0.10	2
2	2652.00	1.50	2
3	4375.00	1.00	2
4	4500.00	0.50	2
5	4375.00	1.00	2
6	2625.00	1.50	2
7	875.00	0.50	2
8	0.00	18.00	0

mögliche Intervallparameter: 2=Normalbetrieb

Entsprechend Ihren Belastungsdaten empfehlen wir folgenden Antrieb:

Motor
 KPER 160 L 2

Nenndaten des Motors

Leistung : 18.5 kW
 Drehzahl : 2920 1/min
 Moment : 60.51 Nm
 Spannung : 220/380 V
 Strom : 58.89 A (Dreieck)
 WBK : F –
 Kühlmitteltemp. : 40 °C
 Belastungsgrad : 72 %
 max.Erwärmung : 72 K

Angaben zur Umrichterwahl

Ausgangsspannung : 380 V
 erf. Maximalstrom : 61.9 A
 erf. Frequenz von : 16 Hz
 bis : 76 Hz
 U/f=konstant bis : 87 Hz

Umrichterwahl erwünscht(j/n)?

Motor
 KPER 160 L 2

Nenndaten des Motors

Leistung : 18.5 kW
 Drehzahl : 2920 1/min
 Moment : 60.51 Nm
 Spannung : 220/380 V
 Strom : 58.89 A (Dreieck)
 WBK : F –
 Kühlmitteltemp. : 40 °C
 Belastungsgrad : 72 %
 max.Erwärmung : 72 K

Umrichter
 S3.-30.0/400-.

Nenndaten des Umrichters

Geräteleistung : 40.0 kVA
 Ausgangsspannung: 3*0-380 V
 Maximalstrom : 65.0 A
 Minimalfrequenz : 1 Hz
 Maximalfrequenz : 100 Hz
 U/f=konstant bis : 87 Hz

PRODRIVE U

Kontrollrechnung zum nächstkleineren Antrieb

Die gewünschte Kontrollrechnung ergibt:

Motor
 KPER 160 MX 2

Nenndaten des Motors

Leistung : 15.00 kW
 Drehzahl : 2920 1/min
 Moment : 49.06 Nm
 Spannung : 220/380 V
 Strom : 49.36 A (Dreieck)
 WBK : F –
 Kühlmitteltemp. : 40 °C
 max.Erwärmung : 102K

Umrichter
 S3.-30.0/400-.

Nenndaten des Umrichters

Geräteleistung : 40.0 kVA
 Ausgangsspannung: 3*0-380 V
 Maximalstrom : 65.0 A
 Minimalfrequenz : 1 Hz
 Maximalfrequenz : 100 Hz
 U/f=konstant bis : 87 Hz

Bild 4.16: Bildschirmausgabe des rechnergeführten Dialogs mit dem Benutzer, Drehstrom-Umrichterantriebe

D: Verfügbare Software zur Auslegung von Antrieben

- | | |
|--|---|
| 1) Auswahl von Asynchronmaschinen
CDDCH 90: Feste Drehzahl
CDCCH 90: Variable Drehzahl (Umrichter) | F.W.Berg, ABB Normelec AG
Riedstrasse 6, 8953 Dietikon
Tel.: 01-743 42 80 |
| 2) Auswahl von Antriebsmotoren für Netz- und Umrichterbetrieb
ORPRO CH-VN63 Universalprogramm
(Ersatzschaltbild, Streuinduktivität) | F.W.Berg, ABB Normelec AG
Riedstrasse 6
8953 Dietikon
Tel.: 01-743 42 80 |
| 3) Projektierung von Antrieben
PRODRIVE A: Drehstrom-Standardmotoren
PRODRIVE U: Umrichterantriebe | Dr. H.Reiche, VEM Antriebstechnik AG
Försterlingstr. 20, D-01259 Dresden
Tel.: 0049-351-229 5430 |
| 4) Anlaufverhalten und Erwärmung der Asynchronmaschine
ASMANL: Anlauf
ASMTMP: Erwärmung | Dr. R.E.Neubauer, ETH Zürich, IEM
Physikstrasse 3, 8092 Zürich
Tel.: 01-632 2725 |
| 5) Alternating Current Adjustable Frequency Drives
(Simulation umrichter gespeister Drehstromantriebe) | Allen-Bradley
Lohwisstrasse 50, 8123 Ebmatingen
Tel.: 01-980 3303 |
| 6) Analyse von Arbeitsprozessen
SEW Berechnungsprogramm
(Sammlung von Fallbeispielen) | Rene Holzer, Alfred Imhof AG
Antriebstechnik, 4142 Münchenstein
Tel.: 061-411 9296 |
| 7) Motor Selection Program
MOTORSEL DC: Gleichstrommotoren
MOTORSEL AC: Wechselstrommotoren | CEGELEC Industrial Controls
West Avenue, Stoke-on-Trent
Staffordshire ST7 1TW |
| 8) Drives Diagnostic Quiz
(Fallbeispiele zur Fehleranalyse für elektrische Antriebssysteme) | CEGELEC Industrial Controls
West Avenue, Stoke-on-Trent
Staffordshire ST7 1TW |
| 9) Electric Machinery
Fallbeispiele zur Berechnung von elektrischen Maschinen | Stephen D.Umans
Mc Graw Hill Book Company
College Division |
| 10) Wirtschaftlichkeit elektr. Antriebe
Motor Master Version 2.0
(Energie- und Kostenanalyse für Motoren verschiedener Hersteller) | Washington State Energy Office
Motor Master Registration
P.O.Box 43 165
Olympia, WA 98504-3165 |

5 Analyse und Identifikation des Arbeitsprozesses und der Antriebskomponenten

Grundsätzliches:

- Für eine optimale Auslegung eines Antriebes ist eine möglichst genaue Identifikation des Arbeitsprozesses erforderlich.
- Der mechanische Prozess wird durch die Abhängigkeit des Widerstands-Drehmomentes von der Drehzahl und von der Zeit sowie durch den Arbeitsbereich beschrieben.
- Die Parameter des Arbeitsprozesses können analytisch bestimmt oder durch Versuche ermittelt werden.
- Die notwendige Grundlage für die Auslegung des Motors ist eine möglichst genaue Kenntniss der Erwärmungsvorgänge, da diese die Lebensdauer der Wicklung bestimmen.

fes möglichst genau zu bestimmen, damit Unter- oder Überdimensionierungen vermieden und mögliche Verlustquellen erkannt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich das Lastmoment M_L aus dem Widerstandsmoment M_W und dem Beschleunigungsmoment M_B zusammensetzt.

Eine Klassifizierung der Antriebsprozesse kann, wie in der Tabelle 5.1 dargestellt, aufgrund:

- des zeitlichen Verlaufs des Lastmomentes $M_L = f(t)$,
- der Häufigkeit des Anlaufens und Stillsetzens,
- des Trägheitsmomentes der Arbeitsmaschine,
- des Drehzahlstellbereiches

erfolgen, welche wiederum zeitlich gesehen in quasistationäre und instationäre Betriebszustände unterteilt werden können.

Während im quasistationären Betrieb nur das Widerstandsmoment M_L der Arbeitsmaschine bestimmend und die mechanischen und thermischen Ausgleichsvorgänge im Antrieb von untergeordneter Bedeutung sind, wird die Anzahl der Parameter im instationären Betrieb durch den zeitlichen Verlauf des Widerstands- und Beschleunigungsmomentes, durch die Häufigkeit und die Dauer des Anlaufens und Stillsetzens, durch das Trägheitsmoment und durch den Arbeitsbereich des Antriebes erweitert. Die grössten Anforderungen werden bezüglich der Erfassung der Vorgänge an den instationären Betrieb gestellt, da hier ein grosses Energieverschwendungs- aber auch Sparpotential vorliegt.

Allgemein wird das mechanische System eines Antriebsprozesses gekennzeichnet durch :

- Zustandsgrössen,
- Grundgleichungen,
- Arbeitsmaschinenparameter

Im folgenden werden die dafür wesentlichen Beziehungen angegeben.

5.1 Einführung

Das Ziel einer optimalen Synthese eines Antriebssystems ist, die geforderte Aufgabenstellung mit einem möglichst geringen Energie- und Kostenaufwand zu verwirklichen. Dazu ist vor allem eine möglichst genaue Identifikation des Antriebsprozesses erforderlich.

In den folgenden Abschnitten werden Verfahren zur Identifikation der bestimmenden mechanischen Prozesse in der Arbeitsmaschine und im Antriebssystem beschrieben und wichtige Zusammenhänge für die Motorauslegung erläutert.

5.2 Identifikation der Arbeitsmaschine

1) Allgemeines:

Das Ziel der Identifikation des Antriebsprozesses muss sein, dessen mechanische Parameter, d.h. den zeitlichen Verlauf des Lastmomentes M_L , der Drehzahl n und des Leistungs- und Energiebedarf-

Last-moment			Anlauf, Still-setzung		Trägheitsmoment ¹⁾			Drehzahl-stellbereich		M _W (n)	
veränderl.	schwank.	stossartig	selten	häufig	klein	mittel	gross	mittel	gross		
X			X		X					8	Lüfter kleiner Leistung, Kreispumpen, leichte Transportbänder, Hängeförderer, Förderschnecken, Rolltreppen
X			X			X				2	Lüfter, Elevatoren, Turbo-Kompressoren, Schüttgut-Förderbänder, Flüssiggut-Rührwerke, Kühltrommeln
X			X			X		X			leichte Textilmaschinen, Mischer, Schleifmaschinen
X			X			X			X	2	Rotationsdruckmaschinen, Spindelantriebe von Werkzeugmaschinen, Papiermaschinen, Streichmaschinen
X				X		X			X	1	Personenaufzüge
X	X	X	X			X				2 11	Holländer, Knetmaschine, Betonmischer, Mahlgänge, Trockentrommeln, Kolbenpumpen und Kompressoren mit geringem Ungleichförmigkeitsgrad, Plattenbänder, Zementmühlen, Dreschmaschinen, Sägen
X	X	X	X			X		X		4	Webstühle, Waschmaschinen, Hängebahnen, Hobelmaschinen, Schiffswellen, Stückgut-Förderbänder, Extruder, Drehöfen
X	X	X	X			X			X		Stahl-Walzenstrassen, S-Rollen
X	X	X		X		X		X		1	Kran-Hubwerke, Kran-Drehwerke, Kran-Wippwerke, Manipulatoren, Stahl-Reversierwalzwerke, Blech-Zerteilanlagen, Seilwinden
	X	X	X				X			12 13	Holzschleifer, Kolbenpumpen mit grossem Ungleichförmigkeitsgrad, Kollergänge, Hammermühlen, Antriebe für Ventile, Klappen, Tore des Stahlwasserbaus
	X	X	X				X	X		5	Trockenzylinder, Glattzylinder, Papierkalander, Bagger, Hämmer, Gummiwalzwerke, Rüttelmaschinen, Rollenschneider
	X	X		X			X				Pressen, Scheren, Stanzen, Kran-Fahrwerke, Ladewinden
	X	X		X			X	X			Papier-Roller, Haspeln, Querschneider
	X	X	X				X				Steinbrecher, Kolbenkompressoren ohne Zusatzschwingmassen, Sägegatter, Ziegelpressen
	X	X	X				X	X			schwere Rollgänge, Blockwalzwerke, Zuckerzentrifugen
X				X	X						Verpackungsmaschinen, Spülmaschinen, Flaschenfüllmaschinen
X				X	X				X	1 3	Stellantriebe, Vorschubantriebe für Werkzeugmaschinen, Walzanstellungen, Rudermaschinen

¹⁾ bezogen auf die Antriebswelle

Tabelle 5.1: Klassifikation von Arbeitsmaschinen (vgl. Bild 5.5)

2) Zustandsgrössen und Grundgleichungen:

a) Zustandsgrössen sind für :

Kreisförmige Bewegungen (Rotation):

- Winkel α ,
- Winkelgeschwindigkeit $\Omega = d\alpha/dt$,
- Winkelbeschleunigung $a = d\Omega/dt$.

Geradlinige Bewegung (Translation):

- Weg s ,
- Geschwindigkeit $v = ds/dt$,
- Beschleunigung $a = dv/dt$.

Anstelle der Winkelgeschwindigkeit Ω wird häufig auch die Drehzahl n verwendet. Zwischen Ω und n besteht der Zusammenhang:

$$\Omega = 2\pi n$$

Bei einer gleichförmigen Bewegung ist die Geschwindigkeit konstant und die Beschleunigung gleich Null.

Für verschiedene Prozesse, wie z.B. bei den Transportsystemen und der Textilverarbeitung, ist die zeitliche Änderung der Beschleunigung, der sogenannte Ruck $r = da/dt$, eine kritische Grösse, welche bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten sollte.

In Transporteinrichtungen (**Bild 5.4**) treten sowohl Rotations- als auch Translationsbewegungen auf. Die Geschwindigkeit v am Umfang eines Rades mit dem Radius R , welches sich mit der Winkelgeschwindigkeit $\Omega = 2\pi n$ dreht hat den Wert:

$$v = \Omega R$$

b) Die Bewegungsgesetze beschreiben die Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit Ω bzw. der Geschwindigkeit n von den Drehmomenten M , M_W , bzw. von den Kräften F , F_W . Sie lauten für :

Kreisförmige Bewegungen (Rotation):

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

Geradlinige Bewegungen (Translation):

$$m \frac{dv}{dt} = F - F_W$$

bei konstantem Trägheitsmoment J bzw. bei konstanter Masse m .

Der Bewegungsverlauf: $\Omega(t)$, $\alpha(t)$ bzw. $v(t)$, $s(t)$ wird entsprechend diesen Bewegungsgesetzen verursacht durch:

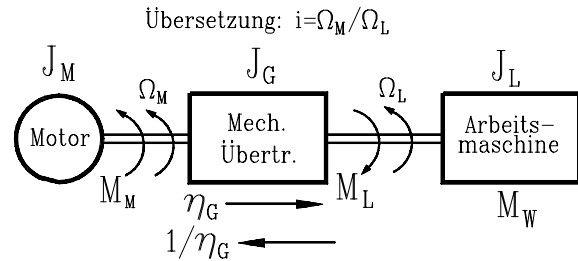
- das Antriebsmoment M bzw. die Antriebskraft F des Motors, wobei $M, F \geq 0$ Motorbetrieb und $M, F \leq 0$ Brems- oder Generatorbetrieb bedeuten,
- das Widerstandsmoment M_W , bzw. die Widerstandskraft F_W der Arbeitsmaschine,
- das Beschleunigungsmoment $M_B = J d\Omega/dt$, bzw. die Beschleunigungskraft $F_B = m dv/dt$

Dabei können sowohl die antreibenden Momente und Kräfte als auch die Lasten M_W , bzw. F_W von den Zustandsgrößen (Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung) und von der Zeit t abhängig sein.

Der Motor des Antriebssystems hat mit dem Drehmoment M , bzw. mit der Kraft F stets das Widerstands- und das Beschleunigungsmoment, bzw. die Widerstands- und die Beschleunigungskraft zu decken:

$$M = M_W + M_B; \quad F = F_W + F_B$$

Befindet sich zwischen der Arbeitsmaschine und dem Antrieb ein Getriebe mit dem Übersetzungsverhältnis $i = n_M/n_L$ und mit dem Wirkungsgrad η , so wird das Widerstandsmoment M_{WA} der



Drehmomente: Bewegungsgleichung

$$M_M = \frac{M_W}{\eta_G i} + \underbrace{\left(J_M + J_G + \frac{J_L}{\eta_G i^2} \right)}_{J_t} \frac{d\Omega_M}{dt}$$

Bild 5.1: Antriebssystem mit Getriebe

Arbeitsmaschine folgendermassen auf die Antriebsseite übertragen (vgl. **Bild 5.1**):

$$M_W = M_{WA}/\eta_i$$

Das auf der Antriebsseite wirksame Trägheitsmoment J hat den Wert:

$$J = J_M + J_G + J_L/i^2$$

c) Die Leistungsbeziehungen lauten für:

kreisförmige Bewegungen (Rotation):

$$P = \Omega M$$

geradlinige Bewegungen (Translation):

$$P = v F$$

d) Für die Arbeit gilt allgemein die Beziehung :

$$A = \int P dt$$

Aufgrund der Beziehung $P = \Omega M$ bzw. $P = v F$ lassen sich für ein Antriebssystem die Leistungsbilanz:

$$P_M = P_W + P_B$$

und die Energiebilanz aufstellen:

$$A_M = A_W + A_B$$

Der Motor hat dementsprechend im allgemeinsten Fall sowohl die Widerstands- als auch die Beschleunigungsleistung P_W und P_B bereitzustellen, wobei die in den Schwungmassen gespeicherte Energie:

$$A_B = \int J \Omega d\Omega$$

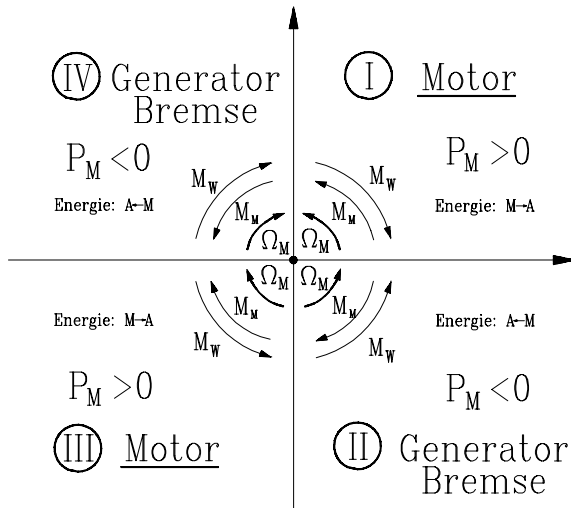


Bild 5.2: Betriebsbereiche eines Antriebs im Überblick

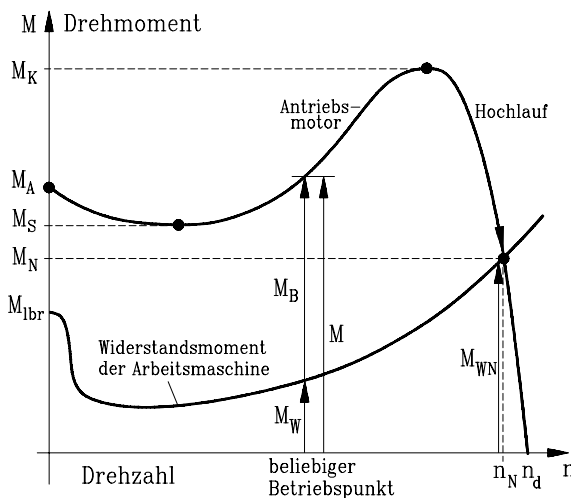


Bild 5.3: Drehzahl – Drehmomentverhältnisse im instationären und stationären Betrieb

u.U. zurückgewonnen werden kann. Dazu muss allerdings der Antrieb in mindestens zwei Quadranten des Betriebsdiagramms (vgl. **Bild 5.2**) betrieben werden können.

Im **instationären Betrieb** ist das inhärente Drehmoment M des Motors entsprechend der Bauart oder der Steuerung eine Funktion der Drehzahl n oder eine vorgegebene Grösse. Dementsprechend stellt sich dann ein Beschleunigungsmoment $M_B = M - M_W$ ein, welches dann den Bewegungsvorgang bestimmt.

Im **stationären Betrieb** stellt der Motor nur ein Drehmoment M entsprechend dem Widerstandsmoment M_W bereit. Das Beschleunigungsmoment M_B ist gleich Null, da die Geschwindigkeit konstant bleibt (vgl. **Bild 5.3**).

3) Arbeitsmaschinenparameter und deren Identifikation:

Aus dem vorhergehenden folgt, dass das Widerstandsmoment M_W , das Trägheitsmoment J und die Betriebsbereiche die wesentlichen Parameter einer Arbeitsmaschine sind.

Die **Bestimmung des Widerstandsmomentes** M_W , bzw. der Leistung P_W einer Arbeitsmaschine, kann erfolgen:

- aufgrund physikalischer Zusammenhänge,
- durch Messungen und Identifikation eines Modelles.

Nach [24] kann man dabei die folgenden Arten von Arbeitsmaschinen (vgl. **Bild 5.1** und **Bild 5.5**) unterscheiden:

a) **Bewegungsmaschinen:**

Bei den Arbeitsmaschinen welche Massen bewegen, heben oder senken, kann das Widerstandsmoment M_W aufgrund der physikalischen Gesetzmässigkeiten bestimmt werden.

Beispiel : Lastenaufzug (vgl. Bild 5.4)

Zur Bewegung des Gewichtes G in vertikaler Richtung mit der Geschwindigkeit v ist das Drehmoment $M_W = g \cdot G \cdot D/2$ und die Leistung $P_W = g \cdot G \cdot v$ erforderlich ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

b) **Verformungsprozesse**

Bei den Prozessen der spanabhebenden Metallbearbeitung kann der Leistungsbedarf P_W und das Widerstandsmoment M_W , wie in den **Bildern 5.6 bis 5.8** dargestellt, berechnet werden:

c) **Mengentransport**

Bei den Arbeitsmaschinen für den Mengentransport, wie z. B. bei den Kreiselpumpen, den Verdichtern, den Zentrifugen und den Rührwerken, steigt das Widerstandsmoment mit dem Quadrat der Drehzahl an: $M_W \sim n^2$.

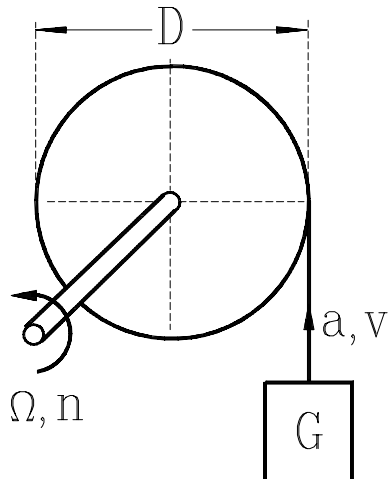
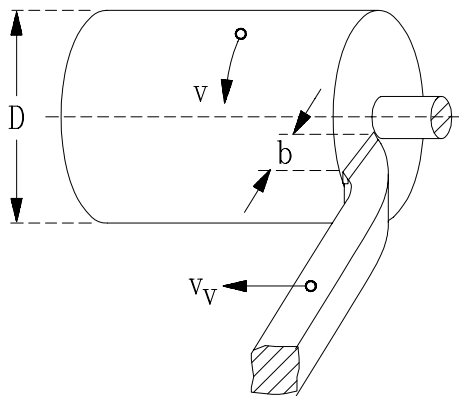


Bild 5.4: Einfacher Lastenaufzug mit Rotations- und Translationsbewegung

Dabei ist berücksichtigt, dass beim Übergang vom Stillstand in den Bewegungsvorgang die Haftreibung überwunden werden muss, und dass bei Verdichtern zur Erleichterung des Anlaufs eine Druckentlastung vorgesehen werden kann.

Das **Bild 5.5** zeigt die Eigenschaften und die Widerstandsmomente $M_W = f(n)$ verschiedener Arbeitsmaschinen.



Drehmoment:

$$M_W = b \cdot s_v \cdot p_s \cdot v / (\eta \cdot 2\pi n) \sim 1/n$$

b = Spanbreite

s_v = Vorschub/Umdrehung

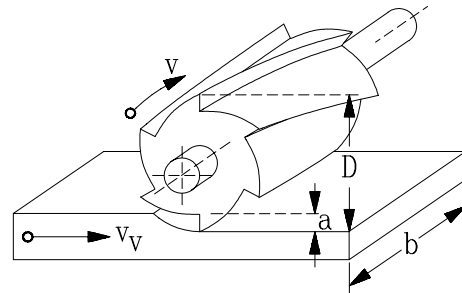
p_s = Schnittdruck

v = Schnittgeschwindigkeit

η = Umformwirkungsgrad (0.7 – 0.8)

Leistung: $P_W = M_W \cdot 2\pi n \sim konst.$

Bild 5.6: Prinzipdarstellung Drehen



Drehmoment:

$$M_W = a \cdot b \cdot p_s \cdot s_z \cdot z \cdot n / (\eta \cdot 2\pi n) \sim konst.$$

a = Spanhöhe

b = Fräsbreite

p_s = Schnittdruck

s_z = Vorschub/Schneide

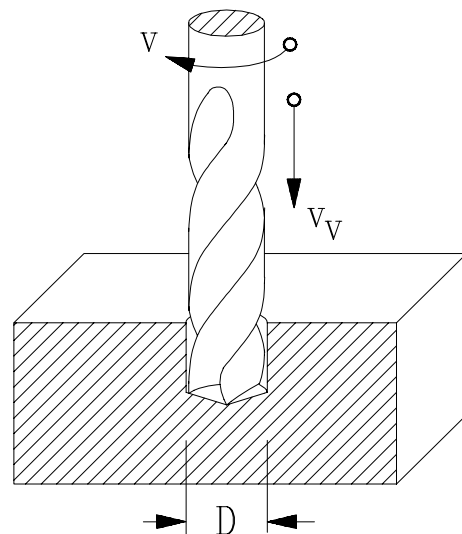
z = Zahl der Schneiden

n = Drehzahl

η = Umformwirkungsgrad (0.7 – 0.8)

Leistung: $P_W = M_W \cdot 2\pi n \sim n$

Bild 5.7: Prinzipdarstellung Fräsen



Drehmoment:

$$M_W = D^2 \pi / 4 \cdot s_v \cdot p_s \cdot n / (\eta \cdot 2\pi n) \sim konst.$$

D = Durchmesser

s_v = Vorschub/Umdrehung

p_s = Schnittdruck

n = Drehzahl

η = Umformwirkungsgrad (0.7 – 0.8)

Leistung: $P_W = M_W \cdot 2\pi n \sim n$

Bild 5.8: Prinzipdarstellung Bohren

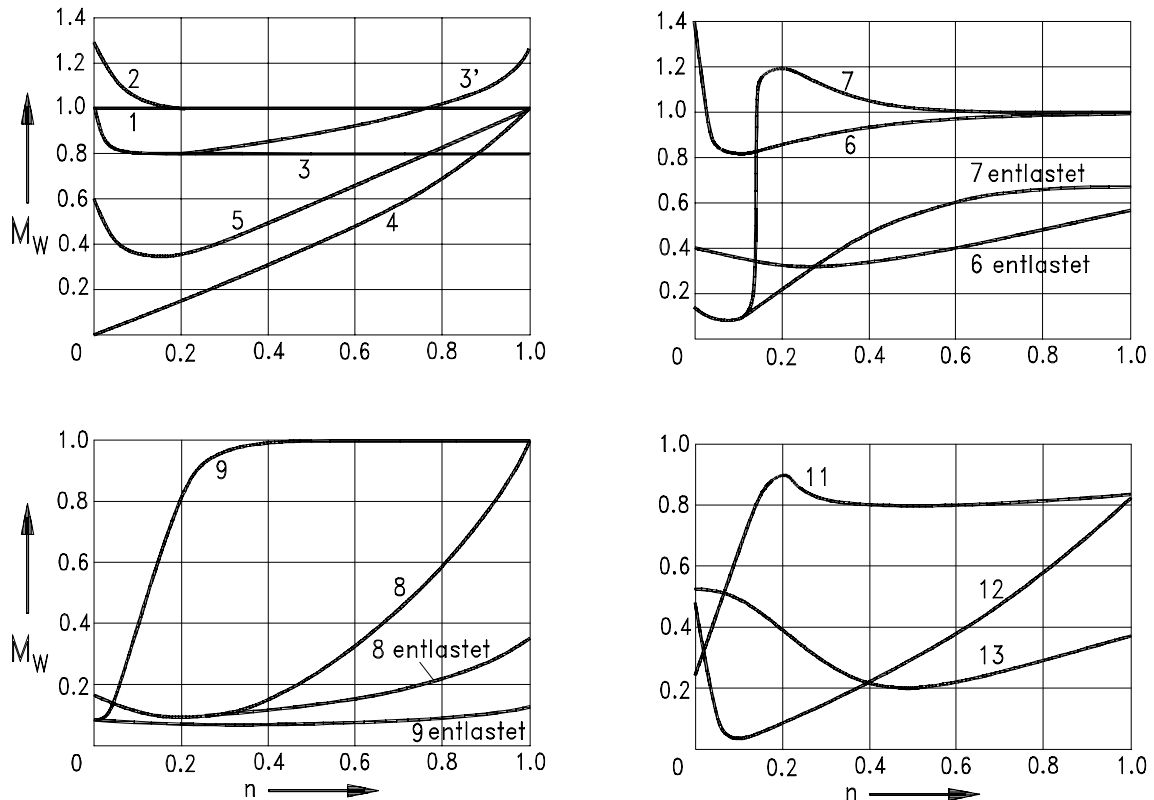


Bild 5.5: Widerstandskennlinien von Arbeitsmaschinen, Numerierung siehe **Tabelle 5.1**

4) Die Bestimmung der Trägheitsmomente:

Bei der rechnerischen Bestimmung des Trägheitsmomentes J_x eines Körpers bzgl. einer Rotationsachse x geht man am einfachsten von der Gleichheit der kinetischen Energie aus. Die kinetische Energie eines mit der Geschwindigkeit v bewegten Körpers der Masse m ist $W_{kin} = mv^2/2$. Ein Massenelement dm eines beliebig geformten Körpers, welches mit der Winkelgeschwindigkeit Ω im Abstand r um die x -Achse rotiert, liefert demnach den Beitrag :

$$dW_{kin} = 0.5 \cdot \Omega^2 \cdot r^2 dm \quad \text{wegen } v = \Omega r$$

zur kinetischen Energie des Körpers. Die Summe aller Beiträge liefert die kinetische Energie

$$W_{kin} = 0.5 \cdot \Omega^2 \int r^2 dm$$

welche sich auch durch das Trägheitsmoment J ausdrücken lässt:

$$W_{kin} = 0.5 \cdot \Omega^2 J$$

Damit erhält man die allgemeine Beziehung:

$$J = \int r^2 dm$$

Mit Hilfe dieser Beziehung können analytisch die Trägheitsmomente bezüglich einer beliebigen Drehachse für einfache Körper (vgl. **Bild 5.9**) analytisch oder numerisch auch für kompliziertere Körper ermittelt werden.

In der Praxis besteht ein Antrieb aus verschiedenen Schwungmassen, welche auf einer Welle oder durch Getriebe getrennt oder rotatorisch und translatorisch wirksam sein können.

Das resultierende Trägheitsmoment J_{res} von Körpern, welche sich auf einer Achse befinden und damit die gleiche Winkelgeschwindigkeit besitzen, erhält man durch einfache Addition der einzelnen Trägheitsmomente J_i :

$$J_{res} = \sum J_i$$

Das resultierende Trägheitsmoment gekoppelter Systeme erhält man mit Hilfe der Energieäquivalenz. Für ein allgemeines System, welches aus rotierenden Elementen mit der Winkelgeschwindigkeit Ω_i und dem Trägheitsmoment J_i und linear bewegenden Massen m_i mit der Geschwindigkeit v_i besteht, erhält man so das resultierende Trägheits-

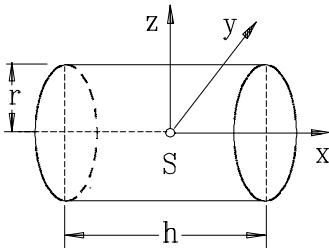
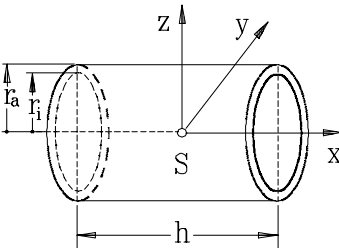
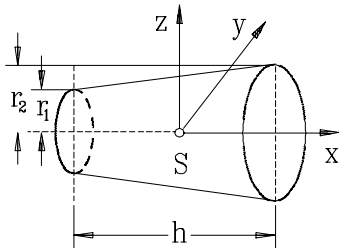
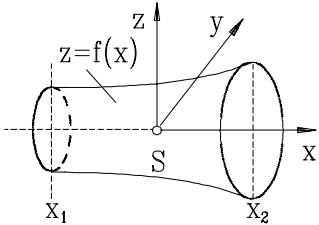
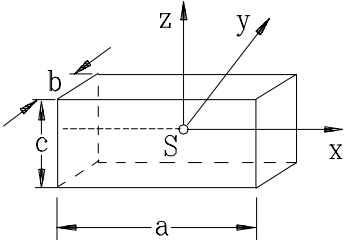
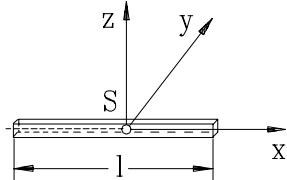
<u>Kreiszylinder</u>  $m = \rho \pi r^2 h \quad J_x = \frac{m r^2}{2}$ $J_y = J_z = \frac{m (3 r^2 + h^2)}{12}$ <u>Zylinderschale</u> Wanddicke $\delta \ll r$ $m = \rho 2 \pi r h \delta \quad J_x = m r^2$ $J_y = J_z = \frac{m (6 r^2 + h^2)}{12}$	<u>Hohlzylinder</u>  $m = \rho \pi (r_a^2 - r_i^2) h$ $J_x = \frac{m (r_a^2 + r_i^2)}{2}$ $J_y = J_z = \frac{m (r_a^2 + r_i^2 + h^2/3)}{4}$	<u>Kreiskegelstumpf</u>  $m = \rho \frac{1}{3} \pi h (r_2^2 + r_2 r_1 + r_1^2)$ $J_x = \frac{3}{10} m \frac{r_2^5 - r_1^5}{r_2^3 - r_1^3}$
<u>Beliebiger Rotationskörper</u>  $m = \rho \pi \int_{x_1}^{x_2} f^2(x) dx$ $J_x = \frac{1}{2} \rho \pi \int_{x_1}^{x_2} f^4(x) dx$	<u>Quader</u>  $m = \rho a b c \quad J_x = \frac{m (b^2 + c^2)}{12}$ $J_y = \frac{m (a^2 + c^2)}{12}$ $J_z = \frac{m (a^2 + b^2)}{12}$	<u>Dünner Stab</u>  $m = \rho A l \quad J_y = J_z = \frac{m l^2}{12}$

Bild 5.9: Trägheitsmomente einfacher Rotationskörper
 ρ = spezifische Dichte (Masse/Volumeneinheit)

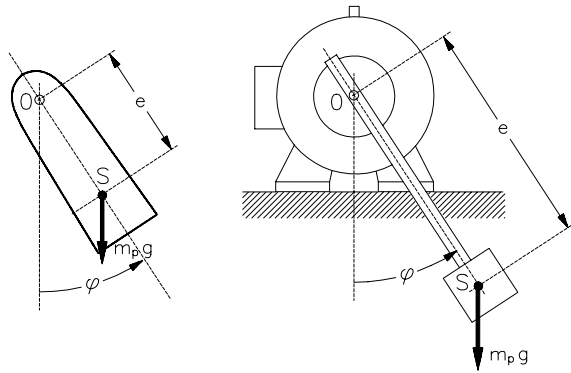


Bild 5.10: Experimentelle Bestimmung von Trägheitsmomenten
 O = Drehpunkt, G = Gewicht
 S = Schwerpunkt, ϕ = Winkel

moment J_{res} bei der Winkelgeschwindigkeit Ω_0 :

$$J_{res} = \sum J_i \cdot \Omega_i^2 / \Omega_0^2 + \sum m_i \cdot v_i^2 / \Omega_0^2$$

Das Trägheitsmoment eines unregelmässig geformten Körpers kann durch einen Pendelversuch experimentell ermittelt werden [34]. Kennt man den Abstand e des Schwerpunktes S vom Drehpunkt O (vgl. Bild 5.10) und das Gewicht G so lässt sich aus der Periodendauer der Schwingung des Körpers um die Achse OO als Pendel das Trägheitsmoment J bezüglich der Achse O berechnen:

$$J = G e (T/2\pi)^2$$

5.3 Checkliste zur prozessanalytischen Aufbereitung der Antriebsvorgänge

1. Bestimmung der zeitlichen Abhängigkeiten im Nennbetrieb:

Weg	Geschwindigkeit	Beschleunigung	
$s = s(t)$	$v = v(t)$	$a = a(t)$	für Translation
$\alpha = \alpha(t)$	$\omega = \omega(t)$	$\varepsilon = \varepsilon(t)$	für Rotation

2. Aufstellung eines mittleren Bewegungsspieles nach technologischen Analysen und Erfahrungswerten:

- Lastspiel, Auslastung
- Energiebedarf

3. Darstellung der Abhängigkeit des Widerstandsmomentes von der Drehzahl n und von der Zeit t : $m_W = m_W(n)$ und $m_W = m_W(t)$

4. Ermittlung aller bewegten Massen M_i , bzw. Trägheitsmomente: $J_i = J_i(t)$

5. Ermittlung des Wirkungsgrades $\eta(n)$ der Arbeitsmaschine und der mechanischen Übertragungsglieder

6. Abschätzung von Elastizitäten und Spielen des mechanischen Systems

7. Festlegung der Maximalbeanspruchung und Ermittlung von Grenzwerten nach den Sicherheitsvorschriften

8. Festlegung von Genauigkeitsangaben und zulässigen Abweichungen

5.4 Prozessidentifikation, Messtechnik und Auswertung

Zur Ermittlung der Leistungsanforderungen an den elektrischen Antrieb ist es notwendig, den Leistungsfluss und die energetischen Anforderungen der anzutreibenden Arbeitsmaschine oder des Prozesses zu kennen. Sind diese Forderungen wegen der Ungenauigkeit der zur Verfügung stehenden Modelle nicht berechenbar, so sind an vorhandenen Anlagen oder Prototypen der Arbeitsmaschine Erfahrungen durch Messungen zu sammeln. Solche Messungen müssen an der Arbeitsmaschine vorgenommen werden, wenn der Verdacht besteht, dass der antreibende Motor den Anforderungen nicht optimal gerecht wird und der Antrieb deshalb einen schlechten Wirkungsgrad zur Folge hat.

Im allgemeinen sind also zwei Anpassungsprozesse zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades vorzusehen. Die Analyse des elektrischen Antriebes alleine ist kurzsichtig.

A: Mittel zur Analyse der Arbeitsmaschine

An dieser Stelle sollen nur Hinweise für diese Analysetätigkeit gegeben werden, ausführlich werden diese Techniken in RAVEL-Untersuchungsprojekten wie: "Analyse ausgewählter Industrieprozesse bezüglich Gesamtwirkungsgrad" (Textil, Zementindustrie, Industrielüftungen, Werkzeugmaschinen) behandelt. Die hier für die Erläuterungen des grundsätzlichen Vorgehens ausgewählten Arbeitsmaschinen seien:

Pumpen

Die Leistung der Pumpe ist durch Förderstrom" und Förderhöhe" charakterisiert. Die entsprechende Pumpenkennlinie enthält ausserdem Informationen über den Wirkungsgrad des Förderprozesses, wie in **Bild 5.11** dargestellt.

Es gilt, die Kennlinie der Anlage mit den den Förderprozess beschreibenden Grössen "Förderstrom" und "Förderhöhe" in dem Gebiet maximalen Pumpenwirkungsgrades schneiden zu lassen, bzw. die Pumpen nach diesem Prinzip auszuwählen. Ein Mittel hierzu ist der Einsatz von Messpumpen und Messblenden. Die bedeutende

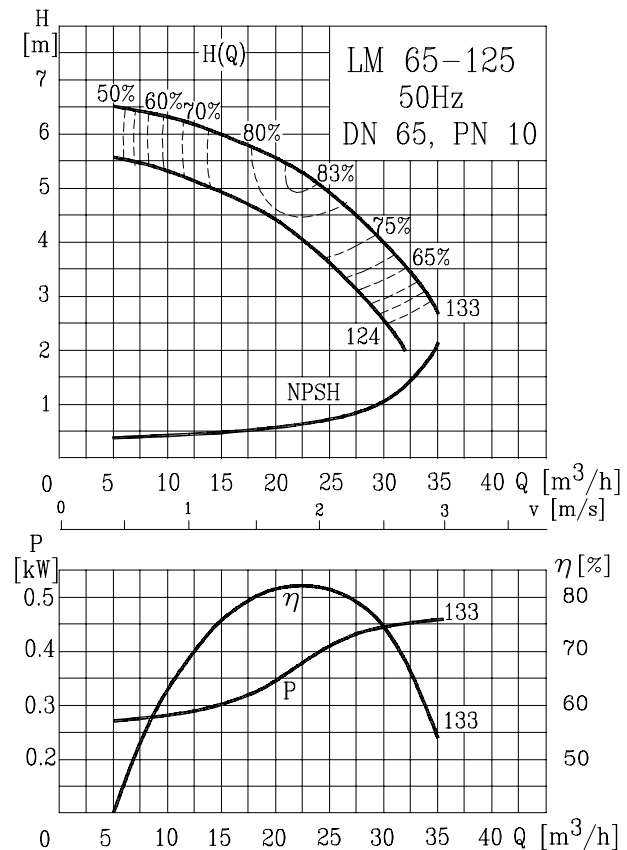


Bild 5.11: Hydraulische Leistungs- und Wirkungsgradkennlinie einer Kreiselpumpe

Aufgabe der Berechnung der Anlagenkennlinie, z.B. der Berechnung der Rohrstrecke von Heizungsanlagen mit vielen geregelten Verbrauchern wird innerhalb des Impulsprogrammes RAVEL unter anderem durch die Ausarbeitung "Umwälzpumpen – Auslegung und Betriebsoptimierung" (1991, 724.330D) behandelt.

Eine Messpumpe wird, wie in [8] beschrieben, anstelle der später neu oder im Rahmen einer Rekonstruktion einzusetzenden Pumpe in die Anlage einbezogen. Sie verfügt über die Messtechnik zur Bestimmung des Arbeitspunktes, der durch Förderdruck und Förderstrom charakterisiert ist.

Messblenden werden in den Förderstrom eingebracht. Im Hinblick auf die Messung an bestehenden Anlagen und auf die Vermeidung eines zusätzlichen stationären Aufwandes als besonders günstig, sind Messgeräte einzuschätzen, die auf dem Prinzip des Dopplereffektes arbeiten. Die Erhöhung der Schallgeschwindigkeit durch die Fördermittelbewe-

gung wird gemessen [27].

Ventilatoren

Die Lüfterleistung ist hier wie bei Pumpen durch Luft- oder Gasmenge und Druckdifferenz bestimmt.

Verarbeitungsmaschinen

Die mechanische Leistung ist gemäss $P_{mech} = M\omega$ dem Drehmoment und der Drehzahl proportional. Die Drehzahlmessung ist meist wegen Vorhandenseins von Tachometermaschinen oder inkrementalen Gebern unproblematisch. Das Drehmoment kann mit Hilfe von Drehmomentmesswellen bestimmt werden. Diese komplizierten Messgeräte müssen zusätzlich in den mechanischen Leistungsfluss eingebracht werden. Das Messprinzip beruht vorwiegend auf Beobachtung der Torsion oder Biegung von Messkörpern. Eine weitere, noch umständlichere Momentmessung ist durch Ermittlung des Gegenmomentes auf dem Wege des Auswiegens möglich. Dieses Messprinzip wird vornehmlich in Prüffeldern genutzt: sogenannte Pendelmaschinen (Elektrogeneratoren mit frei gelagertem Gehäuse) erfassen die über eine Welle übertragene mechanische Leistung.

Die Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades einer Verarbeitungsmaschine ist naturgemäss von der Art des Endproduktes abhängig. Bei einer Drehmaschine stellt dieses Endprodukt die Menge des abgedrehten Spanvolumens pro Zeiteinheit dar und bei einer Zementmühle die Leistung zum Zerkleinern von Mineralien von einer bestimmten Korngrösse zur anderen. So beträgt bei einer Zementmühle der entsprechende mechanische Wirkungsgrad etwa nur 3% , in einer Drehmaschine etwa 10% [3]. Das zeigt, welche grosse Bedeutung die Analyse des Gesamtprozesses bei der Betrachtung der Energieökonomie hat und dass die alleinige Berücksichtigung des elektrischen Energieflusses falsche Schwerpunkte setzt.

B: Mittel zur Analyse des elektrischen Antriebes

Grundvoraussetzung für die Beurteilung des meist zeitlich veränderlichen Arbeitsprozesses ist ein Leistungsmessgerät das mit einem vorgegebenen Takt die Werte der Wirk- und Blindleistung erfasst, spei-

chert und möglichst schreibt. Die grundsätzliche Schaltung zeigt **Bild 5.12** .

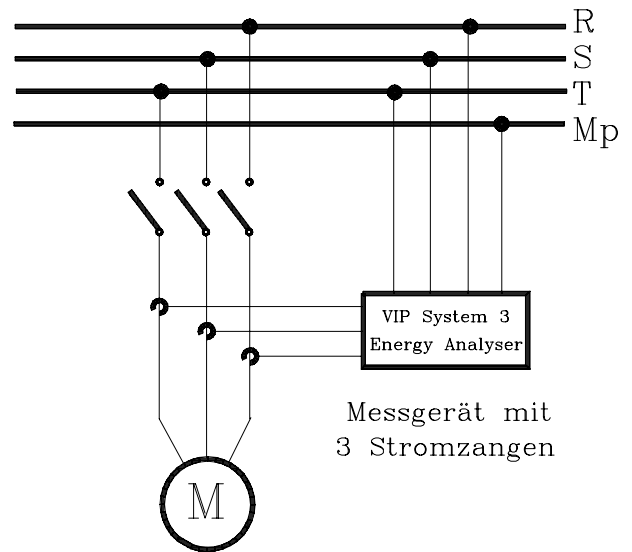


Bild 5.12: Messanordnung für momentane Leistungsmessungen

Mit dem VIP-Multifunktionsmessgerät können Einzelmessungen verschiedener Verbraucher einschliesslich der Leistungsfaktormessung minimal durchgeführt werden. Der Messtakt beträgt 1 Sekunde, es können Mittelwerte über vorgegebene Zeitabschnitte gebildet werden. Über längere Zeiträume hinweg, z.B. über Wochen, empfehlen sich Punktschreiber zur Leistungserfassung in Anlagen. All dies gilt zunächst unter der Voraussetzung von sinusförmigen Netzgrössen. Bei Verwendung von Stromrichtern und Umrichtern trifft dies nicht mehr zu.

Für die Wirkungsgradmessung an Induktionsmotoren, die von Umrichtern mit verzerrten Spannungen und Strömen gespeist werden, sind zweckmässigerweise Messgeräte mit Analog-Digitalwandlung, digitaler Multiplikation der Augenblickswerte von Strom und Spannung und anschliessender digitaler Verarbeitung der Leistungswerte in vielfältiger Form einzusetzen.

Bekannte Gerätetypen sind NORMA D5135 und YOKOGAWA Infratec 104B. Eine IEC-Empfehlung [22] ist in Vorbereitung. Für energieökonomische Antriebsanalysen interessiert nur der komplette Drehstromantrieb. Die Messgeräte müssen den Frequenzanforderungen genügen, die ihnen seitens der Netzgrössen am Eingang des Umrichters

auferlegt werden. Kann z.B. die Netzspannung rein sinusförmig gehalten werden, so erübrigt sich eine digitale Augenblickswertverarbeitung.

Der Verbrauch an Elektroenergie kann mit den erwähnten digitalisierten Leistungsmessern ebenfalls bestimmt werden. Im einfachen Fall von sinusförmigen Grössen allerdings bieten sich einfachere Lösungen an. So wandeln die Lastanalysegeräte von Landis & Gyr die Scheibenumdrehungen oder optischen Energieimpulse mittels auf der Aussenseite des Energiezählers montierter photoelektrischer Abtastköpfe in elektrische Impulse um. Abhängig von einer gewählten Messperiodendauer und dem Speicherausbau, können Messreihen über mehrere Tage, Wochen oder Monate mittels zugehörigem Personalcomputer und Software ausgewertet werden. Die Ergebnisse können, wie **Bild 5.13** zeigt numerisch oder auch graphisch dargestellt werden.

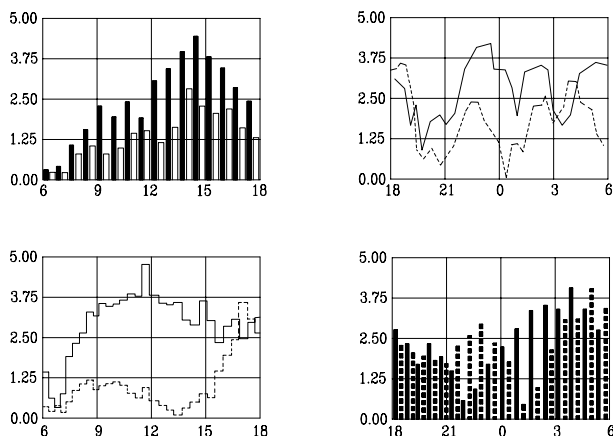


Bild 5.13: Verschiedene Arten der Lastkurvendarstellung beim Lastanalysegerät von Landis & Gyr

Besonders elegant ist das Leistungs- und Energiemessgerät EMU 1.14 von Landis & Gyr. Es weist die laufenden Kosten der bezogenen Energie unmittelbar aus.

5.5 Modelle zur Ermittlung der Motortemperaturen

Wie auch immer sich die Projektierungsmethoden von Elektromotoren in Abstimmung zwischen Hersteller und Anwender entwickeln werden, die sicherste Grundlage bei der Wahl des Motors ist

eine möglichst genaue Kenntnis der Erwärmungsvorgänge unter den gegebenen Betriebsbedingungen.

Die Motortemperaturen an thermisch kritischen Stellen, wie Wickelkopf der Ständerwicklung und Läufering, müssen mit ausreichender Genauigkeit ($\pm 3K$) ermittelt werden. Die zulässige Erwärmung elektrischer Maschinen ist mit Rücksicht auf die Wärmebeständigkeit der Isolierstoffe und damit auf die Lebensdauer begrenzt.

Die zulässigen Übertemperaturen ergeben sich aus den höchstzulässigen Dauertemperaturen der entsprechenden Isolierstoffklasse abzüglich der Kühlmitteltemperatur von $40^{\circ}C$ sowie eines Erfahrungswertes von $5^{\circ}C - 15^{\circ}C$. Obwohl die zulässige Wicklungsübertemperatur nicht überschritten werden darf, wird man mit Rücksicht auf eine gute Materialausnutzung bestrebt sein, diese Grenzwerte annähernd zu erreichen.

Zur Feststellung der Erwärmung werden verschiedene Methoden angewendet. Durch Anbringen von Temperaturfühlern (temperaturabhängige Halbleiterbauelemente für den Temperaturbereich von $-55^{\circ}C \dots 150^{\circ}C$) an thermisch kritischen Stellen, ist eine Temperaturüberwachung grundsätzlich möglich. Temperaturfühler werden meist nur für Sondermotoren verwendet und weniger für Motoren der Normbaureihe.

Das Widerstandsverfahren zur Messung der Wicklungstemperatur ist von grösster praktischer Bedeutung und beruht auf der Tatsache, dass Kupfer als übliches Leitermaterial seinen ohm'schen Widerstand um etwa 0.4% pro Grad Celsius ändert.

Im Zuge der energieoptimalen Auslegung von elektrischen Antrieben mit möglichst genauer Anpassung des Drehzahl-, Drehmoment- oder Kraftverlaufes an die Stell- und Bewegungsvorgänge des technischen Prozesses und möglichst optimaler thermischer Ausnutzung, ist es eine Notwendigkeit, die Erwärmungs- und Kühlvorgänge im Detail zu kennen.

In einer elektrischen Maschine entstehen während des Betriebes räumlich verteilte Verluste und damit Wärmequellen, deren Wärmeströme sich aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften auf verschiedene Wege aufteilen. Dabei können

Klasse	Höchstzulässige Dauertemperatur	Isolierstoffe
Y	90°C	Baumwolle, Naturseide, Zellwolle, Kunstseide, Polyamidfaser, Papier, Pressspan Vulkanfiber, 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 5.14: Isolierstoffklassen und höchstzulässige Dauertemperaturen

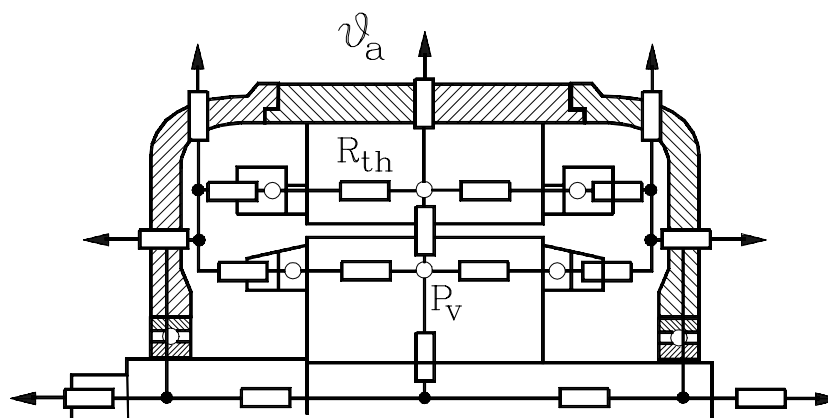


Bild 5.15: Wärmequellenetz eines Drehstrommotors

auch Kopplungen auftreten. Im allgemeinen kann man ein vermaschtes Wärmequellenetz, wie das im **Bild 5.15** gezeigte, aufbauen, das genaue Auskunft über interne Temperaturvorgänge gibt.

Man legt über die Einzelverluste des Eisens, der Wickelköpfe und Rotorstäbe etc. die örtlichen Verlustquellen fest und berechnet unter Einbeziehung der geometrischen Daten äquivalente Wärmewiderstände. Für die zeitlich veränderlichen Temperaturvorgänge der unterschiedlichen Betriebsarten müssen zusätzliche Wärmekapazitäten der einzelnen Maschinenteile erfasst werden. Leider werden in Datenblättern der Hersteller darüber nur

spärliche Angaben gemacht. Durch eine entsprechend hohe Knotenzahl des Wärmequellenetzes kann das thermische Verhalten der elektrischen Maschine im Grunde beliebig genau wiedergegeben werden.

Bisher kam man bei der vereinfachten Projektierung per Hand mit einem sogenannten Ein-Körpermodell aus. Moderne Projektierungssysteme nutzen meist ein Zwei-Körpermodell gemäss Definition des **Bildes 5.16**.

Das Zweikomponentenmodell nach **Bild 5.16** zeigt die vier Systemelemente A_{12} , A_2 , C_1 und C_2 , die

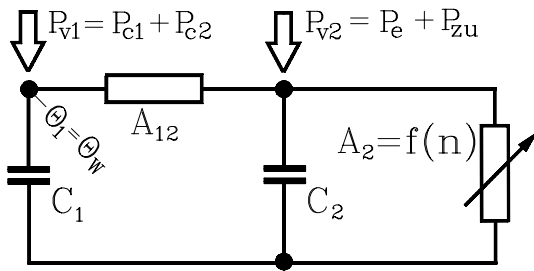


Bild 5.16: Zweikomponentenmodell mit Berücksichtigung einer drehzahlvariablen Kühlung

zwischen den stromabhängigen Verlusten P_{V1} und den drehzahlabhängigen Verlusten P_{V2} so angeordnet sind, dass im Knotenpunkt I eine Übertemperatur aus zwei Komponenten gebildet wird [39] und [40].

$$P_{V1} = C_1 \frac{d\vartheta_1}{dt} + A_{12}(\vartheta_1 - \vartheta_{11})$$

$$P_{V2} = C_2 \frac{d\vartheta_{11}}{dt} - A_{12}(\vartheta_1 - \vartheta_{11}) + A_2$$

P_{V1} = stromabhängige Verlustleistung

P_{V2} = konstante drehzahlabhängige Verlustleistung

$$P_{V2N} \approx P_{V_{LeerN}}$$

Nach theoretischen und experimentellen Untersuchungen sind bei Asynchronmotoren die Systemelemente A_{12} , C_1 und C_2 nur wenig belastungsabhängig. Demgegenüber zeigt der Wärmeleitwert A_2 bei eigenbelüfteten Motoren eine signifikante Abhängigkeit von der Drehzahl [42].

Bei Speisung mittels Frequenzumrichter, wird dieses Projektierungsmodell insofern modifiziert, als nunmehr die im **Bild 5.16** angegebenen Wärmeleitwertparameter P_{V1} und P_{V2} sowie der für die Wärmeabgabe massgebliche Parameter A_2 frequenz-, bzw. drehzahlabhängig sind.

Die über die Wicklung gemittelten Übertemperaturen (gleichermassen kann die Berechnung mit entsprechend anderen thermischen Kennwerten für spezielle Messpunkte, z.B. Heiss-Stellen, vorgenommen werden) ergeben sich aus dem Differentialgleichungssystem, wenn die Systemelemente für die jeweilige Maschine bekannt sind. Letztere wiederum lassen sich aus dem Erwärmungslauf bei Nennbelastung bestimmen.

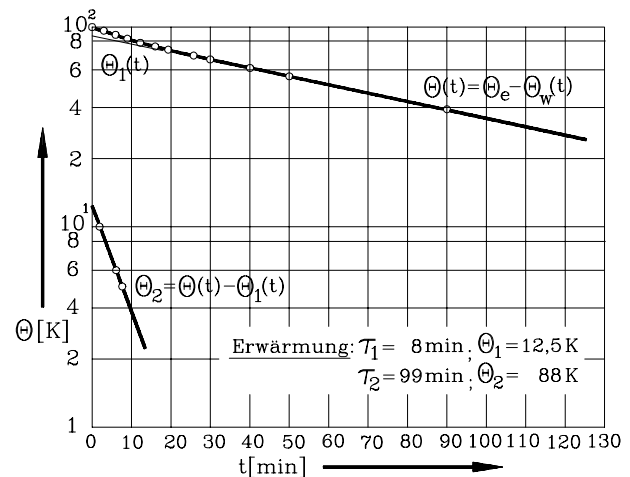


Bild 5.17: Zur Bestimmung der Modellparameter aus Temperaturverläufen des Motors

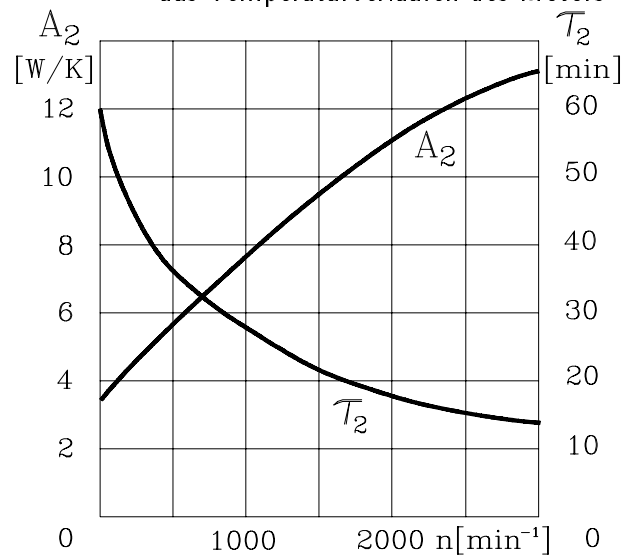


Bild 5.18: Drehzahlabhängigkeit des Modellparameters A_2 und der Zeitkonstante τ_2

Im **Bild 5.17** sind die an einem VEM-Niederspannungs-Asynchronmotor der Reihe KPR gemessenen Temperaturverläufe wiedergegeben. Aus diesen Verläufen lassen sich die Modellparameter bestimmen. Die angegebene Bestimmungsmethode hat allgemeingültigen Charakter, das heisst, sie lässt sich universell für alle Wicklungen elektrischer Maschinen nach Auswertung des Erwärmungsverlaufes anwenden. Damit ist gewährleistet, dass gegenüber dem Einkörpermodell die reaktionsschnellere Erwärmungskomponente, die massgebend für das Auftreten von Spitzenwerten der Temperatur ist, erfasst wird. Es hängt vor allem von der Art der ausgeführten Maschine und der betrachteten Wicklung ab, welchen Einfluss die reaktionsschnelle

und die trägere Erwärmungskomponente auf den Erwärmungsverlauf haben.

Der Modellparameter A_2 ist belüftungs- und damit drehzahlabhängig. In **Bild 5.18** ist ein dafür typischer Verlauf wiedergegeben worden. Auch die thermische Zeitkonstante T_2 ist als von der Belüftung abhängig zu sehen. Die in das Modell einzuspeisende Verlustleistung P_{V2} enthält die frequenzabhängige Eisenverlustleistung P_e , die aber über die Umrichtersteuerung auch vom Maschinenfluss Ψ abhängig ist.

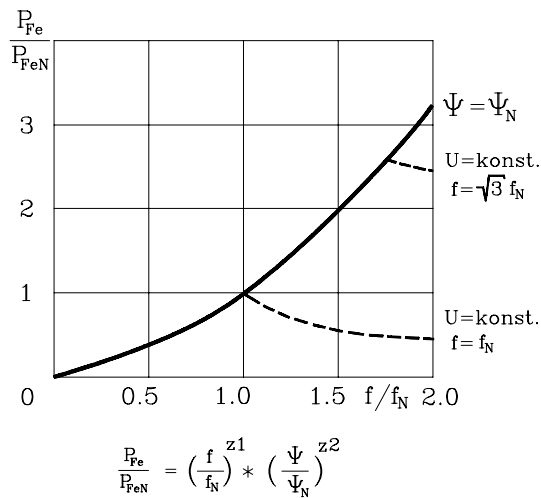


Bild 5.19: Abhängigkeit der Eisenverluste P_{Fe} von der Frequenz

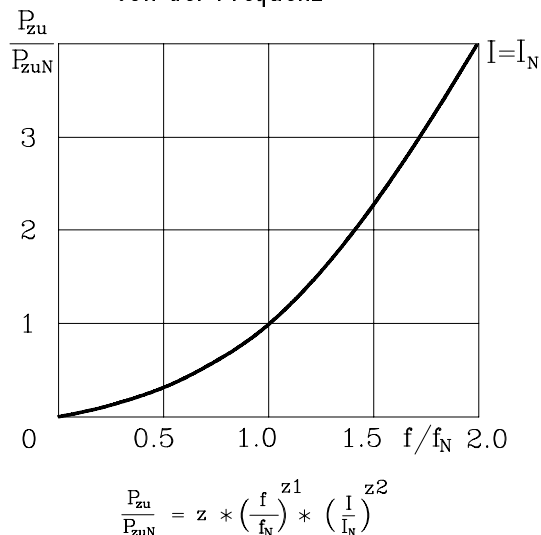


Bild 5.20: Frequenzabhängigkeit der Zusatzverluste

Dabei sind die vom Umrichter gesteuerten Frequenz-Spannungs Verhältnisse zu beachten: **Bild 5.19** zeigt die Abhängigkeit der Eisenverluste

und **Bild 5.20** die Abhängigkeit der Zusatzverluste von der Frequenz.

Wie kompliziert die Verlustverhältnisse von der Umrichterregie hinsichtlich Spannung und Frequenz sind, soll durch die Abhängigkeit der Verlustfaktoren (**Bild 5.21**) illustriert werden.

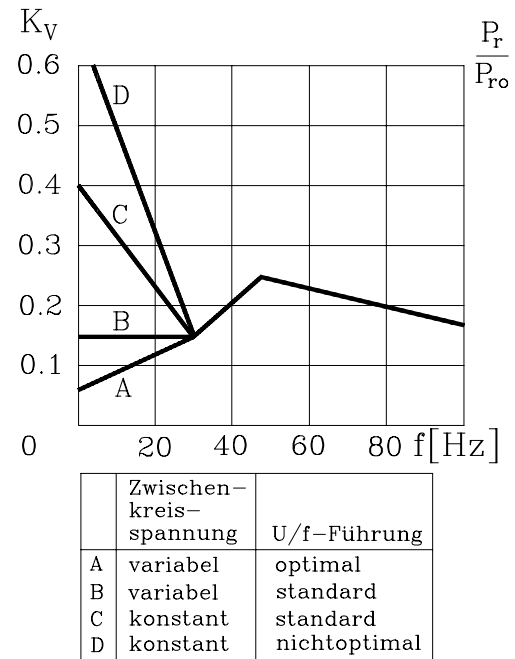


Bild 5.21: Eisenverlustfaktor in Abhängigkeit von der Umrichterführung

Zu berücksichtigen sind weiterhin die Reibungsverluste, die in bekannter Weise drehzahlabhängig sind (**Bild 5.22**).

Für eine Modell-Verfeinerung ist zu beachten, dass alle Parameter für jeden Motortyp exakt bestimmt und garantiert werden müssen.

Das im **Bild 5.23** gezeigte reduzierte Wärmequellenetz, ein sogenanntes Dreikörper-Temperatur-Simulationsmodell [17], garantiert bei richtiger Wahl der Modellparameter Temperaturverläufe, die innerhalb sehr hoher Genauigkeitsforderungen liegen.

Das Modell zur Simulation der auftretenden Verluste gemäss **Bild 5.24**, muss die in Wärme umgesetzten Verlustleistungen der am Netz betriebenen Maschine dem Temperatur-Simulationsmodell als Eingangsgrößen zur Verfügung stellen. Die Ver-

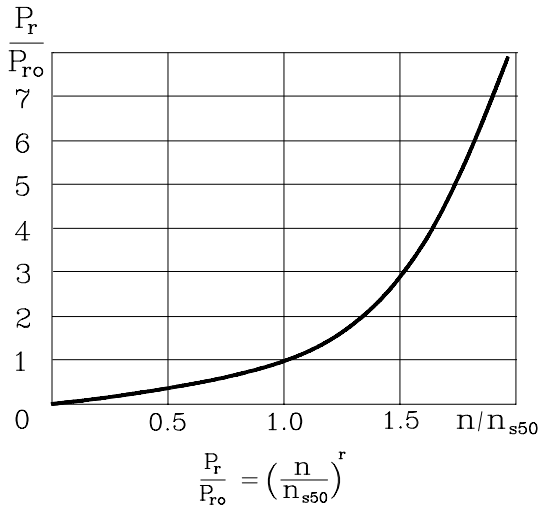


Bild 5.22: Reibungsabhängigkeit von der Drehzahl

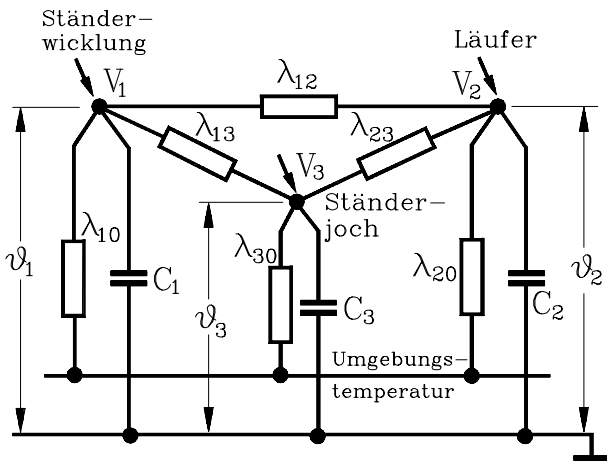


Bild 5.23: Dreikörper-Temperatur-Simulationsmodell

lustleistungen werden mit Hilfe der Beziehungen

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

U_h = Spannung die das Hauptfeld erzeugt

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

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

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

k_{2U} = Zusatzverluste durch Flusspulsation

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

$$V_1 = P_{V1}$$

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

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

mit k_{3I} = Faktor für stromabhängige Zusatzverluste

dem Differentialgleichungssystem des Temperatur-Simulationsmodelles $\lambda \cdot \vartheta = \mathbf{V}$ mit

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

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

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 5.25 beweisen die hohe Güte des vorgestellten Modelles für die praktische Berechnung von Motortemperaturen.

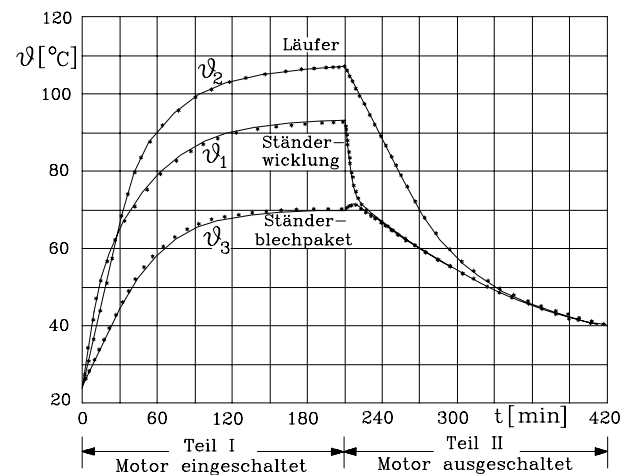


Bild 5.25: Gemessene (·····) und berechnete (—) Temperaturverläufe

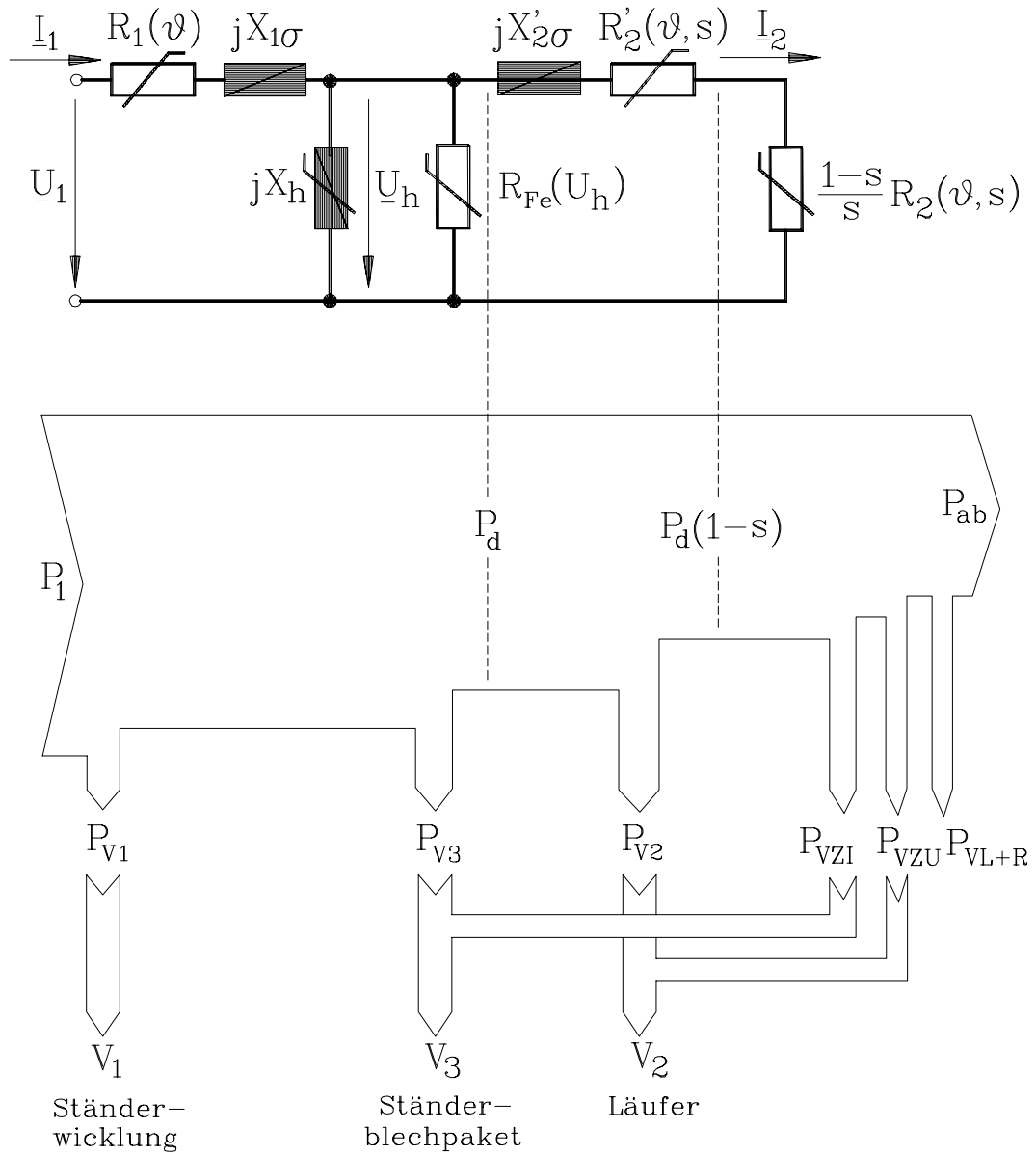


Bild 5.24: Verlustleistungs-Simulationsmodell

6 **Energiesparen bei Antriebssystemen**

Grundsätzliches:

- **Beim Energiesparen sollten Verbesserungen in der Reihenfolge:**
 - die Antriebsleistung bedarfsabhängig steuern,
 - die Antriebsnennleistung dem Bedarf anpassen,
 - die Wirkungsgrade der Komponenten erhöhen,
 - den Arbeitsprozess energetisch optimieren vorgenommen werden.
- **Im stationären Betrieb sind die Verluste, im instationären Betrieb der Energieverbrauch zu minimieren.**
- **Die Wirkungsgrade der Motoren sind art-, grössen- und lastabhängig.**
- **Im instationären Betrieb können beim Anlauf zusätzliche Verluste auftreten, welche durch Umrichterspeisung zu vermeiden sind.**
- **Energierückgewinnung ist nur mit Umrichterspeisung realisierbar.**

- c) Verminderung des Energieverbrauchs des Antriebssystems durch eine bedarfsabhängige Steuerung des Antriebssystems, d.h. durch bedarfsentsprechende Anpassung oder Zu- und Abschalten der Leistung, des Drehmomentes oder der Drehzahl.
- d) Minimierung des Energieverbrauchs im instationären Betrieb, d.h. Nutzung der Bremsenergie, Minimierung der Anlaufverluste, optimale Anpassung des Motors an die Arbeitsmaschine, Energieoptimierung des Betriebs.
- e) Weiterverwendung der Verlustenergie des Antriebs und des Arbeitsprozesses.

Jede dieser Massnahmen ist in ihrer Wirkung begrenzt und mit zusätzlichen Kosten und Aufwendungen verbunden.

Bezüglich der Auswirkung auf den Energieverbrauch ist die energieoptimale Steuerung, d.h. die Anpassung des Antriebs an den Bedarf und die Minimierung der Leerlaufverluste am wirkungsvollsten und i.a. auch am einfachsten zu verwirklichen.

Typische Beispiele dafür sind die Raumbelüftung, die Kühlung und der Massentransport, bei denen schon durch bedarfsabhängiges Ein- und Ausschalten oder durch Antriebe mit zwei Drehzahlstufen sehr grosse Energiemengen gespart werden können.

Der Verbesserung der Wirkungsgrade der Prozesskette des Antriebssystems sind von der Physik her Grenzen gesetzt. Hier ist vor allem darauf zu achten, dass das Element mit dem niedrigsten Wirkungsgrad zuerst verbessert werden muss.

Die Energierückgewinnung bei instationären Vorgängen erfordert i.a. einen relativ grossen Aufwand. Sie ist i.a. auch noch mit zusätzlichen Verlusten, z.B. durch die Umrichterspeisung, verbunden.

6.1 **Allgemeines Vorgehen**

Energiesparen bei Antriebssystemen kann erfolgen durch:

- a) Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades η_G des Antriebssystems,

$$\eta_G = \eta_{st} \cdot \eta_M \cdot \eta_{Gtr} \cdot \eta_A$$

d.h. durch Verbesserung der Einzelwirkungsgrade des Stellers (η_{st}), des Motors (η_M), des Getriebes (η_{Gtr}) und der Arbeitsmaschine (η_A), bzw. durch Verminderung der entsprechenden Verluste.

- b) Verminderung des Energieverbrauchs der Arbeitsmaschine durch Minimierung der Last- und Leerlaufverluste des Arbeitsprozesses.

6.2 Energiesparen bei der Arbeitsmaschine und beim Arbeitsprozess

Im einzelnen bestehen die folgenden Eingriffsmöglichkeiten und Lösungen zum Energiesparen:

a) Verbesserung der Konstruktion:

Minimieren der Lager-, Lufttransport- und Reibungsverluste. Verminderung der Strömungsverluste beim Massentransport durch Vergrössern der Strömungsquerschnitte usw.

Die Strömungswiderstände eines Prozesses bestimmen in sehr starkem Masse den Energie- und Leistungsbedarf. Durch Vermeidung turbulenter Strömungsverhältnisse in den Rohren, d.h., vor allem durch die Wahl genügend grosser Rohrquerschnitte, so, dass die Strömung laminar wird, können die Verluste und damit der Energiebedarf eines Massentransportsystems gesenkt werden.

b) Verbesserung des Arbeitsprozesses

Minimieren der zu beschleunigenden Gewichte und Schwungmassen.

Verbesserung der Betriebsführung, Regelung und Steuerung bei Massentransportsystemen, z.B. bei Pumpen oder Ventilatoren. Ersatz der Drossel- oder Bypassregelung durch Drehzahlregelung (vgl. **Bild 6.1**). Anpassung der Arbeitsgeschwindigkeit oder der Drehzahl an den Bedarf. Bedarfsabhängige Steuerung durch Ein- und Ausschalten.

Abhängig von den Anforderungen an die Steuerung oder Regelung, lassen sich mit der heutigen Technik verschiedene Lösungsmöglichkeiten verwirklichen:

- Für kontinuierliche Drehzahlregelung können Asynchronmaschinen mit Umrichterspeisung eingesetzt werden.
- Für stufige Drehzahleinstellung können polumschaltbare Asynchronmaschinen eingesetzt werden.

Die Steuerung der Drehzahl bietet auch noch weitere Vorteile: sie vermindert den Verschleiss und die Anlagenbelastung.

6.3 Energiesparen beim Motor

Abhängigkeit der Verluste

Die Verluste in den Elektromotoren bestehen aus:

- den **Stromwärmeverlusten** $V_{cu} (\doteq R I^2)$ in den Wicklungen, welche dem Quadrat der Leistung P proportional sind: $V_{cu} \sim P^2$,
- den **Ummagnetisierungs- und den Wirbelstromverlusten** V_{fe} in den Blechpaketen (Eisen) oder in den Permanentmagneten, welche näherungsweise dem Quadrat der Spannung U und der Frequenz f proportional sind: $V_{fe} \sim U^2 \cdot f^2$,
- den **Reibungs- und Ventilationsverlusten** V_R in den Lagern und im Kühlkreislauf.
- den sog. **Streufeldverlusten** V_{zu} in elektrisch leitenden Teilen (Rotor, Gehäuse...), hervorgerufen durch Oberfelder und durch Wirbelströme, welche ebenfalls dem Quadrat der Leistung P proportional sind: $V_{zu} \sim P^2$,

Der Wirkungsgrad η , bzw. die Verluste einer elektrischen Maschine, hängen von folgenden Grössen ab:

- 1.) Belastung, bzw. Auslastung des Motors
- 2.) Grösse, Leistung und Drehzahl des Motors
- 3.) Art und Speisung des Motors
- 4.) Auslegung des Motors

Zu 1.) Belastung, bzw. Auslastung des Motors:

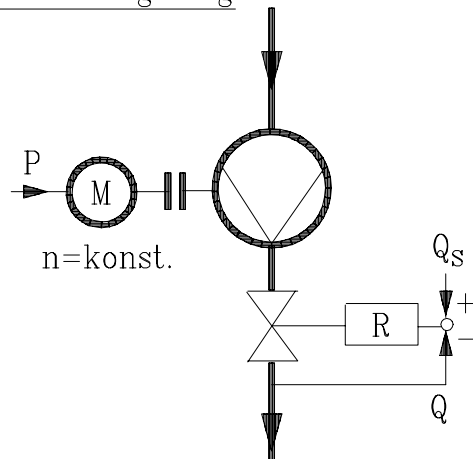
Die Gesamtverluste $V_{total} = V_{cu} + V_{fe} + V_R + V_{zu}$ sind also lastabhängig, d.h. die auf die abgegebene Leistung P bezogenen Verluste V_{total}/P haben wegen der Lastabhängigkeit der Stromwärme- und der Zusatzverluste bei einer bestimmten Belastung P_{opt} ein Minimum. In diesem optimalen Arbeitspunkt, welcher nicht der Nennleistung entsprechen muss, sind die Lastverluste $V_{last} = V_{cu} + V_{zu}$ und die Leerlaufverluste $V_{leer} = V_{fe} + V_R$ gleich gross (vgl. **Bild 6.2**).

Bei dieser Belastung hat der Wirkungsgrad η :

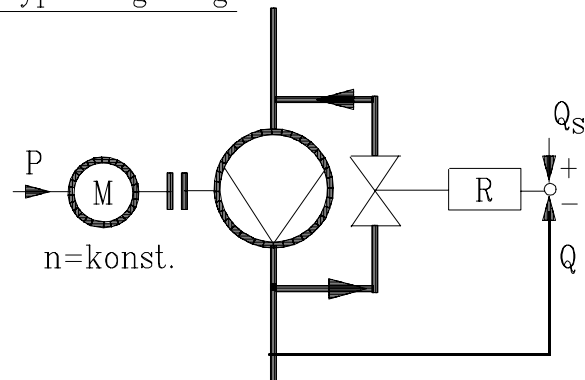
$$\eta = \frac{P}{P + V_{total}} = \frac{1}{1 + V_{total}/P}$$

einen Höchstwert.

Drosselregelung:



Bypassregelung:



Drehzahlregelung:

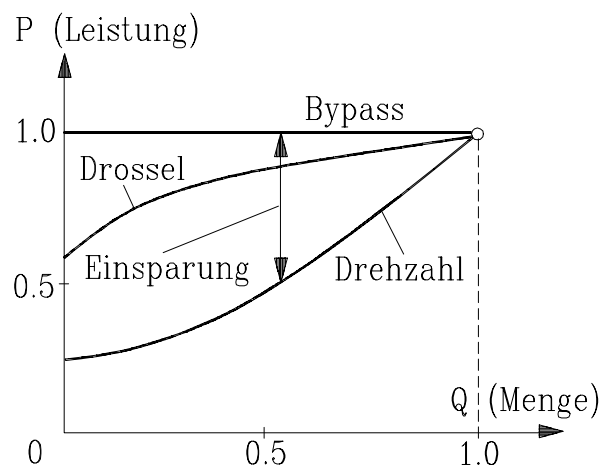
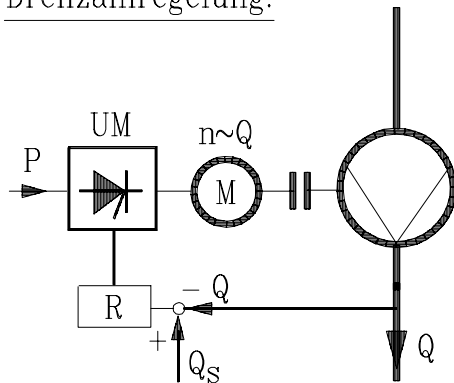


Bild 6.1: Verbesserung des Arbeitsprozesses bei der Mengenflussregelung

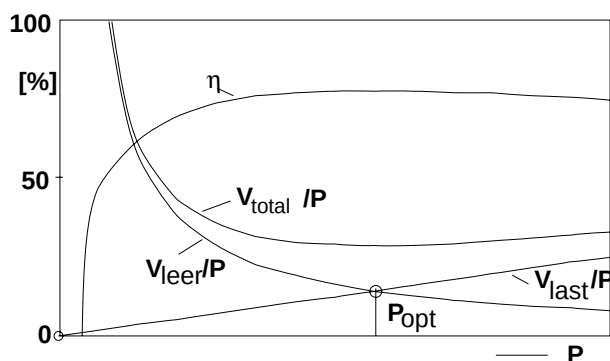


Bild 6.2: Lastabhängigkeit des Wirkungsgrades und der relativen Verluste

Die Lage dieses Maximums hängt von der Grösse der Last- und der Leerlaufverluste bei Nennlast ab. Sind die Leerlaufverluste bei Nennlast kleiner als die Lastverluste, so hat der Motor im Teillastbe-

trieb den grössten Wirkungsgrad. Ein für Nennlastbetrieb optimierter Motor hat dann im Teillastbetrieb einen schlechteren Wirkungsgrad.

Diese Überlegungen gelten für alle Maschinenarten.

Beim Vergleich eines Norm - Asynchronmotors mit einem "High-Efficiency"- Asynchronmotor, deren Einzelverluste in der **Tabelle 6.1** zusammengestellt sind, zeigt sich diese Tendenz in den Wirkungsgradverläufen sehr deutlich (vgl. **Bild 6.3**). Der "High-Efficiency" Motor hat sehr kleine Leerlaufverluste und dementsprechend im Teillastbetrieb einen höheren Wirkungsgrad, eine Eigenschaft, welche ihn für den Einsatz in überwiegend unterbelasteten Antrieben besonders geeignet erscheinen lässt.

(kW)	Norm-ASM Motor:	High-Efficiency ASM-Motor:
I^2R -Statorverluste	1,32	0,91
Eisenverluste	0,72	0,18
I^2R -Rotorverluste	0,64	0,67
Reibungs- und Ventilationsverluste	0,37	0,28
Streuverluste	0,85	0,23
Gesamtverluste	3,90	2,27
Wirkungsgrad η	0,90	0,94

Tabelle 6.1: Vergleich von Norm- und High-Efficiency-Motoren mit einer Nennleistung von 37 kW

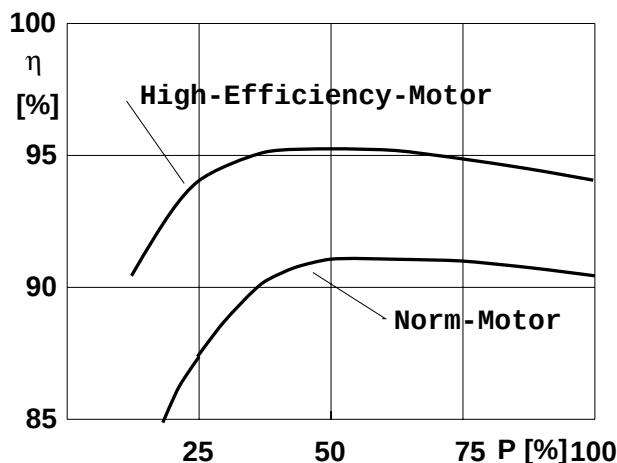


Bild 6.3: Lastabhängigkeit des Wirkungsgrades von Asynchronmaschinen verschiedener Auslegung gemäss Tabelle 6.1 mit einer Nennleistung von 37 kW

Zu 2.) Grösse, Leistung und Drehzahl des Motors

Nennleistung und **Drehzahl** beeinflussen sehr stark den Wirkungsgrad. Aufgrund der Wachstumsgesetze nehmen bei einer linearen Vergrösserung der Abmessungen a die Verluste quadratisch, das Drehmoment, bzw. die Leistung bei gegebener Drehzahl jedoch mit der dritten Potenz zu. Damit nehmen die relativen Verluste mit zunehmender Leistung ab (vgl. Bild 6.4). Der Wirkungsgrad steigt daher mit zunehmender Leistung.

Da die Grösse und die Verluste einer elektrischen Maschine durch das Drehmoment bestimmt wer-

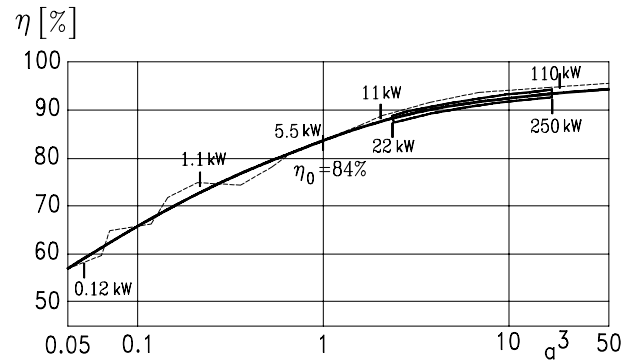


Bild 6.4: Baugrössenabhängigkeit des Wirkungsgrades von Asynchronmaschinen

den, haben schnellaufende Maschinen einen besseren Wirkungsgrad als langsamlaufende.

Zu 3.) Art und Speisung des Motors:

Die **Motorart** bestimmt sehr stark den Wirkungsgrad. Synchronmaschinen erreichen die besten Wirkungsgrade (vgl. Bild 6.5).

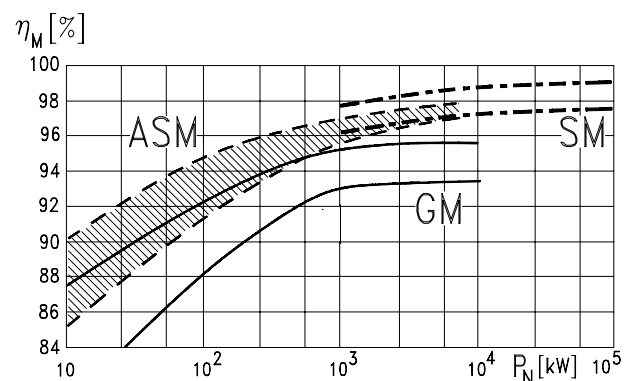


Bild 6.5: Wirkungsgrade verschiedener elektrischer Antriebe

Einphasenasynchronmotoren und Spaltpolmotoren haben i.a. sehr schlechte Wirkungsgrade (vgl. Bilder 6.6 und 6.7). Durch die Verwendung von Permanentmagneten kann der Wirkungsgrad von Kleinmotoren verbessert werden. Damit wird der Aufwand für die Felderregung vermindert. Drehfeldmaschinen mit Permanentmagneten müssen aber entweder mit einer Käfigwicklung für den Hochlauf ausgerüstet sein, oder über einen Umrichter gespeist werden.

Bei der Speisung eines Asynchronmotors mit unsymmetrischen oder nichtsinusförmigen Spannun-

gen (bei Umrichterspeisung), treten im Motor zusätzliche Verluste, abhängig von der Grösse der Abweichungen, auf. Erfahrungsgemäss muss bei Umrichterspeisung die Ausnutzung, d.h. die Nennleistung, um 25 %, bei einer Spannungsunsymmetrie von 3 % um 10 % vermindert werden, damit die Erwärmung gleich bleibt.

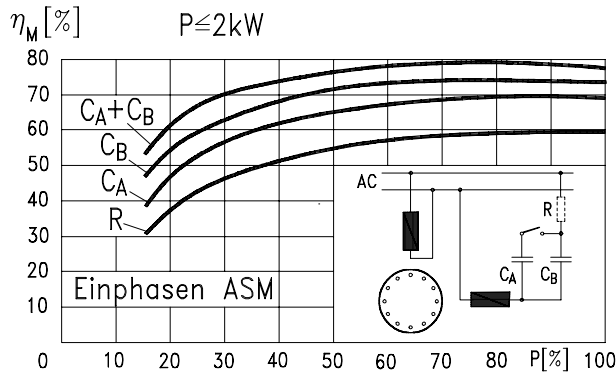


Bild 6.6: Wirkungsgrade verschiedener Einphasen-Kondensator-Asynchronmaschinen

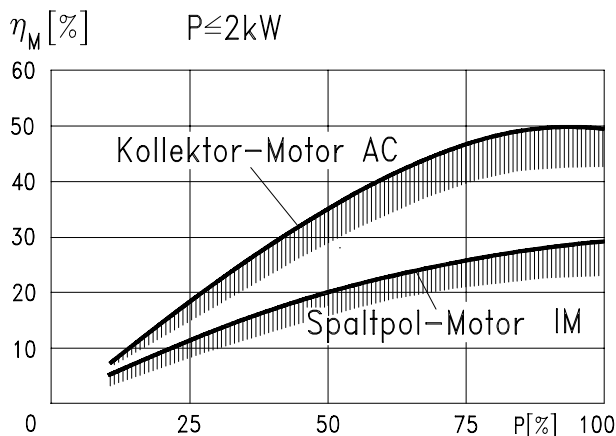


Bild 6.7: Wirkungsgrad kleiner Einphasenmotoren

Zu 4.) Auslegung des Motors:

Die **Verluste der elektrischen Maschinen** können vermindert werden durch:

a) eine **Verkleinerung der Verluste** als solche, d.h. durch eine

- **Verkleinerung der elektrischen Wicklungswiderstände**, d.h. bessere elektrische Leitfähigkeit, bessere Kühlung und grössere Nutquerschnitte.
- **Verminderung der magnetischen Belastung**

des Eisens und damit des Erregerbedarfes und der Eisenverluste, d.h. durch eine Vergrösserung der Eisenquerschnitte.

- **Verminderung der Eisenverluste**, d.h. durch den Einsatz verlustarmer, dünner Bleche.
- **Verminderung der Streufeldverluste**, d.h. durch eine bessere Blechpaketisolation, durch eine Nachbehandlung der Rotoren von Asynchronmaschinen und andere fabrikatorische Massnahmen, zur Verminderung der elektrisch leitenden Verbindungen zwischen den Blechen und zwischen der Käfigwicklung im Rotor.

b) durch eine **Verschiebung der Verlustaufteilung** hin zum Minimum, d.h. durch eine

- **Veränderung der Ausnutzung** des Eisen und der Wicklungen, gekennzeichnet durch die Luftspaltinduktion B und durch den Strombelag A , bzw. durch die elektrische Wicklungsspannung und den Strom bei gleicher Ausnutzung.
- **Verbesserung der Ausnutzung** der Maschine, z.B. durch eine Vergrösserung der Induktion B , des Strombelages A und/oder der Speisefrequenz f_s .

Während die unter a) aufgeführten Massnahmen die charakteristischen Eigenschaften einer elektrischen Maschine, wie z.B. den Anlaufstrom, das Anlaufmoment, das Kippmoment und den Leistungsfaktor nicht wesentlich beeinflussen, kann eine Veränderung der Ausnutzung, d.h. der Induktion B und des Strombelages A die Eigenschaften einer Maschine wesentlich verändern:

- Bei einer **Vergrösserung der Induktion B** :
 - werden grösser:** Anlaufstrom, Anlaufmoment, Kippmoment, Eisenverluste
 - werden kleiner:** Leistungsfaktor, Wicklungsverluste
- Bei einer **Vergrösserung des Strombelages A** :
 - werden grösser:** Leistungsfaktor
 - werden kleiner:** Anlaufstrom, Anlaufmoment, Kippmoment, Eisenverluste

bei gleicher Ausnutzung

Da die Eisenverluste i.a. kleiner als die Wicklungsverluste sind, steigt der Wirkungsgrad bei einer Vergrösserung der Induktion B , bzw. der elektri-

schen Spannung bei gleicher Ausnutzung. Dagegen nimmt der Leistungsfaktor ab und der Anlaufstrom zu, wie die **Tabelle 6.2** zeigt.

El. Spannung	380 V	420 V
Wirkungsgrad	0.837	0.853
Leistungsfaktor	0.84	0.78
Anlaufstrom	94 A	103 A
Nennschlupf	4.6 %	3.5 %
Erwärmung	73 °C	66 °C

Tabelle 6.2: Abhängigkeit der Verluste einer 7.5 kW - Asynchronmaschine von der Betriebsspannung

Hält man die charakteristischen Kenngrössen einer elektrischen Maschine annähernd konstant, so ist jede Verlustverminderung nur durch einen zusätzlichen Material- oder Fabrikationsaufwand zu erreichen und verursacht damit vermehrte Kosten. Man erhält dann einen sogenannten "High-Efficiency-Motor", welcher im Vergleich zu einem Normmotor, bei gleichen Rotorabmessungen, einen wesentlich besseren Wirkungsgrad (vgl. **Tabelle 6.1**), aber auch einen höheren Materialbedarf und damit auch höhere Kosten hat.

Der Vergleich in der **Tabelle 6.1** zeigt eindeutig, dass die "High-Efficiency" Maschine suboptimal ausgelegt ist, da bei optimaler Auslegung die minimalen Verluste dann erreicht werden, wenn die Eisen- und Wicklungsverluste gleich gross sind. Durch eine Vergrösserung der Induktion, bzw. der Spannung und der Frequenz, könnte also die Leistung und damit auch der Wirkungsgrad der High-Efficiency-Maschine noch weiter verbessert werden, wobei dann allerdings mit einer Vergrösserung des Anlaufstromes und des Anlauf- und Kippmomentes gerechnet werden muss.

Minimierung der Motorverluste:

Für die Minimierung der Verluste bestehen die folgenden Möglichkeiten:

- 1.) Es wird eine geeignete Motorenart mit geringeren Verlusten eingesetzt.
- 2.) Die Grösse des Motors wird so festgelegt, dass die Verlustenergie im Betrieb, beobachtet über eine längere Betriebsperiode, möglichst klein wird.

- 3.) Anstelle eines Normmotors wird ein "High-Efficiency-Motor" eingesetzt.

Zu 1.) Einsatz einer Motorenart mit kleineren Verlusten:

Bei der Auswahl einer Motorenart sind die Anlauf- und die Betriebsverhältnisse und die Investitionskosten zu berücksichtigen. So kann ein Asynchronmotor nur dann durch einen Synchronmotor ersetzt werden, wenn deren Anlauf sichergestellt werden kann. Auch der Ersatz einer Gleichstrommaschine durch eine umrichter gespeiste Asynchronmaschine oder Synchronmaschine ist nur dann zu empfehlen, wenn an die Welligkeit des Drehmomentes und an die Regelfähigkeit keine besonderen Anforderungen gestellt werden.

Zu 2.) Auswahl der Motorgrösse:

Die Auswahl der Motorgrösse, bzw. die Festlegung der Nennleistung kann so erfolgen, dass der Motor im Betrieb:

- mit der Nennleistung
- mit Überlast
- mit Unterlast

betrieben wird.

Eine dauernde Überlastung ist nur dann zulässig, wenn dabei die Wicklungstemperatur zulässige Höchstwerte (vgl. **Kapitel 5**) nicht übersteigt. Sie ist aber auch energetisch gesehen nicht zu empfehlen, da der Wirkungsgrad bei Überlastung seinen Maximalwert schon überschritten hat, wie es z.B. das **Bild 6.2** zeigt.

Bei einer dauernden Unterbelastung (Überdimensionierung) sind im Vergleich zur Nennbelastung.

- die Leerlaufverluste grösser, da eine grössere Maschine eingesetzt wird,
- die Lastverluste jedoch kleiner, da die Verluste quadratisch von der Leistung abhängen

Eine genaue Analyse der Abhängigkeit der Verluste von der Motorgrösse zeigt, dass bei kleinen Leistungen ($\leq 50 \text{ kW}$) eine Überdimensionierung wegen des starken Abfalls des Wirkungsgrades eine Verminderung der Verluste ergibt, solange die Belastung grösser als 50 % ist (vgl. **Kapitel 7**).

Zu 3.) Einsatz von "High-Efficiency" Motoren:

Grundsätzlich kann jeder Normmotor durch einen "High-Efficiency" Motor ersetzt werden, da i.a. beide Ausführungen dieselbe Achshöhe haben.

"High-Efficiency" Motoren haben kleinere Verluste, niedrigere Wicklungs- und Lagertemperaturen und damit eine höhere Lebensdauer. Sie arbeiten mit einem kleineren Nennschlupf, d.h. mit höheren Drehzahlen.

"High-Efficiency" Motoren enthalten mehr Material und werden sorgfältiger hergestellt. Die Mehrkosten liegen in der Größenordnung von $10 \div 25 \%$.

Abhängig von der Betriebsart können diese Mehrkosten durch die Senkung der Energiekosten mehr oder weniger schnell amortisiert werden. Durch eine Wirtschaftlichkeitsrechnung (vgl. **Kap.10**), können dafür Entscheidungsgrundlagen erstellt werden. Diese Rechnungen zeigen, dass schon bei einer Benutzungsdauer von 4000 h/Jahr die Mehrkosten eines "High-Efficiency" - Asynchronmotors innerhalb von $2 \div 3$ Jahren durch die Energieeinsparungen kompensiert werden.

6.4 **Energiesparen durch die Leistungselektronik**

Eine Umrichterspeisung kann sich positiv und negativ auf den Energieverbrauch eines Antriebs auswirken:

Energiesparend wirken Umrichterspeisungen nur dann, wenn

- durch eine angepasste Frequenz- und Spannungssteuerung der Motor mit minimalem Schlupf und minimalen inneren Verlusten arbeitet,
- der Prozess der Arbeitsmaschine verbessert werden kann, z.B. durch eine Anpassung der Drehzahl an den Bedarf.

Verlusterhöhend und Wirkungsgradverschlechternd wirken

- Phasenanschnittsteuerungen (Drehstromsteller) zur Speisung von Asynchronmaschinen

(Schlupfregelung via Spannung).

- Umrichtersteuerung mit Zwangskommutierung und hohem Oberschwingungsgehalt in der Ausgangsspannung.

Die Verlustsituation kann auch durch äussere Einwirkungen im negativen Sinne beeinflusst werden, so z.B. durch:

- Unsymmetrie im speisenden Drehspannungssystem: Das Gegenfeld erzeugt zusätzliche Rotorverluste,
- Speisung mit verzerrten, nichtsinusförmigen Spannungen.

Beispiel: Ventilatorantrieb

Für einen Ventilatorantrieb stehen ein Asynchronmotor mit Drehstromstellerspeisung, bzw. mit Frequenzumrichter und eine Synchronmaschine mit Frequenzumrichterspeisung zur Diskussion. **Bild 6.8** zeigt die Verlustkennlinien $P_V(n)$ dieser Lösungen im Vergleich. Es zeigt sich, dass der frequenzgesteuerte Synchronmotor die kleinsten Verluste hat.

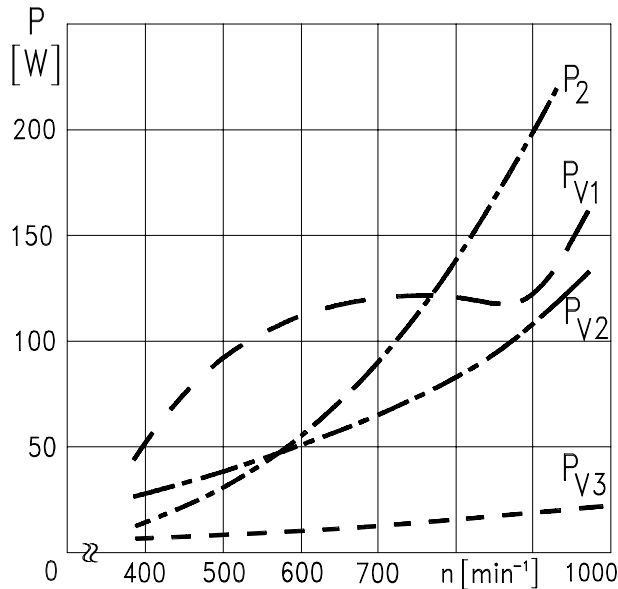
Beispiel: Umwälzpumpen für Heizungen

In einer Zentralheizung sorgt eine Umwälzpumpe dafür, dass die Heizkörper genügend Warmwasser erhalten. Dabei wird üblicherweise die Wassermenge am Heizkörper durch Thermostatventile eingestellt, d.h. die Pumpenanlage arbeitet mit Drosselsteuerung und verbraucht dementsprechend dauernd die Nennleistung, wenn sie direkt am Netz angeschlossen ist und nur eine Polpaarzahl (= synchrone Drehzahl) hat. Zusätzlich können an den Heizkörpern störende Pfeifgeräusche auftreten, wenn die Thermostatventile beinahe geschlossen sind und die Pumpe dennoch versucht, die volle Wassermenge durch die Heizkörper zu pressen.

Die Lösung des Problems kann erfolgen durch:

- den Einsatz pol- oder wicklungsumschaltbarer Asynchronmaschinen.
- den Einsatz umrichtergespeister Asynchronmotoren und Regelung der Drehzahl, so dass der Differenzdruck konstant gehalten wird.

Pol- oder wicklungsumschaltbare Asynchronmotoren haben einen verhältnismässig schlechten Wirkungsgrad und sind nur stufig schaltbar.



· - ·	Ventilatorleistung	$P_{2kap06.tex} = 92 \text{ W}$
- - -	Asynchronmotor phasenanschnittgesteuert	$P_{v1} = 118 \text{ W}$
- · -	Asynchronmotor frequenzgesteuert	$P_{v2} = 68 \text{ W}$
- - -	Synchronmotor frequenzgesteuert	$P_{v3} = 13 \text{ W}$

Bild 6.8: Vergleich von Ventilatorantrieben

Die geregelte Umrichterspeisung einer Asynchronmaschine oder einer Synchronmaschine mit Dauermagneterregung ist die optimale Lösung. Sie steht heute auch schon für kleine Leistungen zur Verfügung. In der Praxis wurde festgestellt, dass dabei eine Pumpe mit einer Nennleistung von 130 W im Durchschnitt nur noch eine Leistung von 60 W aufnimmt. Damit können 360 kWh/Anlage/Jahr ($= 250 \cdot 24 \cdot 60 \text{ Wh}$) eingespart werden, wenn man von 250 Heiztagen ausgeht.

6.5 Energiesparen bei instationärem dynamischen Betrieb

Im instationären Betrieb muss dem Antrieb elektrische Energie zur Beschleunigung der Schwungmassen zugeführt werden. Die Grösse dieser Energie hängt quadratisch von der Drehzahl n und linear vom Trägheitsmoment J ab:

$$E = \frac{1}{2}(2\pi n)^2 J$$

Beim Beschleunigen treten in der antreibenden Maschine mehr oder weniger grosse Verluste auf, abhängig von der Art des Antriebs und der Speisung.

Beim Abbremsen muss diese Energie den rotierenden Massen entzogen werden. Dabei kann sie:

- im Motor in Wärme umgesetzt werden,
- in einer Reibungsbremse in Wärme umgesetzt werden,
- durch Nutzbremzung dem Energiesystem zurückgegeben werden.

Beim Direktanlauf von Asynchronmaschinen und bei der Gegenfeldbremsung wird im Rotor die Energie

$$E_r = \frac{1}{2}(2\pi n)^2 J$$

durch die Rotorströme I_r in Wärme umgesetzt. Da im Stator entsprechende Ströme I_s fliessen, werden dort noch einmal Verluste der selben Grössenordnung entstehen, welche im Stator beträchtliche Erwärmungen hervorrufen können. Der Motor muss diese Belastungen aushalten, d.h. dementsprechend gross dimensioniert werden.

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

- Die Masse, bzw. das Trägheitsmoment der zu beschleunigenden Arbeitsmaschine ist so klein wie möglich zu halten,
- Zusatzverluste, welche im Motor und in der Speisung beim Beschleunigen und Bremsen auftreten können, sind zu minimieren, z.B. durch Einsatz von

1. polumschaltbaren Asynchronmaschinen,
2. umrichtergespeisten Asynchron- oder Synchronmaschinen mit drehzahlabhängiger Spannungs-Frequenzspeisung (Frequenzanlauf) und Nutzbremzung.

- Die Übersetzung $i = n_M/n_A$ der mechanischen Übertragung (Getriebe) zwischen dem Motor und der Arbeitsmaschine ist so auszuwählen, dass bei vorgegebener Anlaufzeit T_A das Nennmoment M_N und damit auch die Grösse des Motors minimal wird:

$$i_{opt} = \sqrt{J_A/J_M}$$

dabei sind: J_A das Trägheitsmoment der Arbeitsmaschine (Drehzahl n_A) und J_M das Trägheitsmoment des Motors und des Getriebes (Drehzahl n_M).

- Durch den konsequenten Einsatz der Methoden der Systemtechnik ist sicherzustellen, dass das Gesamtkonzept richtig ist, alle Komponenten optimal ausgelegt sind und dass auch der Betrieb verlustminimal abläuft.

Beispiel: Antrieb für den Hochlauf mit grossem Trägheitsmoment

An einen Antrieb, welcher z.B. eine Zentrifuge oder eine "Karde" in der Textilindustrie antreiben soll, werden die folgenden Anforderungen gestellt:

- Leistungsbedarf bei maximaler Drehzahl: 4.5 kW
- Drehzahlbereich 400 – 600 U/min
- Trägheitsmoment der Arbeitsmaschine: 415 kgm²
- Leistung proportional zur Drehzahl
- Gegenmoment-Verlauf beim Hochlauf quadratisch steigend auf 10 Nm
- Mittlere Betriebszeit pro Jahr 6000 h
- Anlaufhäufigkeit pro Tag $h_A = 4$

a) Klassisches Antriebskonzept

Der Antrieb wird direkt über ein Untersetzungsgetriebe (1400 : 600 U/min) angetrieben, wobei die Anpassung der Betriebsdrehzahl über Getriebe-Wechselräder erfolgt. Für den eingesetzten Spezial-Asynchronmotor (Sonderläufer) mit den Betriebskenngrössen

Nennleistung	P_N	:	11 kW
Anzugsmoment	M_A	:	140 Nm
Anlaufstrom	I_A	:	150 A (bei 380V)
Nennndrehzahl	n_N	:	1440 U/min
Wirkungsgrad	η	:	88 % (bei 11 kW)
	η	:	85 % (bei 4.5 kW)
	η	:	78 % (bei 3 kW)
Widerstand	R_{Ph}	:	0.84 Ω (kalt)
Trägheitsmoment	J	:	72 kgm ² (Welle)

erhält man bei einer Hochlaufzeit von:

$$t_A = \frac{J \cdot n}{9.55 \cdot M_A} = 77.5 \text{ s}$$

die folgenden Hochlauf-Verlustarbeitsanteile:

Stator-Verlustarbeit

$$A_{VSt} = 3 \cdot I_A^2 \cdot R_{Ph} \cdot t_A = 1.031 \text{ kWh}$$

Rotor-Verlustarbeit

$$A_{VRo} = \frac{J \cdot n^2}{183} = 0.2266 \text{ kWh}$$

Anlauf-Verlustarbeit

$$A_V = A_{VSt} + A_{VRo} = 1.258 \text{ kWh}$$

und damit eine jährliche Hochlauf-Verlustarbeit

$$A_{Vj} = z \cdot A_V = h_A \cdot \text{Tage} \cdot A_V = 1509 \text{ kWh}$$

b) Modernes Antriebskonzept

Es wird ein umrichter gespeister Asynchronmotor als Antrieb eingesetzt. Mit den Betriebsparametern des Antriebssystems:

Hochlaufleistung	P	:	7.5 kW
Beschleunigungs-	M_B	:	48 Nm
moment			
Nennleistung	P_N	:	4.5 kW
Anlaufstrom (bei 380 V)		:	17.5 A
Drehzahlbereich	Δn	:	1200-1800 $\frac{U}{min}$
Wirkungsgrad:			
(bei 7.5 kW)	η	:	86 %
(bei 4.5 kW)	η	:	84.5 %
(bei 3 kW)	η	:	83 %
Leistungsfaktor	$\cos \varphi_N$	:	0.86
Trägheitsmoment	J	:	46.1 kgm ²
(Welle)			

erhält man bei einer Hochlaufzeit von:

$$t_A = \frac{J \cdot n}{9.55 \cdot M_B} = 181 \text{ s}$$

eine äquivalente Motor-Verlustarbeit

$$A_V = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \eta) = 0.3852 \text{ kWh}$$

und eine jährliche Hochlauf-Verlustarbeit

$$A_{Vj} = z \cdot A_V = 462.3 \text{ kWh}$$

c) Beurteilung

Durch die Umrichterspeisung wird beim Hochlauf der grossen Schwungmasse eine Einsparung an Verlustarbeit von rund 70 % oder 1047 kWh pro Jahr erzielt. Die Belastung des Motors im Hochlauf wird begrenzt, so dass auch mit einer Erhöhung der Lebensdauer gerechnet werden kann. Dem stehen aber höhere Anlagekosten gegenüber.

Beispiel: Energiesparen bei Personen- und Lastenaufzügen

Personen- und Lastenaufzüge mit Geschwindigkeiten bis 2.0 m/s werden normalerweise durch polumschaltbare Asynchronmotoren angetrieben. Im Fahrbetrieb arbeitet der Motor mit der niedrigen Polzahl. Zum Einfahren in den Haltebereich wird auf die hohe Polzahl umgeschaltet. Zur Verbesserung des Fahrkomforts und der Haltegenauigkeit wird eine zusätzliche Schwungmasse J_z auf der Motorwelle eingesetzt (vgl. Bild 6.9).

Die **Lösung mit polumschaltbaren Motoren** ist energetisch gesehen sehr ungünstig. Der Energiebedarf ist das Mehrfache des stationären Bedarfs, da die Bewegungsenergie der rotierenden und bewegten Massen beim Beschleunigen und Bremsen im Asynchronmotor zusätzlich in Wärme umgesetzt wird. Auch im Betrieb sind die Verluste verhältnismässig gross, da der Motor so auszulegen ist, dass die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie weder ein Kipp- noch ein Sattelmoment aufweist. Dementsprechend treten im Nennbetrieb ein grosser Schlupf und relativ hohe Verluste auf. Zum Stillsetzen wird eine mechanische Bremse benötigt.

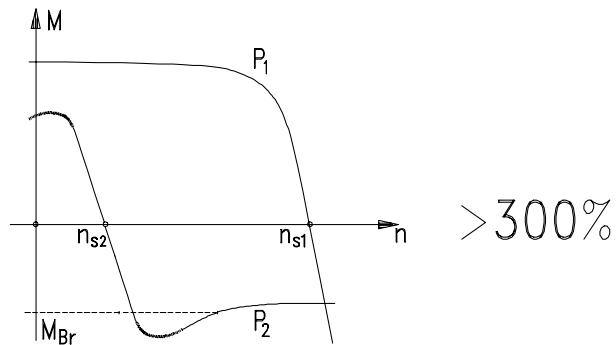
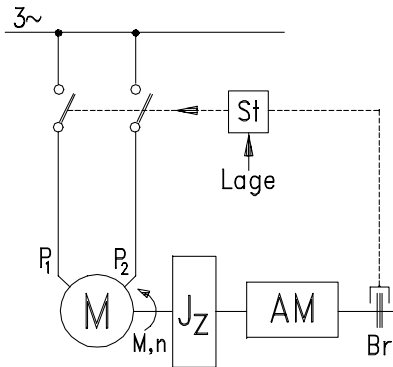
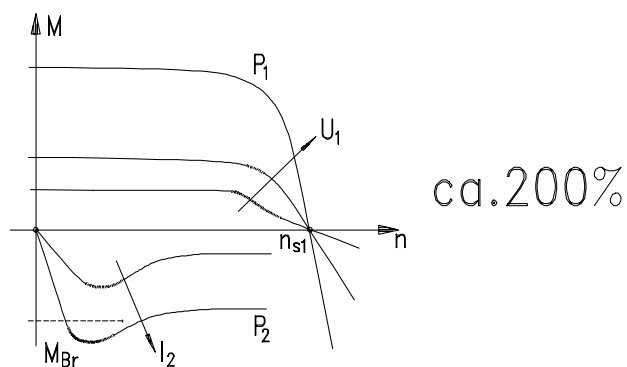
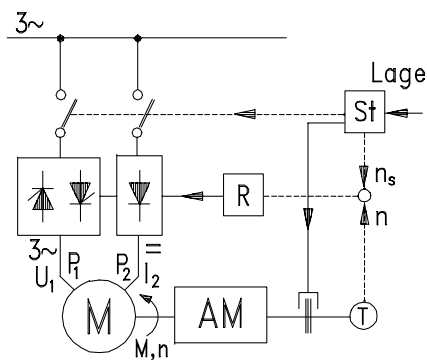
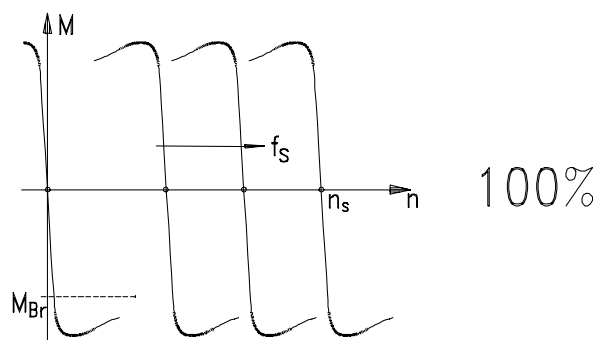
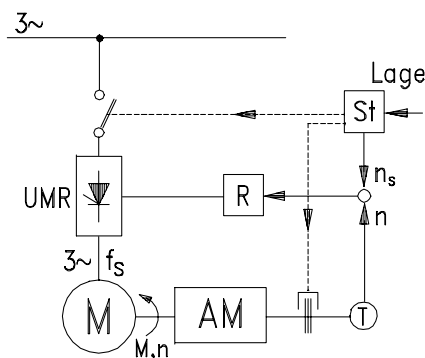
Bei der **Lösung mit Drehstromsteller und Bremsgleichrichter** können konventionelle polumschaltbare Motoren eingesetzt werden. Die Drehzahl ist regelbar. Damit kann die Zusatzschwungmasse entfallen. Die Energiesituation wird jedoch nicht wesentlich verbessert, da der Antrieb nach wie vor mit einer festen Speisefrequenz, der Netzfrequenz, betrieben wird. Der Drehstromsteller beeinflusst durch die Spannungsanschnittsteuerung nur die Motorspannung und damit das Drehmoment des Motors, nicht jedoch die Speisefrequenz und damit die synchrone Drehzahl.

Zur Erzeugung des Bremsmomentes wird die Wicklung mit der hohen Polpaarzahl P_2 mit Gleichstrom

gespeist. Die Asynchronmaschine arbeitet dann als regelbare Wirbelstrombremse.

Die **Umrichterspeisung** mit variabler Frequenz und Nutzbremmung stellt energetisch gesehen die beste Lösung dar. Hier sind nur die potentielle Energie und die Reibungsverluste zu decken. Der Energieverbrauch kann so auf ein Drittel gegenüber der konventionellen Lösung gesenkt werden. Allerdings sind bei der Auslegung Geräusch- und Ueberlastfragen zu lösen, welche unter Umständen den Einsatzbereich dieser Lösung einschränken können.

Obwohl bei dieser Lösung ein kostengünstiger Normmotor verwendet werden kann, sind die Kosten des Umrichters auch heute noch so überragend, dass diese Lösung bei Leistungen unterhalb 10 kW noch wesentlich teurer ist als die konventionelle Lösung mit polumschaltbaren Motoren.

Polumschaltbarer Motor:EnergiebedarfDrehstromsteller:Umrichterspeisung:**Bild 6.9:** Antriebssysteme für Aufzugsanlage

6.6 Checkliste zur Verbesserung der Energieverhältnisse elektrischer Antriebe

Prioritäten beim Vorgehen:

1. Betriebsdauer dem Bedarf anpassen
2. Antriebsleistung dem Bedarf anpassen
3. Motoren, Übertragungen usw. mit höheren Wirkungsgraden einsetzen
4. Arbeitsprozess energetisch verbessern

Checkliste :

A) Wie wird der Motor durch die Arbeitsmaschine und die Umgebungsbedingungen belastet ?

1. **Belastungsart:** Stationär, instationär? Betriebsart? Dauerbetrieb?
2. **Größen:** Lastmoment $M_L(n)$, Lastträgheitsmoment, Lastspiel $M_L(t)$, effektiver Leistungsbedarf, effektive Betriebszeit?
3. **Anforderungen an die Steuerung und Regelung:**
Drehzahl, Drehmoment, Mehrquadrantenbetrieb, Bremsen, Anpassung an den Betrieb?
4. **Umgebungsbedingungen:** Elektrisches Netz, Umgebungstemperatur ?

B) Wie wird der Motor mit Arbeitsmaschine gekoppelt ? Wird ein Getriebe zur Anpassung benötigt ?

1. Optimierung Getriebeübersetzung?
Anpassung an Motor?
Direktantrieb notwendig oder möglich ?
2. Getriebeart und Wirkungsgrad?

C) Welcher Motor ist einzusetzen und wie ist er auszulegen ?

1. Motorart, Steuerung, Speisung, Anlasser, Umrichter?
2. Motorauslegung (Leistung, Drehzahl, Drehmoment) und Dimensionierung überprüfen
für geforderte Betriebsart (Dauerbetrieb, Schaltbetrieb)
3. Verluste, Wirkungsgrad, Energieverbrauch?
4. Anlagekosten, Amortisation, Energiekosten?

D) Wie kann der Arbeitsprozess energetisch verbessert werden ?

1. Grösse und Notwendigkeit der zu bewegendenden trägen Massen?
2. Möglichkeiten der Energie- oder Abwärmerückgewinnung?
3. Prozessregelung oder -steuerung, Verlagerung auf die Antriebsseite?
Möglichkeit der Anwendung des Schaltbetriebes?
4. Energiebedarf im Leerlauf überprüfen.

7 Verbesserung der Ausnutzung unter- und überbelasteter Antriebe

Grundsätzliches:

- Der Wirkungsgrad elektrischer Maschinen ist abhängig von der Belastung. Er nimmt mit der Grösse des Motors zu und bei Teillast ab.
- Dem Wirkungsgradverlust beim Betrieb von leistungsmässig unterbelasteten Motoren - meist eine Folge von Sicherheitszuschlägen bei der Antriebsprojektion - kann durch gezielte schaltungstechnische Massnahmen entgegengewirkt werden.
- Basierend auf einer gewünschten Lebensdauer kann es sinnvoll sein, die zulässige Wicklungstemperatur eines Antriebsmotors zeitweise zu überschreiten, um eine bessere Ausnutzung zu erreichen.

7.1 Der Normmotor im Teillastbetrieb

Die Hersteller von Erzeugnissen des Maschinenbaus sind immer deutlicher daran interessiert, die für den Antrieb eingesetzten Motoren maximal auszunutzen, weil das einen Wettbewerbsvorteil verspricht.

Teillast eines Antriebs mit einer Arbeitsmaschine hat zwei ökonomische Aspekte:

- Ungünstige energetische Verhältnisse durch Verringerung von Wirkungsgrad und Leistungsfaktor beim Motor, aber vor allem durch die oft drastische Verringerung des Wirkungsgrades bei der angetriebenen Maschine wie Pumpe, Ventilator u.a.,
- herabgesetzte Ausnutzung von Antriebsmotor und Arbeitsmaschine, d.h. die Vergeudung von Material und Raumbedarf.

A: Energieökonomische Verhältnisse bei Teillast von Drehstrom-Normmotoren

Teillast tritt normalerweise bei einem Elektromotor dann ein, wenn es das Betriebsregime so verlangt. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Motor an seine

Höchstbelastung so genau wie möglich angepasst wurde.

Der Betrieb bei Teillast kann aber auch durch Überdimensionierung des Motors hinsichtlich der ihm gestellten Antriebsaufgabe begründet sein. Zum Beispiel verlangt eine Pumpe in ihrem Nennpunkt eine mechanische Leistung, für die der Motor wegen bestehender Einsatznormen, wegen Risikoscheu oder wegen vorhandener Sprünge in den Leistungsreihen, zu gross ausgewählt wurde. Es ist weiter möglich, dass auch die Pumpe - um bei diesem Antriebsbeispiel zu bleiben - für das Förderproblem zu gross ausgewählt wurde. Dann wirken die Teillastverhältnisse bei Pumpe und Motor, beim Motor gegebenenfalls verstärkt.

Man kann schliesslich feststellen, dass in den unterschiedlichen Wirtschaftszweigen eines Industriestaates die Normmotoren bis zu einer Leistung von etwa 100 kW hinsichtlich ihrer Belastung und der jährlichen Betriebszeit relativ schlecht ausgenutzt sind (vgl. **Tabelle 4.1**).

So zeigen sich am Beispiel der Antriebe einer Textildruckmaschine (vgl. **Tabelle 4.1**, **Bild 4.1** und **Bild 4.2**) sowohl die Unterlastung der Motoren wie auch der dadurch verursachte kleine Leistungsfaktor $\cos \varphi$, ebenso wie die Bedeutung der Beachtung des zeitlichen Verlaufs der Last. Die gewissenhafte Analyse der Maschine bietet eine Reihe von Ansatzpunkten zur Behebung der energetischen Situation.

Im folgenden sollen im Hinblick auf die für Normmotoren zur Verfügung stehende Projektierungssoftware und die damit mögliche Qualifizierung der Projektierung, die wirtschaftlichen Konsequenzen des Teillastbetriebes erläutert werden. Gleichzeitig soll damit eine Grundlage geschaffen werden für die sinnvolle Auswahl von Normmotoren nach der von IEC erst kürzlich empfohlenen neuen Betriebsart S10 (Dauerbetrieb mit variierter Last), die einigen Anwendern von Normmotoren eine höhere Ausnutzung und bessere energetische Einsatzverhältnisse verspricht.

B: Abhängigkeit des Wirkungsgrades und des Leistungsfaktors von der Belastung

Der Wirkungsgrad des Elektromotors, das Verhältnis der abgegebenen Wirkleistung P zur aufgenommenen Wirkleistung P_{auf} :

$$\eta = \frac{P}{P_{auf}} = \frac{P}{P + V_{total}}$$

ist durch einen stromabhängigen Anteil an den Gesamtverlusten V_{total} belastungsabhängig.

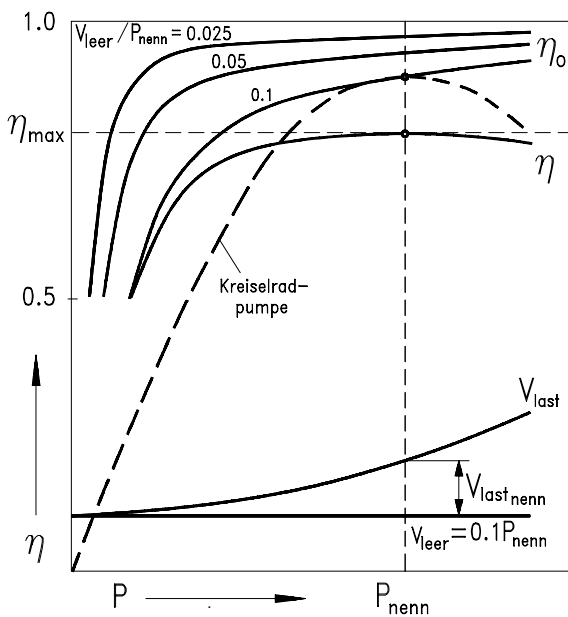


Bild 7.1: Wirkungsgradverläufe verschiedener Motoren

Es ist für die Einschätzung der bei Teillast eintretenden verschlechterten energetischen Verhältnisse vorteilhaft, einige elementare, allgemein gültige Zusammenhänge zu kennen.

In **Bild 7.1** sind für die verschiedenen Verhältnisse von Leerlaufverlusten V_{leer} , bestehend aus Eisen-, Reibungs- und Leerlaufstromverlusten zur Nennleistung P_{nenn} , für jede Motorart gültige Wirkungsgradkurven η_0 gezeichnet.

Berücksichtigt man dazu Lastverluste V_{last} , welche in guter Näherung als Stromwärmeverluste dem Quadrat der Leistung P proportional sind, $V_{last} = V_{lastnenn}(P/P_{nenn})^2$, so ergibt sich für ein gewähltes Verlustverhältnis eine Wirkungsgradkennlinie $\eta(P)$. Die Wirkungsgrade der verschiedenen Motoren werden in ihrem Verlauf $\eta(P)$ nur von den Verhältnissen zwischen Nennleistung, Leerlaufleistung und lastabhängigen Verlusten geprägt.

Allgemein gilt ausserdem, dass das Wirkungsgrad-Maximum immer bei $V_{leer} = V_{last}$ liegt, was auch in **Bild 7.1** angedeutet wurde. Dort liegt das Wirkungsgrad-Maximum im Leistungsnennpunkt.

Durch eine geeignete Auslegung des Motors kann der Punkt der Gleichheit: $V_{leer} = V_{last}$ beeinflusst werden. In Anbetracht der häufigen Teillast von Antrieben ist also die Verlegung dieses Punktes unterhalb der Nennleistung sinnvoll.

Sind jedoch die Motoren in Anbetracht der Nutzungsmöglichkeiten neuester Projektierungsmittel auf eine gute Auslastung der Motoren hin ausgelegt, so liegt das Wirkungsgrad-Maximum bei Nennleistung.

Hinsichtlich des Wirkungsgradabfalls bei Teillast müssen die Pumpen- und Ventilatorenhersteller wesentlich kritischer sein, weil ihre Erzeugnisse bei jeder Abweichung vom Nennpunkt einen merklich grösseren Wirkungsgradabfall zu verzeichnen haben. Dies demonstriert die im **Bild 7.1** eingezeichnete Wirkungsgradkennlinie einer Kreiselpumpe.

Die Verringerung des Wirkungsgrades eines Motors bei Unterlast ist also im Bereich bis 50% der Nennleistung noch relativ gering. Bedeutender ist schon der Abfall des Leistungsfaktors $\cos \varphi$, dem Verhältnis von Wirkstrom zu Scheinstrom. Wesentlich beeinflusst wird dieser Wert durch den notwendigen Magnetisierungsstrom der Asynchronmaschine.

Die wirtschaftliche Bedeutung dieses Abfalls kann man entweder am Aufwand für einen zur Kompensation der Blindleistung notwendigen Kondensator oder aber an der Kostenerhöhung im Rahmen des gültigen (und meist komplizierten) Energieverbrauchstarifs ermesen.

C: Wachstumsgesetze und Teillasteigenschaften bei Drehstrom-Normmotoren

Nach **Bild 7.2** ist der Wirkungsgrad nach den Wachstumsgesetzen von der Leistung des Motors abhängig. Das gilt sowohl für den Wert des Wirkungsgrades $\eta_{1.0}$ bei Nennlast $P_{nenn} = 1pu$, als auch für die Werte der Wirkungsgrade bei Teillast, von denen der Wert $\eta_{0.5}$ für die halbe Leistung $P_{nenn} = 0.5$ mit dargestellt wurde. Beim Einsatz eines Motors sind hinsichtlich seiner Energieökonomie zwei gegenläufige Tendenzen zu beachten:



Allgemein gilt ausserdem, dass das Wirkungsgrad-Maximum immer bei $V_{\text{leer}} = V_{\text{last}}$ liegt, was auch in **Bild 7.1** angedeutet wurde. Dort liegt das Wirkungsgrad-Maximum im Leistungsnennpunkt.

Durch eine geeignete Auslegung des Motors kann der Punkt der Gleichheit: $V_{\text{leer}} = V_{\text{last}}$ beeinflusst werden. In Anbetracht der häufigen Teillast von Antrieben ist also die Verlegung dieses Punktes unterhalb der Nennleistung sinnvoll.

Sind jedoch die Motoren in Anbetracht der Nutzungsmöglichkeiten neuester Projektierungsmittel auf eine gute Auslastung der Motoren hin ausgelegt, so liegt das Wirkungsgrad-Maximum bei Nennleistung.

Hinsichtlich des Wirkungsgradabfalls bei Teillast müssen die Pumpen- und Ventilatorenhersteller wesentlich kritischer sein, weil ihre Erzeugnisse bei jeder Abweichung vom Nennpunkt einen merklich grösseren Wirkungsgradabfall zu verzeichnen haben. Dies demonstriert die im **Bild 7.1** eingezeichnete Wirkungsgradkennlinie einer Kreiselpumpe.

Die Verringerung des Wirkungsgrades eines Motors bei Unterlast ist also im Bereich bis 50% der Nennleistung noch relativ gering. Bedeutender ist schon der Abfall des Leistungsfaktors $\cos \varphi$, dem Verhältnis von Wirkstrom zu Scheinstrom. Wesentlich beeinflusst wird dieser Wert durch den notwendigen Magnetisierungsstrom der Asynchronmaschine.

Die wirtschaftliche Bedeutung dieses Abfalls kann man entweder am Aufwand für einen zur Kompensation der Blindleistung notwendigen Kondensator oder aber an der Kostenerhöhung im Rahmen des gültigen (und meist komplizierten) Energieverbrauchstarifs ermesen.

Bild 7.1: Wirkungsgradverläufe verschiedener Motoren

Es ist für die Einschätzung der bei Teillast eintretenden verschlechterten energetischen Verhältnisse vorteilhaft, einige elementare, allgemein gültige Zusammenhänge zu kennen.

In **Bild 7.1** sind für die verschiedenen Verhältnisse von Leerlaufverlusten V_{leer} , bestehend aus Eisen-, Reibungs- und Leerlaufstromverlusten zur Nennleistung P_{nenn} , für jede Motorart gültige Wirkungsgradkurven η_o gezeichnet.

Berücksichtigt man dazu Lastverluste V_{last} , welche in guter Näherung als Stromwärmeverluste dem Quadrat der Leistung P proportional sind, $V_{\text{last}} = V_{\text{lastnenn}}(P / P_{\text{nenn}})^2$, so ergibt sich für ein gewähltes Verlustverhältnis eine Wirkungsgradkennlinie $\eta(P)$. Die Wirkungsgrade der verschiedenen Motoren werden in ihrem Verlauf $\eta(P)$ nur von den Verhältnissen zwischen Nennleistung, Leerlaufleistung und lastabhängigen Verlusten geprägt.

C: Wachstumsgesetze und Teillasteigenschaften bei Drehstrom-Normmotoren

Nach **Bild 7.2** ist der Wirkungsgrad nach den Wachstumsgesetzen von der Leistung des Motors abhängig. Das gilt sowohl für den Wert des Wirkungsgrades $\eta_{1.0}$ bei Nennlast $P_{\text{nenn}} = 1pu$, als auch für die Werte der Wirkungsgrade bei Teillast, von denen der Wert $\eta_{0.5}$ für die halbe Leistung $P_{\text{nenn}} = 0.5$ mit dargestellt wurde. Beim Einsatz eines Motors sind hinsichtlich seiner Energieökonomie zwei gegenläufige Tendenzen zu beachten:

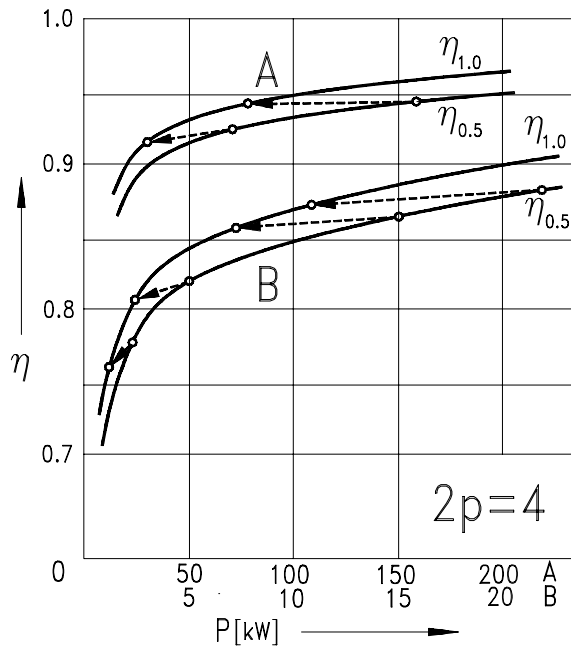


Bild 7.2: Leistungsabhängigkeit der Wirkungsgrade bei Vollast ($\eta_{1.0}$) und bei Halblast ($\eta_{0.5}$)

- Zunahme des Wirkungsgrades mit der Grösse des Motors,
- Abnahme des Wirkungsgrades bei Teillast.

Diese Gegenläufigkeit bedeutet, dass sich bei grossen Leistungen für eine bestimmte vorgegebene Leistung die energetischen Verhältnisse verschlechtern, wenn ein zu grosser Motor eingesetzt wird. Bei kleinen Leistungen - etwa unter 50 kW - dagegen kann der Einsatz eines überdimensionierten Motors, der dann bei Teillast arbeitet, energieökonomisch vorteilhaft sein.

In den **Bildern 7.2 und 7.3** ist durch Pfeile deutlich gemacht, dass bei Halbierung der Leistung der Teillast-Wirkungsgrad $\eta_{0.5}$ eines Motors mit doppelter Leistung grösser sein kann als der Vollast-Wirkungsgrad $\eta_{1.0}$ des der Leistung exakt angepassten Motors.

Zusammengefasst kann man feststellen, dass günstig entworfene Drehstrom-Motoren im betrachteten Teillastbereich hinsichtlich des Wirkungsgrades keine wesentlichen energetischen Verschlechterungen nach sich ziehen. Das Optimum der Antriebsauslegung ist immer unter Verwendung eines modernen Projektierungsmittels zu finden.

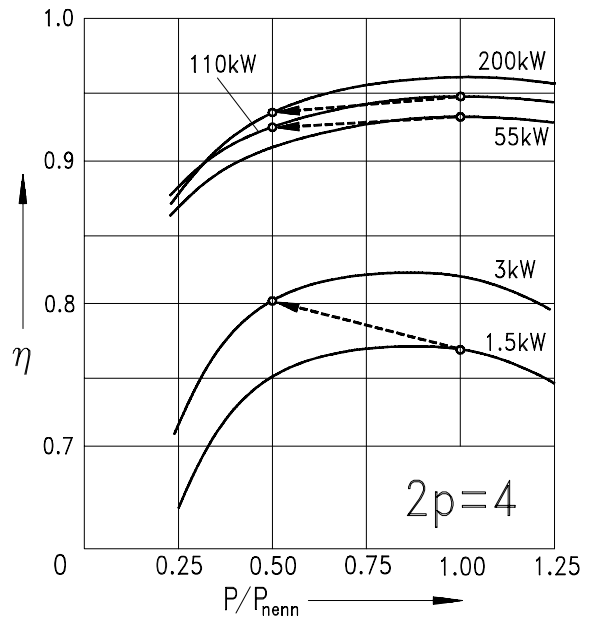


Bild 7.3: Leistungsabhängigkeit der Wirkungsgrade

Hinsichtlich des Leistungsfaktors $\cos \varphi$ wirkt Teillast für jede Leistung energetisch verschlechternd, obwohl auch hier das Wachstumsgesetz den Teillasteinflüssen entgegenwirkt (siehe **Bild 7.4**).

D: Die ökonomische Bewertung von Wirkungsgrad und Leistungsfaktor

Für die Berechnung der Betriebskosten mit den zur Teillast gehörenden energetischen Parametern: Wirkungsgrad und Leistungsfaktor, muss das jeweilige Tariffsystem beachtet werden.

Zur ökonomischen Bewertung von Investitionen, die im allgemeinen für die Verbesserung von Wirkungsgrad und Leistungsfaktor vorzusehen sind, wie

- Normmotoren, modifiziert zu grösseren Wirkungsgraden (Energiesparmotoren),
- Einsatz extrem überlastungsfähiger Motoren,
- Kondensatoren zur Kompensation eines kleinen Leistungsfaktors,
- Einsatz von Motorschutzgeräten zur Kontrolle lebensdauervermindernder thermischer Überlastung,
- Stern-Dreieck Schalter,
- Adaptive Phasenanschnittsteuerung zur Verlustminimierung,

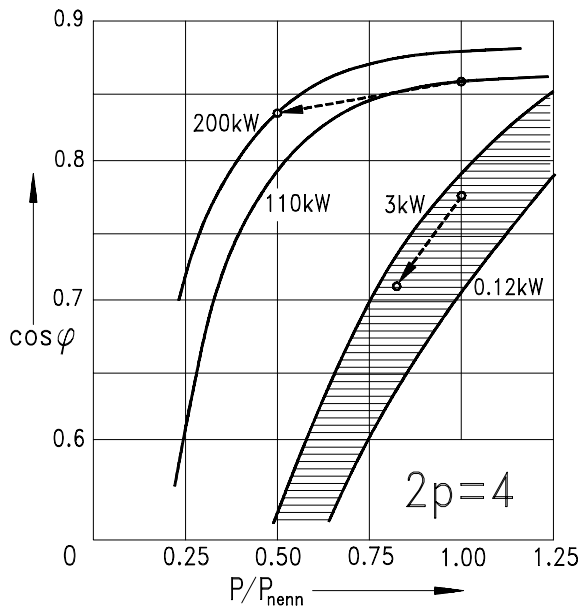


Bild 7.4: Leistungsabhängigkeit der Leistungsfaktoren

müssen die errechneten Betriebskosten nach speziellen, mehr oder weniger anspruchsvollen Methoden, den erforderlichen Investitionsaufwendungen gegenübergestellt werden.

7.2 Massnahmen zur Verbesserung der Ausnutzung unterbelasteter Antriebe

A: Allgemeines

Bei einer unterbelasteten Asynchronmaschine überwiegen die belastungsunabhängigen Verluste, wie die Eisenverluste und die Reibungsverluste gegenüber den Stromwärmeverlusten in den Wicklungen. Der Antrieb arbeitet daher im Teillastbetrieb mit einem schlechten Wirkungsgrad.

Eine Verbesserung der Situation kann erreicht werden durch:

- Eine Absenkung der Speisespannung und damit der Eisenverluste, welche sich annähernd mit dem Quadrat der Spannung ändern.
- Eine Absenkung der Speisefrequenz und damit der Eisenverluste, welche sich annähernd quadratisch mit der Speisefrequenz ändern.
- Eine Absenkung der Drehzahl und damit der Reibungsverluste und der Rotorzusatzverluste.

Diese Massnahmen können jedoch in verschiedener Weise das Betriebsverhalten verändern [28], [29]:

Das Drehmoment einer Asynchronmaschine ist proportional zum Quadrat des Verhältnisses von Speisespannung zu Speisefrequenz.

Eine **Veränderung der Speisespannung** bei konstanter Frequenz bewirkt, wie **Bild 7.5** zeigt, auch eine Veränderung der Drehzahl aufgrund der unterschiedlichen Betriebspunkte der einzelnen Drehmoment/Drehzahl Kennlinien für verschiedene Speisespannungen bei gleichbleibender Lastkennlinie.

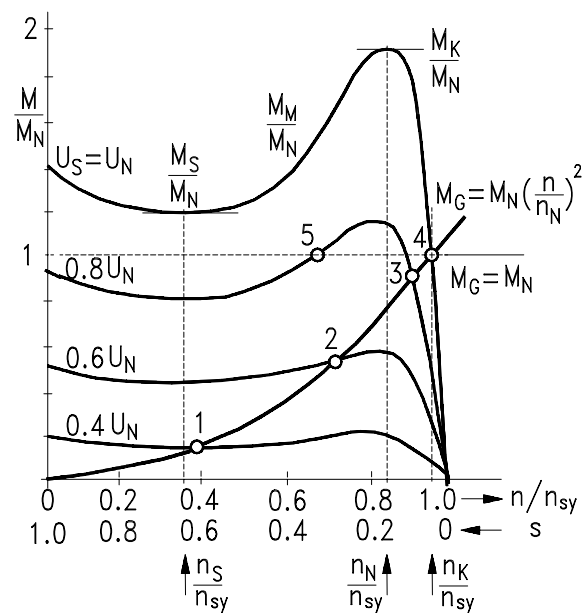


Bild 7.5: Drehmoment/Drehzahl Kennlinien einer Asynchronmaschine bei Steuerung der Speisespannung
1, 2, 3, 4 Stabile Arbeitspunkte
5 Instabiler Arbeitspunkt

Dabei besteht die Gefahr des Instabilwerdens der Asynchronmaschine, d.h. des Übergangs in den Stillstand mit anschliessender Abschaltung durch den Motorschutz, wenn im Lastpunkt (= Schnittpunkt der Motorkennlinie mit der Lastkennlinie, Punkte 1 - 5 im **Bild 7.5**) die Bedingung für die Stabilität:

$$\frac{\partial M}{\partial n} < \frac{\partial M_L}{\partial n}$$

nicht erfüllt ist.

Damit sind bei Stator-Spannungssteuerung die folgenden Drehzahlsteuerbereiche stabil:

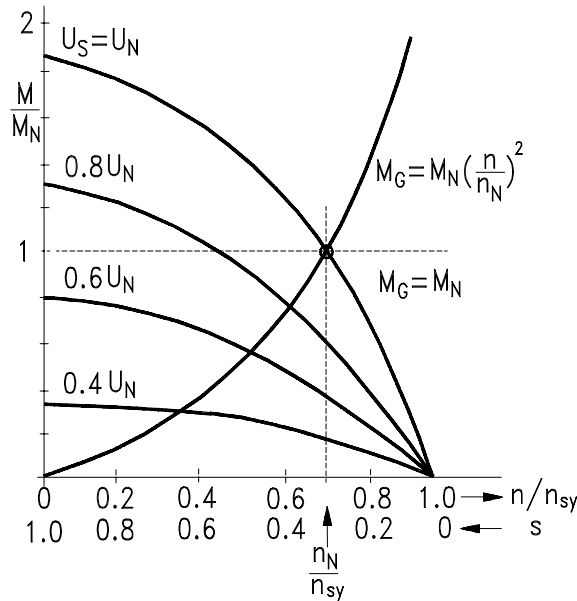


Bild 7.6: Drehmoment/Drehzahl Kennlinien einer Asynchronmaschine mit Läuferwiderstand bei Steuerung der Statorspannung

für $M_L \sim n^2$ im Bereich: $0 < n \leq n_N$
für $M_L = const.$ im Bereich: $0 < n \leq n_S$
im Bereich: $n_K < n \leq n_N$

mit n_N der Nenndrehzahl, n_S der Drehzahl im Sattelmoment und n_K , der Drehzahl im Kippmoment.

Der Drehzahlbereich: $0 < n \leq n_S$ hat keine praktische Bedeutung. Er kann wegen der grossen Strombelastungen nur kurzzeitig benutzt werden.

Wird bei Teilspannungssteuerung die belastete Asynchronmaschine mit grossen Schlupfwerten betrieben, so ist der Leistungsfaktor gering. Dadurch treten neben den hohen Rotorverlusten auch noch zusätzliche Statorverluste auf.

Durch eine Vergrösserung des Läuferwiderstandes (Widerstandsläufer) lässt sich das Betriebsverhalten der Asynchronmaschine bei Spannungssteuerung verbessern. Der Läuferwiderstand wird dabei so bemessen, dass das Kippmoment der Maschine im Bremsbereich liegt d.h., dass der Kipp-schlupf $s_K > 1$ ist. Gemäss **Bild 7.6** ergeben sich dann auch bei konstantem Gegenmoment stabile Betriebspunkte.

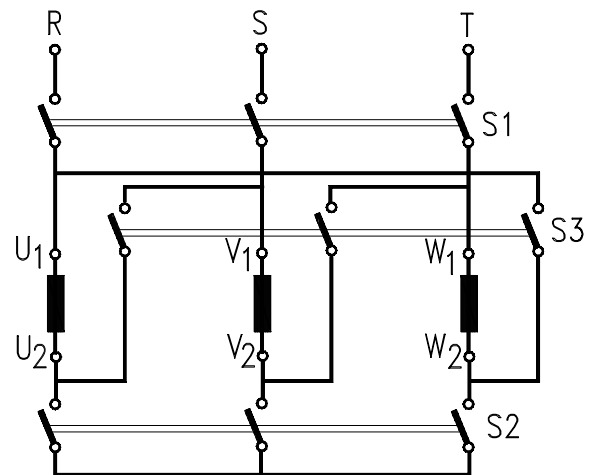
Ein weiterer Vorteil des Widerstandsläufers ist der

verbesserte Leistungsfaktor im Teilspannungsbe-reich und die dadurch verminderten Statorver-luste. Nachteilig wirkt sich hingegen der erhöhte Nennschlupf bei voller Netzspannung aus, der zu erhöhten Rotorverlusten führt.

Bei einer Veränderung der Speisefrequenz ändert sich auch die Drehzahl. Das Drehmoment bleibt nur dann konstant, wenn durch eine der Frequenz proportionalen Veränderung der Spannung dafür gesorgt wird, dass der magnetische Fluss konstant bleibt.

B: Massnahmen zur Verbesserung der Ausnutzung

1) Stern/Dreieck Umschaltung



$\star/\Delta$ -Schaltung	Schalterstellung der Teilschalter		
	S1	S2	S3
0	0	0	0
$\star$	1	1	0
Δ	1	0	1

Bild 7.7: Stern/Dreieck Umschaltung

Bei der Stern-Schaltung gemäss **Bild 7.7** liegen im Vergleich zum Normalbetrieb der Dreieck-Schaltung um den Faktor $1/\sqrt{3}$ verringerte Span-nungen an den Wicklungssträngen der Maschine. Damit geht das Maschinenmoment auf etwa ein Drittel des Wertes im Dreieck-Betrieb zurück. Bei gleicher Belastung nehmen der Schlupf, die Ströme und damit auch die Verluste zu.

Der Betrieb einer für Dreieckschaltung ausgeleg-

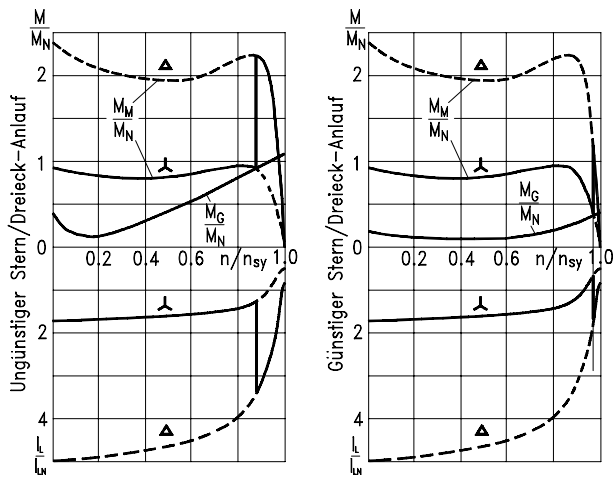


Bild 7.8: a) Günstige Stern/Dreieck-Umschaltung b) ungünstige Stern/Dreieck-Umschaltung

ten Asynchronmaschine in Stern-Schaltung ist daher nur dann sinnvoll wenn:

- die Maschine soweit unterbelastet ist, dass sie auch in Stern-Schaltung stabil ist,
- der Anlaufstrom durch diese Massnahme verringert werden soll,
- durch eine intelligente Motorsteuerung die Umschaltung in die jeweils angemessene, verlustminimale Schaltung sichergestellt ist.

Ein Y/ Δ -Anlauf führt jedoch nur dann zu einer Verminderung der Anlaufströme, wenn auf eine vernünftige Zuordnung der Drehmoment/Drehzahl Kennlinien von Asynchronmaschine und Arbeitsmaschine geachtet wurde. Im **Bild 7.8** sind zum Vergleich zwei Fälle gegenübergestellt.

Die Bewertung der Lösungen a) und b):

$$\begin{aligned} a) \quad M/M_N &= 2.3 & I/I_N &= 3.0 \\ b) \quad M/M_N &= 1.6 & I/I_N &= 1.9 \end{aligned}$$

hinsichtlich Drehmoment- und Stromspitzen zum Umschaltzeitpunkt fällt eindeutig zugunsten der Variante b) aus, welche einer kleineren Maschinenausnutzung entspricht.

2) Phasenanschnittsteuerung, HLS

Bei der Phasenanschnittsteuerung werden über antiparallele Halbleiter-Schalter (Thyristoren) in jedem Zuleitungsstrang angeschnittene und damit verminderte Spannungen auf den Motor geschaltet. Die Speisefrequenz wird nicht verändert.

Näherungsweise gehen dabei der Strom linear und das Drehmoment quadratisch mit der Spannung zurück, so dass damit der Motor der Belastung angepasst werden kann.

Die Phasenanschnittsteuerung ist jedoch u.U. nicht ganz unproblematisch:

- Die Speisung des Motors mit verzerrten Spannungen verursacht zusätzliche Motorverluste.
- Es können Schwingungen im Betrieb auftreten.

Die Phasenanschnittsteuerung wird daher vor allem zur Verminderung der Anlaufströme, der Anlaufmomente und der Anlaufverluste verwendet. Voraussetzung dafür sind kleine Trägheits- und Widerstandsmomente.

Im **Bild 7.9** werden Drehmoment/Drehzahl-Kennlinien und Fördermenge/Zeit-Diagramme für das Einschalten mit voller Netzspannung (VNS) und Phasenanschnittsteuerung (Halbleiterstarter: HLS) verglichen.

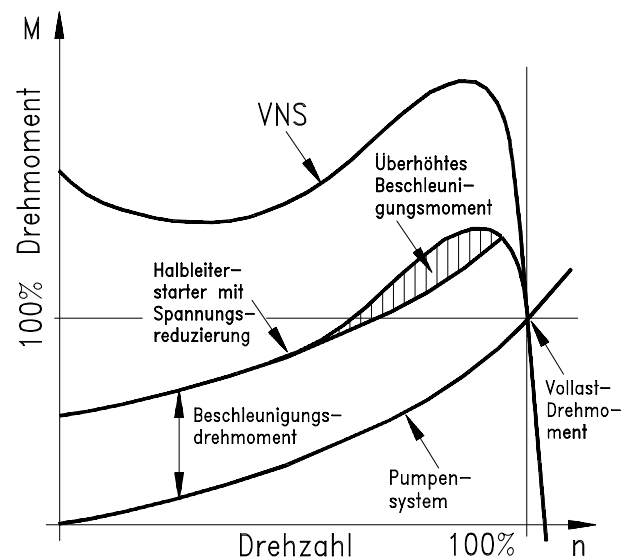


Bild 7.9: M-n-Kennlinien bei voller Netzspannung (VNS) und bei Spannungsreduzierung

Bei HLS wird die Versorgungsspannung über eine einstellbare Zeitspanne hinweg langsam auf den vollen Wert erhöht, was eine ebenso langsame Erhöhung des Motordrehmomentes bewirkt. Gegen Ende der langsamen Erhöhung wird jedoch im Bereich des Kippmomentes aufgrund der Natur der Drehmoment/Drehzahl-Kennlinie einer ASM eine plötzliche Veränderung des Drehmomentes er-

zeugt, was z.B. bei Pumpen Druckschläge mit möglichen mechanischen Schäden im Leitungssystem verursachen kann.

3) Intelligente Motorsteuerung

Bei einem geregelten Halbleiterstarter [5] wird durch die geregelte Spannungsreduzierung das Beschleunigungsmoment im instationären Betrieb, bzw. das Drehmoment im stationären Betrieb, begrenzt bzw. dem Bedarf angepasst. Es treten daher keine plötzlichen Änderungen des Drehmomentes auf, wodurch bei Pumpenantrieben Druckschläge und Klopfen im System auf ein Minimum reduziert werden können. Bei Leicht- oder Unterlast bewirkt die Spannungsanpassung eine Verminderung der Verluste. Das **Bild 7.10** zeigt Drehmoment/Drehzahl-Kennlinien und Fördermenge/Zeit-Diagramme für das Einschalten mit voller Netzspannung (VNS) und für den geregelten Halbleiterstarter (HLS) im Vergleich.

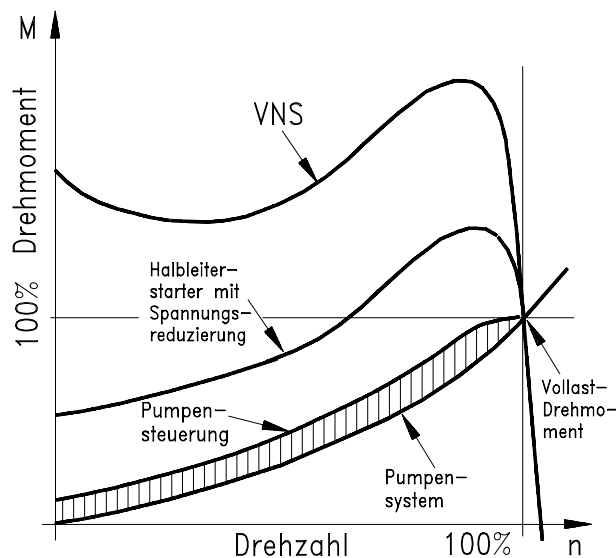


Bild 7.10: M-n-Kennlinien bei voller Netzspannung (VNS), bei Spannungsreduzierung und bei geregelter Spannungsreduzierung (Pumpensteuerung)

4) Polumschaltbare Asynchronmotoren

Durch eine Polumschaltung kann die Drehzahl dem Bedarf angepasst werden. Die Polumschaltung, eine für die Asynchronmaschine häufig angewendete Methode der Drehzahlstellung, beruht auf einer Veränderung des Luftspaltfeldes durch Wick-

lungsumschaltung oder -speisung, und damit der synchronen Drehzahl.

Man unterscheidet umschaltbare (Dahlanderwicklungen) und getrennte Ständerwicklungen, wonach in einem Motor praktisch bis zu vier Drehzahlstufen untergebracht werden können. **Bild 7.11** zeigt im Überblick die am häufigsten vorkommenden Ausführungen.

Polzahl	Synchrone Drehzahlen bei 50Hz in U/min	Anzahl der Ständerwicklungen	Schaltung
4-2	1500-3000	1	$\Delta/\Delta\Delta$
8-4	750-1500	1	$\Delta/\Delta\Delta$
12-6	500-1000	1	$\Delta/\Delta\Delta$
6-4	1000-1500	2	$\Delta-\Delta$
8-4-2	750-1500-3000	2	$\Delta-\Delta/\Delta\Delta$
8-6-4	750-1000-1500	2	$\Delta/\Delta\Delta$
12-8-6-4	500-750-1000-1500	2	$\Delta/\Delta\Delta-\Delta/\Delta\Delta$

Bild 7.11: Häufigste Ausführungen polumschaltbarer Asynchronmaschinen

Polumschaltbare Asynchronmaschinen sind für den Antrieb von Arbeitsmaschinen wie Aufzüge, Lüfter oder Pumpen geeignet, deren Arbeitsspiel nur wenige Drehzahlen erfordert. Im Vergleich zum Umrichterantrieb ist diese Lösung kostengünstiger, obwohl der Asynchronmotor schlechter ausgenutzt ist.

Eine Erhöhung der Polpaarzahl im Nennbetrieb durch Umschalten bewirkt eine Verminderung der Drehzahl, d.h. ein generatorisches Bremsen, solange bis die neue stationäre Drehzahl, entsprechend der neuen Polpaarzahl, erreicht ist.

Beispiel: Lüfterantrieb

Unter Berücksichtigung der Abhängigkeit zwischen dem Leistungsbedarf und der Drehzahl bei einer Strömungsmaschine (welcher mit der 3. Potenz der Drehzahl ansteigt) und einer Bedarfsleistung bei voller Drehzahl von 7.5 kW, sind mit einem über Frequenzumrichter gesteuerten Asynchronmotor, resp. mit Schlupfregelung, die in **Tabelle 7.1** aufgeführten Wirkungsgrade realisierbar:

Bei Verwendung eines polumschaltbaren Motors in Dahlanderschaltung mit zwei Drehzahlen im Verhältnis 1:2 oder mit zwei getrennten Wicklungen im Verhältnis 1:1.5, bzw. eines dreifach polumschaltbaren Motors mit zwei/drei getrennten Wick-

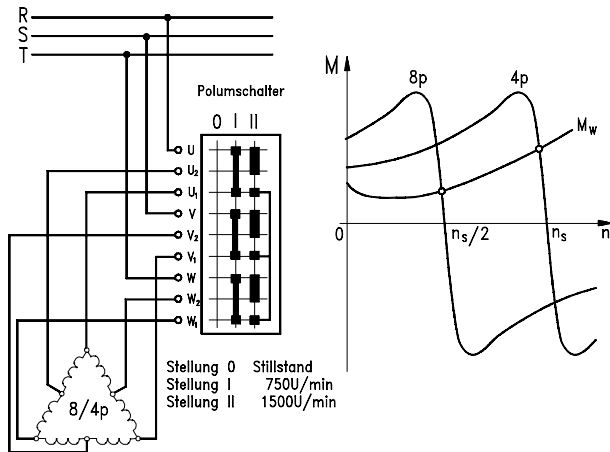


Bild 7.12: Polumschalter und ASM - Drehmomentkennlinien der Dahlander-Schaltung

Drehzahl U/min	Leistungsbedarf kW	Wirkungsgrad	
		$\eta_{SR}[\%]$	$\eta_{FU}[\%]$
1500	7.5	82	83
1000	2.3	60	77
750	1.0	45	71

η_{SR} = mit Schlupfregelung

η_{FU} = mit Frequenzumrichter

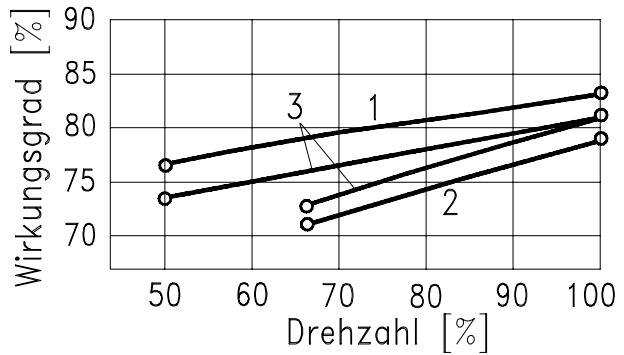
Tabelle 7.1: Mit Schlupfregelung und Frequenzumrichtern realisierbare Wirkungsgrade von Asynchronmaschinen

lungen, ergeben sich die im **Bild 7.13** gezeigten Verhältnisse.

Man erkennt, dass der einfach polumschaltbare Asynchronmotor nach Dahlander wirkungsgadmässig die beste Lösung darstellt.

7.3 Massnahmen zur Verbesserung der Ausnutzung überbelasteter Antriebe

Leistungsmässig unterbelastete Motoren resultieren aus der Furcht des Projektanten und des Betreibers vor Überlast. Dabei bedeutet Überlast im Sinne geltender Projektierungsrichtlinien das Überschreiten der zulässigen Wicklungstemperatur über mehr oder weniger grosse Zeiträume hinweg. Damit bedeutet Überlast Verlust an Wicklungslebens-



- 1 8/4polig Dahlander
- 2 6-4polig 2 getrennte Wicklungen
- 3 8-6-4polig 2 getrennte Wicklungen (8/4polig Dahlander)

Bild 7.13: Wirkungsgrade polumschaltbarer Asynchronmotoren

dauer, die meist mit 100000 Stunden vom Hersteller garantiert wird.

Diese starre Vorgabe von zulässiger Wicklungstemperatur einerseits und garantierter Lebensdauer andererseits entspricht eigentlich nicht einem sinnvollen Vorgehen beim Entwurf und Einsatz eines technischen Elements. Bei Getrieben zum Beispiel wird die gewünschte Lebensdauer vorgegeben und danach unter Kenntnis der Lebensdauergesetze und der Verschleissvorgänge im Getriebe die Grösse des Getriebes aufgrund spezifischer Zahnbelastungen ausgewählt. Wenn dies bei elektrischen Maschinen bisher anders gehandhabt wurde, so ist das der Tatsache zuzuschreiben, dass die für den Aufbau eines Isolationssystems einer elektrischen Maschine notwendigen Isolierstoffkomponenten wie Drahtlack, Nutauskleidungen usw. nach ihrer Temperaturbeständigkeit klassifiziert und eingesetzt wurden. Diese Klassifikation der Komponenten nach ihrer "Wärmebeständigkeitsklasse" wird jetzt von der standardisierenden Behörde "International Electrotechnical Comitee" (IEC) verlassen und durch eine Systemklassifikation ersetzt.

Damit ist der erste Schritt getan, nämlich nur im Hinblick auf die thermische Festigkeit der Wicklung, beim Einsatz des Motors von einer Vorgabe der gewünschten Lebensdauer auszugehen und eine Wicklungstemperatur zuzulassen, die dann in den meisten Fällen über der bisher zulässigen Wick-

lungstemperatur liegen dürfte. Diesem Vorgehen sind allerdings zwei Grenzen gesetzt:

- Ein bestimmter Höchstwert der Wicklungstemperatur darf nicht überschritten werden, da bei sehr hohen Temperaturen eine spontane und irreversible Schädigung der Wicklung eintreten kann, etwa durch Schmelzen des Lackes
- Die übrigen thermisch empfindlichen Bauteile des Motors müssen die der Überlast entsprechend höheren Temperaturen ebenfalls ohne qualitative Veränderung ertragen. Es ist also anzustreben, dass Ventilatoren, Wälzlager, Ableitungen und Dichtungen ebenfalls auf Überlastbedingungen eingestellt werden.

Eine sogenannte **lebensdauerorientierte Projektierung** sollte aber als Alternative zur üblichen Auslegung vorgenommen werden, um die Sinnfälligkeit und Ökonomie einer speziellen Abstimmung zwischen Motorenhersteller und Anwender abschätzen zu können. Deshalb werden hier die notwendigen Projektierungsmittel genannt.

Das Lebensdauergesetz für den Zusammenhang zwischen Temperatur der Wicklung T und Lebensdauer L lautet nach Büssing

$$L = Ae^{B/T}$$

mit A, B = Konstanten des eingesetzten Isolationssystems

Dieses Gesetz in seiner einfachen Form beruht auf der Absonderung flüchtiger Bestandteile des Isolationssystems unter dem Einfluss der Temperatur. Die Folge dieses Vorganges ist ein Masseverlust, eine zunehmende Porösität und ein abnehmender Widerstand gegenüber der anliegenden Spannung. **Bild 7.14** gibt den Algorithmus wieder, der zwischen der blockförmig angenommenen im Belastungsrythmus periodisch auftretenden Temperatur-Zeit-Funktion und der zu erwartenden Lebensdauer der Wicklung vermittelt. So wird z.B. für eine Temperatur T_1 , die nach Lebensdauergesetz zu erwartende totale Lebensdauer Lh_1 errechnet, die allerdings nur zum Bruchteil $delt_1/Lh_1$ in den relativen Lebensdauerverbrauch Z eingeht. Diese Betrachtung kann man für alle Temperaturblöcke anstellen. Schliesslich kommt der Zeitpunkt $t[i]$, an dem die dem Isolationssystem innewohnende Le-

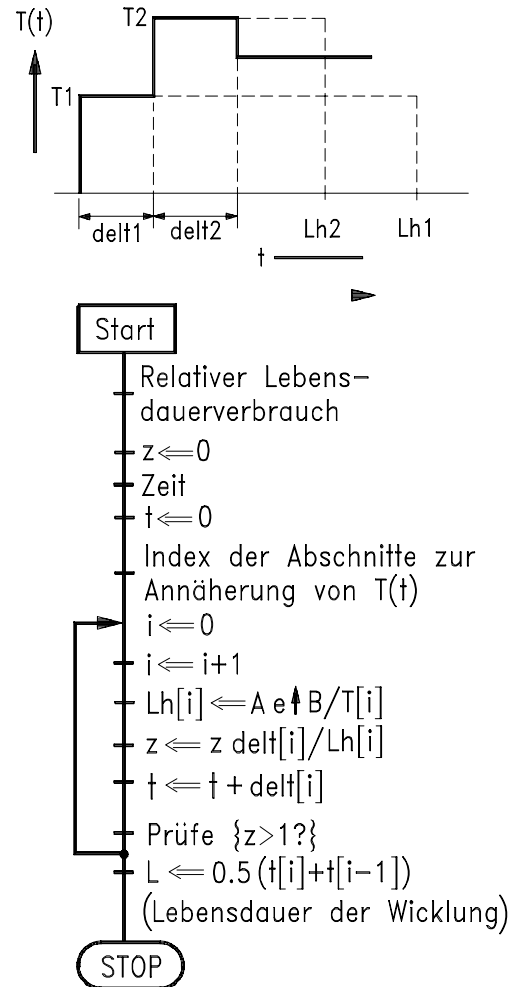


Bild 7.14: Algorithmus zur Bestimmung des Lebensdauerverbrauchs von Niederspannungswicklungen in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf der Wicklungstemperatur

bensdauer verbraucht ist: der Motor müsste zu diesem Zeitpunkt ausfallen.

Die Bezeichnung "intelligenter" Motorschutz von Geräten bezieht sich auf eine Prognosefunktion, bzw. auf die Möglichkeit der Altersbestimmung der Wicklung. Bei der lebensdauerorientierten Projektierung geht man von einem periodisch wiederkehrenden Belastungszyklus, wie z.B. dem nach **Bild 7.15** aus. Dieser Zyklus wird in Temperatur/Zeitabschnitt-Blöcke willkürlich aufgeteilt, wobei die Abschnitte mit "unzulässig" hohen Temperaturwerten besondere Aufmerksamkeit verdienen. Die rechnerische Lebensdauer ergibt

sich als

$$L = \sum_i L_h[i] * \frac{\Delta t[i]}{T_S}$$

wobei $L_h[i] = f(T)$ und entsprechend der bekannten Kennlinie des Isolationssystems in **Bild 7.16** und T_S die Dauer des Spiels ist.

Die "nominale" Lebensdauer L_{nom} ist für ein bestimmtes Isolationssystem festgelegt und beträgt im gewählten Beispiel 100000h bei einer Temperatur von 155°C für ein System der Wärmebeständigkeitsklasse F (WBK F). Im **Bild 7.15** wurden

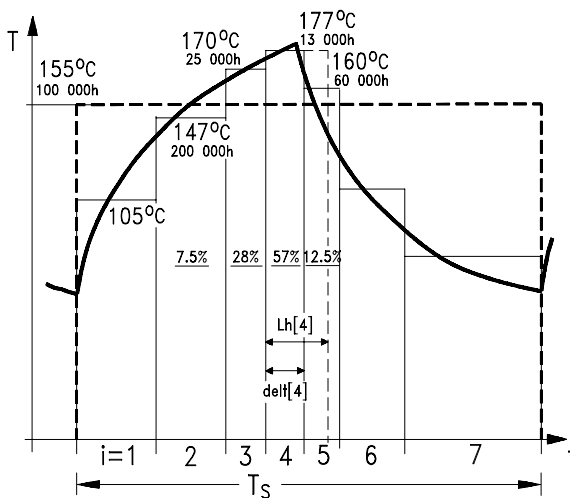


Bild 7.15: Temperaturverlauf innerhalb eines Belastungszyklus mit der Spieldauer T_S als Basis für eine lebensdauerorientierte Projektierung

die den einzelnen Temperatursäulen zuzumessenden relativen Lebensdauerverbräuche in Prozent eingetragen. Nur die Temperaturspitzen, die über der Klassentemperatur liegen, bestimmen die Lebensdauer der Wicklung, z.B. verbraucht die Säule $i = 4$ 57% des gesamten Lebensdauervorrates.

Wie bereits erwähnt, müssen neben der Wicklung auch alle temperaturempfindlichen Bauteile des Motors die der Überlast entsprechenden Temperaturspitzen ohne Verlust der Funktionsfähigkeit ertragen. Dies betrifft insbesondere die Bauteile:

- Lüfter: Metall- od. wärmestabilisierende Plaste
- Lager: Speziallager zur Wärmespiel-Aufnahme
- Lagerfett: Höhere Temperaturbeständigkeit
- Klemmkastendichtung: Silikonkautschuk
- Anstrichstoffe: Farbbeständigkeit

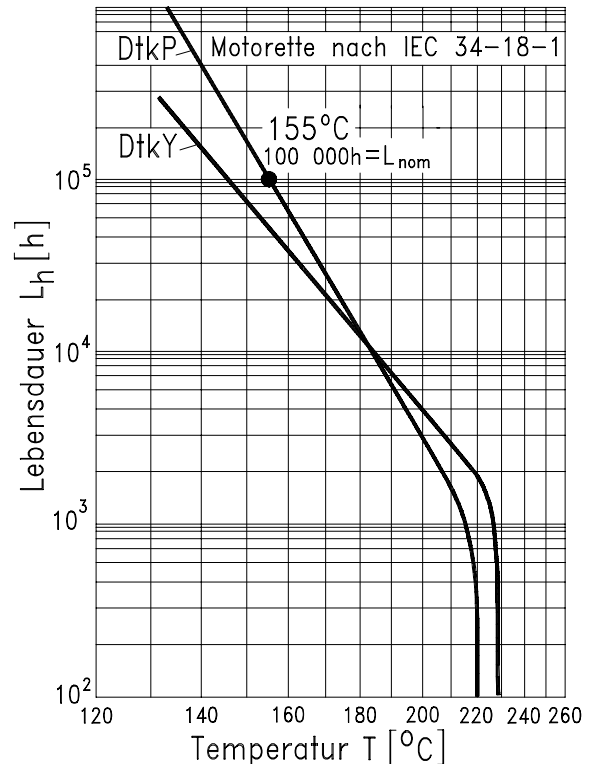


Bild 7.16: Lebensdauerfunktion für eine Niederspannungswicklung der Wärmebeständigkeitsklasse F, gemessen an Motoretten entsprechend IEC 34-18-1

Gegebenenfalls ist eine Modifikation der bestehenden Normmotorenreihen notwendig.

Die in Vorbereitung befindliche Normung einer Betriebsart mit Zeitspannen für Überlast stellt eine Vereinfachung der wirklichen Belastungsbedingungen dar. Sie ist ein erster Schritt zur lebensdauerorientierten Projektierung, die schliesslich voll die im Isolationssystem steckenden Reserven erschliesst. Die vorgesehene Betriebsart S10 wird z.B. wie folgt gekennzeichnet:

$$p/\Delta t = 1.1/0.4; 1.0/0.3; 0.9/0.2; r/0.1 \quad T_L = 0.6$$

Hierbei bedeutet p das Verhältnis von Leistung zur Nennleistung, Δt der relative Zeitraum in dem diese Leistung wirkt, r der Zustand Stillstand mit stromlosen Wicklungen sowie $T_L \leq 1$ die relative Verringerung der Lebensdauer der Wicklung, der im Dauerbetrieb (Betriebsart S1) laufenden Maschine.

8 Energieökonomisch bedeutende Antriebsanwendungen und Lösungswege

Grundsätzliches:

- Die Hälfte aller im Betrieb befindlichen Wechselstrommotoren treiben Gebläse, Verdichter oder Pumpen an. In diesem Bereich kann durch den Einsatz von drehzahlgesteuerten Antrieben bis zu 35% Energie eingespart werden.
- Durch die Anwendung von rückwärtslaufenden Kreiselpumpen, z.B. in Fernwasserleitungen, können regenerative Energiepotentiale zur Stromerzeugung genutzt werden.

8.1 Drehzahlvariable Ventilatoren

Ein Grossteil der elektrischen Energie, die für den Betrieb von Wechselstrommotoren aufzubringen ist, wird für Gebläse und Pumpen verwendet. Da etwa die Hälfte aller im Betrieb befindlichen Wechselstrommotoren Gebläse, Verdichter oder Pumpen antreiben, lohnt es sich besonders in diesem Anwendungsbereich nach Energiesparmassnahmen Ausschau zu halten.

Gebläse und Pumpen werden in der Regel so dimensioniert, dass sie den Maximalanforderungen des Systems in dem sie installiert sind gerecht werden. Im praktischen Betrieb jedoch kommt es ziemlich häufig vor, dass sich die Belastung zeitlich ändert und in einem normalen Betriebszyklus dazu noch so gering ist, dass zur Verfügung stehende Energiereserven meist ungenutzt bleiben.

Bei der Steuerung von Durchflussmengen dominierten bisher hauptsächlich zwei Verfahren [31]: der Einsatz von **Drosselklappen** und die Verwendung von **Drallreglern**. Beide Verfahren sind zwar einfache und daher weitverbreitete Massnahmen der Fördermengenvariation. Aus energetischer Sicht jedoch sind sie eher als ungünstig zu bewerten.

In letzter Zeit sind verschiedene Möglichkeiten der Regelung von Fördermengen weiterentwickelt wor-

den mit denen im Vergleich zu den traditionellen Methoden nicht unwesentliche Energieeinsparungen zu erzielen sind. Die physikalisch und energetisch günstigsten Ergebnisse der Volumenstromsteuerung erreicht man mit drehzahlveränderlichen Antrieben, meist umrichtergesteuerte Asynchronmotoren.

Im folgenden wird nicht nur darüber berichtet wie die genannten Steuerungsarten aus technischer und wirtschaftlicher Sicht zu bewerten sind. Es werden auch energieökonomische Konsequenzen von noch nicht allzu bekannten Methoden der rationellen Energienutzung, wie z.B. rückwärtslaufende Kreiselpumpen, unterbelastete oder sporadisch belastete Antriebe, aufgezeigt.

Üblicherweise werden Ventilatoren für eine entsprechende Anlage konstruktiv ausgelegt, d.h. sie arbeiten nur in einem Betriebspunkt optimal. Im Hinblick auf eine Prozessoptimierung ist jedoch meist eine Veränderung der Fördermenge erforderlich. Neben der grundsätzlichen Möglichkeit Lüfter, Verdichter oder Gebläse nach einem vorgegebenen Betriebszyklus einfach ein- und auszuschalten, z.B. in der Haustechnik (Raumheizungsanlagen mittlerer Leistung), dominieren hauptsächlich zwei Methoden der Volumenstromsteuerung bei konstanter Drehzahl.

Die Durchflussmenge in einer Ventilatoranlage kann mit Drosselklappen oder auch mit Drosselschiebern verändert werden. Diese können sowohl druckseitig (nach dem Ventilator) als auch saugseitig (vor dem Ventilator) angeordnet sein. Bei der saugseitigen Variante wird der Luftstrom unmittelbar hinter der Drosselklappe stark verwirbelt. Befinden sich die Drosselklappen deshalb zu nahe am Saugmund des Ventilators, wirkt sich das nicht nur auf die erforderliche Antriebsleistung und damit auf den Wirkungsgrad sehr ungünstig aus, sondern auch auf die damit verbundene Geräuschentwicklung.

Die häufigere Variante ist das druckseitige Abdrosseln der Fördermenge (D_{S1}, D_{S2}, D_{S3}), gemäss

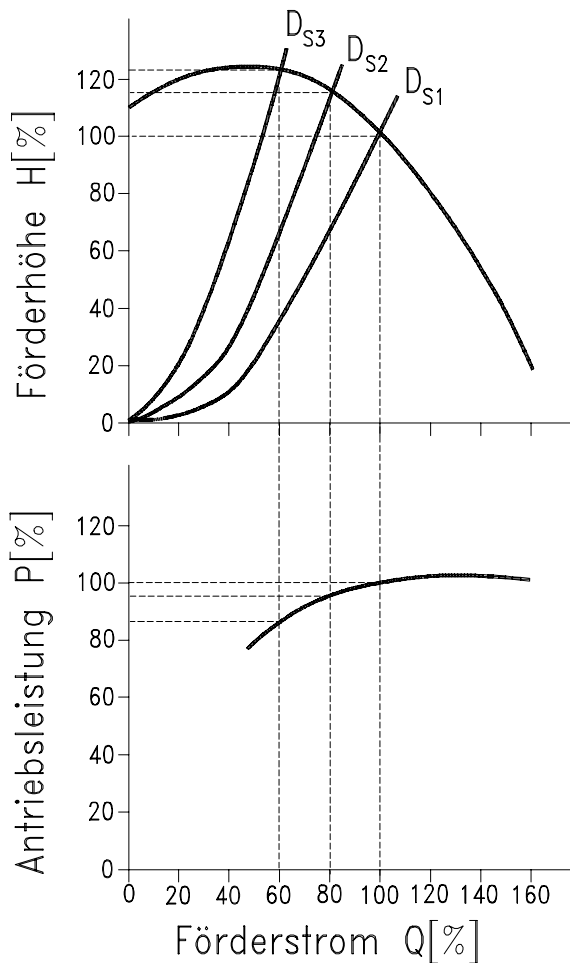


Bild 8.1: Kennlinienfeld eines Radialventilators bei Drosselsteuerung

Bild 8.1. Bei sinkendem Druck im Anlagenrohrsystem erhöht sich bei dieser Variante der Druck im Ventilator. Die Umsetzung der grossen Druckdifferenz in Wärme bewirkt jedoch vor allem eine Verschlechterung des Wirkungsgrades.

Solange durch Drosselung der Fördermenge keine kleine Volumenstromänderung in der Umgebung des Nenn-Volumenstromes umfasst wird, ist sie aus energietechnischer Sicht als ausserordentlich schlecht zu bewerten.

Die Fördermengen von Gebläsen können auch durch Drallregler beeinflusst werden, die immer noch, besonders für mittlere und grössere Antriebsleistungen, verwendet werden. Dabei wird dem Fördermedium durch ein verstellbares Schaufelsystem ein mehr oder weniger starker Drall in Laufrichtung erteilt. Gemäss **Bild 8.2** ändert sich damit die Betriebscharakteristik (D_{L1} , D_{L2} , D_{L3}) des

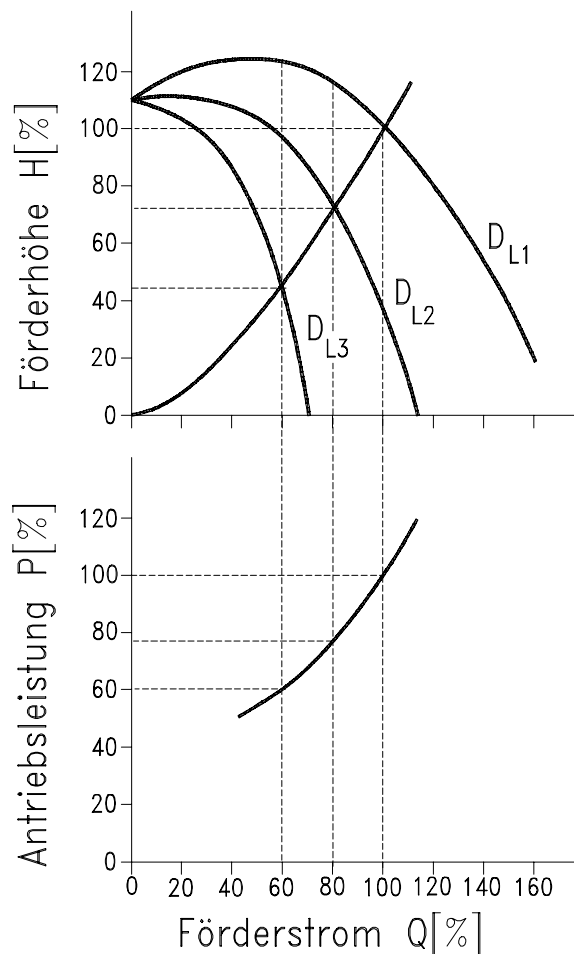


Bild 8.2: Kennlinienfeld eines Radialventilators bei Drallregelung

Ventilators so, dass Druck, Leistung und Wirkungsgrad mit zunehmendem Drall sinken. Die Energieverluste des Drallreglers sind insbesondere bei steilen Anstellwinkeln des Schaufelsystems, d.h. bei grosser Volumenstromreduzierung, beträchtlich.

Was die Anpassung an veränderliche Betriebsverhältnisse betrifft, so ist der Einsatz von Drallreglern im Vergleich zur Drosselung jedoch merklich günstiger was durch folgendes Beispiel verdeutlicht werden soll:

Ein Lüftersystem mit dem Lastprofil der **Tabelle 8.1** wird 8400 Stunden pro Jahr betrieben.

Danach werden jährlich also $127260 : 8400 = 15.15\%$ der Energiekosten durch den Einsatz eines Drallreglers gegenüber der Verwendung von Drosselklappen eingespart.

Q %	t [h]	%	Einsp. Ds/Dl	t x Einsp. % h
100	420	5	0	0
85	1 260	15	11	13 860
75	2 100	25	15	31 500
65	2 100	25	16	33 600
55	1 260	15	19	23 940
50	840	10	19	15 960
45	420	5	20	8 400
	8 400			127 260

Tabelle 8.1: Energieeinsparung
Drosselung/Drallregelung

Die Steuerung der Drehzahl von Ventilatoren durch drehzahlveränderliche Antriebsmotoren ist das mit Abstand günstigste Verfahren der Volumenstromsteuerung. Gemäss **Bild 8.3** werden bei dieser Methode die unterschiedlichen, durch Drehzahlveränderung erhältlichen Ventilator-Kennlinien (D_{Z1}, D_{Z2}, D_{Z3}), ausgenutzt.

Eine Ventilator-Kennlinie kann durch die einfache Funktion

$$\Delta p = k * Q^2$$

wobei

Δp = Druckerhöhung im Fördermedium [kPa]

Q = Fördermengenstrom [m^3/s]

beschrieben werden. Der Faktor k ist dabei systemspezifisch und repräsentiert die vom Fördermedium zu überwindenden Strömungswiderstände.

Wie nun die Drehzahl des Ventilators auf die Druckerhöhung, den Volumenstrom sowie die Antriebsleistung wirkt, kann aus den Modellgesetzen für Strömungsmaschinen

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}, \quad \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2, \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$$

wobei

n = Drehzahl [1/min.]

P = Antriebsleistung [kW]

abgeleitet werden. Dabei wurde der Wirkungsgrad in weiten Grenzen seines Optimums als von der Drehzahl unabhängig angenommen.

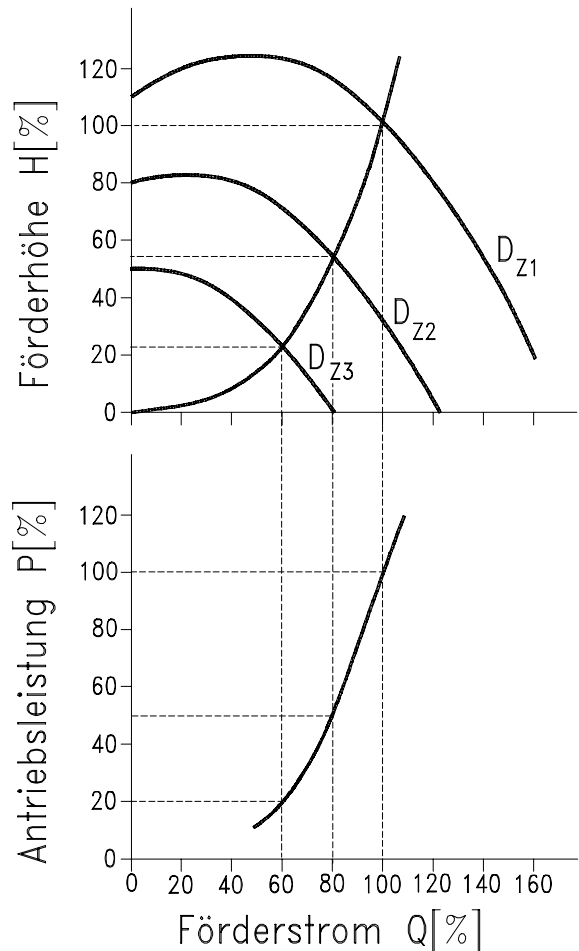


Bild 8.3: Kennlinienfeld eines Radialventilators bei Drehzahlsteuerung

Eine einfache Kombination der Modellgesetze für Strömungsmaschinen führt zu der Beziehung

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2, \quad \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$$

$$\Rightarrow \Delta p_2 = \frac{\Delta p_1}{Q_1^2} Q_2^2$$

in der die Grösse $\Delta p_1/Q_1^2$ mit der Systemkonstanten k in Zusammenhang gebracht wird. Damit ist gezeigt, dass die bestimmten Drehzahlen zugeordneten Ventilator-Kennlinien alle vom gleichen Typ sind. Dies wiederum bedeutet, dass bei Anlagen mit quadratischer Widerstandscharakteristik grundsätzlich die Möglichkeit besteht, die Betriebsverhältnisse durch Verändern der Drehzahl dem jeweiligen Druckerhöhungsbedarf bei wechselnden Fördermengen mit geringster Antriebsleistung ideal anzupassen.

Zur Verdeutlichung dieser Aussage wird am Beispiel des Lüftersystems mit der jährlichen Fördermengenverteilung gemäss **Tabelle 8.2** die durch Drehzahländerung mögliche Energieeinsparung gegenüber der Drosselsteuerung und der Drallsteuerung verglichen [33].

Q %	Zeit h	P1 %	h x P1 $E_1^* [\%h]$	P2 %	h x P2 $E_1^* [\%h]$
100	420	12	5 040	12	5 040
85	1 260	19	23 940	8	10 080
75	2 100	31	65 100	16	33 600
65	2 100	38	79 800	22	46 200
55	1 260	45	56 700	26	32 760
50	840	46	38 640	27	22 680
45	420	48	20 160	28	11 760
	8 400		279 300		152 040

Tabelle 8.2: Energieeinsparung Drehzahlsteuerung/Drosselung und Drehzahlsteuerung/Drallregelung

Jährlich werden demnach also bei Drehzahlsteuerung gegenüber der Drossel-Steuerung 279300 : 8400 = 33.25% und gegenüber der Drallklappen-Steuerung 152040 : 8400 = 18.10% der Energie eingespart. Bei dieser Betrachtung ist natürlich die dem elektrischen Netz entnommene Wirkleistung relevant. Anhand des **Bildes 8.4** sollen die Verhältnisse zur Drosselung und Drallregelung für eine Anlage mit der Nennleistung $P_N = 84kW$, der Nenndrehzahl $n_N = 1450 \text{ 1/min}$ und einem Nenn-Fördervolumen $Q_N = 12m^3/s$ verdeutlicht werden.

Für die Berechnung der Kostendifferenz zwischen den oben angesprochenen Methoden wird angenommen, dass die Ventilatoranlage 730h mit dem Lastprofil L_1 des **Bildes 8.5** betrieben wird.

Diese einfache Kosten-Überschlagsrechnung berücksichtigt weder den Wirkungsgrad des Motors noch den Wirkungsgrad des Ventilators, was jedoch die durchgeführte Rechnung nicht allzusehr verfälscht. Es ist davon auszugehen, dass für beide Fälle der gleiche Antriebsmotor eingesetzt wurde. Für eine genauere Rechnung müssen das Lastprofil der Anlage sowie Anlagen-Kennlinien und Gebläse-Kennlinien ausgewertet werden.

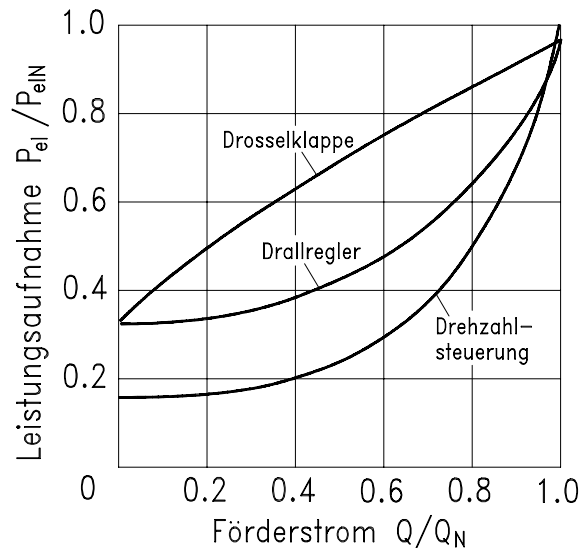


Bild 8.4: Elektr. Leistungsaufnahme eines Radialventilators bei Drehzahlsteuerung

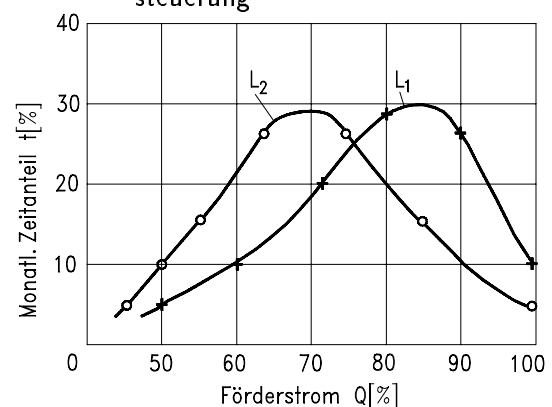


Bild 8.5: Lastprofile eines Radialventilators

8.2 Drehzahlvariable Pumpen

Man kann Pumpen generell in zwei Kategorien einteilen, in **Zentrifugal-Pumpen** und **Kolben-Pumpen**. Bei Kolben-Pumpen wird das Pumpvolumen verändert, womit das Fördermedium zum Fließen gebracht wird. Bei Zentrifugal-Pumpen hingegen wird durch rotierende Impeller das Fördermedium verdichtet, was eine ablaufseitige Druckerhöhung bewirkt. Die überwiegende Mehrheit der heute für den Transport von flüssigen Fördermengen verwendeten Pumpen sind Zentrifugalpumpen. Für die folgende generelle Betrachtung wird nur von Pumpen diese Typs ausgegangen. Zunächst werden einige im Zusammenhang mit der Strömung von Flüssigkeiten relevante Begriffe aufgeführt.

Q %	Z_m %	Dross. P_{1W}	P_{1G}	Drall. P_{2W}	P_{2G}	Drehz. P_{3W}	P_{3G}
100	10	84.0	8.40	84.0	8.40	84.0	8.40
90	27	79.8	21.55	68.9	18.60	62.1	16.77
80	28	74.8	20.95	57.9	16.21	44.5	12.46
70	20	69.7	13.94	49.5	9.90	33.6	6.72
60	10	63.8	6.38	42.0	4.20	26.9	2.69
50	5	57.9	2.89	36.9	1.85	21.8	1.09
			74.11		59.16		48.13

Betriebszeit 730h/Monat	54 100.30	43 186.80	35 134.90	kW
Kosten 0.16 Fr./kWh	8 656.05	6 909.90	5 621.60	Fr.
	-5 621.60	-5 621.60		
Einsparung Fr.	3 034.45	1 288.30		

Tabelle 8.3: Kostendifferenz zwischen Drehzahlsteuerung/Drosselung und Drehzahlsteuerung/Drallregelung

- Der **Druck** oder die **Förderhöhe** für eine Pumpenanlage wird gewöhnlich in Pascal (Pa) ($1Pa = 1kg/ms^2$) oder in Meter Wassersäule (mWS) ($1mWS = 9.8kPa$) gemessen.
- Der **Statische Förderdruck** einer Anlage muss zur Überwindung eines gegebenen Höhenunterschiedes aufgebracht werden. Er wird aus der potentiellen Energie der unter Druck stehenden, jedoch ruhenden Flüssigkeit, abgeleitet.
- Der **Dynamische Förderdruck** oder **Staudruck** ist äquivalent zu dem durch die Strömung des Fördermediums verursachten Druckverlust einer Pumpenanlage. Er wird aus der kinetischen Energie der strömenden Flüssigkeit bestimmt und wächst quadratisch mit der Fördermenge.
- Unter **Anlagendruck** versteht man den System-Druck, der sowohl den statischen Druck als auch den Staudruck innerhalb eines bestimmten Fördermengenbereiches berücksichtigt.
- Der **Pumpendruck** ist der am Ablaufstutzen verfügbare Druck, der sich z.B. bei einer Zentrifugalpumpe in Abhängigkeit von der jeweiligen Fördermenge, d.h. mit der Drehzahl, ändert.
- Der **Saugdruck** ist eine charakteristische Grösse einer Pumpe, die optimalen Betrieb gewährleisten soll, womit eine Forderung an den externen Druck des Fördermediums im Zulauf gestellt wird. Ist der Saugdruck einer Pumpe grösser als der zulaufseitige Druck der zu transportierenden Flüssigkeit, kann sich sogenannter Hohlzog entwickeln, der unerwünscht ist und sogar zu Schäden führen kann.

Für die energieoptimale Auslegung einer Förderanlage hat man in einem Druck/Fördermengen-Diagramm grundsätzlich zwei Charakteristika zu unterscheiden. Die eine ist die Pumpencharakteristik die von den physikalischen Eigenschaften der Pumpe abhängt. Die andere Charakteristik ist durch das System vorgegeben und von Parametern wie Leitungslänge, Leitungsdurchmesser oder Anzahl und Position von Kniestücken oder Verzweigungen abhängig. Im natürlichen Betriebspunkt, dem Schnittpunkt beider Charakteristika des Druck/Fördermengen-Diagrammes, werden die Anlagen-Druckverluste durch einen entsprechenden Pumpendruck gerade aufgehoben. Liegt dieser natürliche Betriebspunkt jedoch abseits eines gewünschten Betriebspunktes, so ist eine Anpassung vorzunehmen. Für Anlagen in der Praxis sind meist veränderliche Fördermengen zu bewältigen, was zusätzliche Eingriffe ins System erfordert.

Eine simple und daher häufig verwendete Methode ist die ablaufseitige Drosselung des Förderstromes mit Schiebern oder Ventilen, was eine Änderung der Anlagen-Charakteristik, wie im Druck/Fördermengen-Diagramm gezeigt, bewirkt.

Bild 8.6 zeigt eine Anlagen-Charakteristik im gedrosselten Betrieb, für die die Tatsache festzuhalten ist, dass sich bei Verringerung des Förderstromes der ablaufseitige Pumpendruck erhöht.

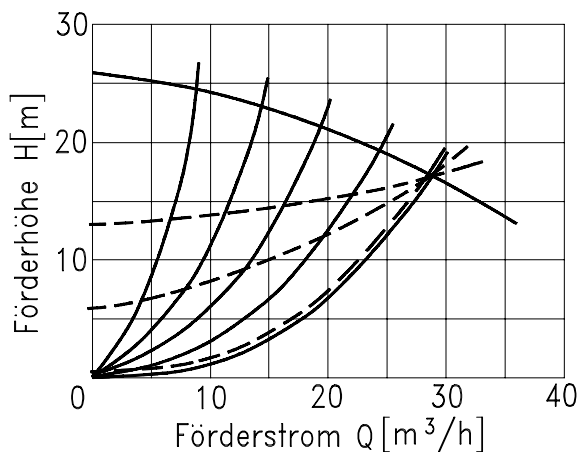


Bild 8.6: Kennlinien für Drosselbetrieb und bei Drehzahlregelung

Im Vergleich dazu ist die energetisch günstigere Methode gestrichelt eingetragen, der drehzahlvariable Pumpenantrieb, wonach sich die Pumpencharakteristik des Druck/Fördermengen-Diagramms je nach Drehzahl wie dargestellt ändert.

Die veränderte Pumpen-Charakteristik kann aufgrund der bereits früher angegebenen Strömungsgesetze vorhergesagt werden. Eine wichtige Eigenschaft dieser Methode ist die Tatsache, dass sich der Pumpendruck bei Verringerung der Fördermenge ebenfalls reduziert.

Um den qualitativen Unterschied dieser beiden Methoden hinsichtlich energieoptimaler Auslegung aufzuzeigen, wird das folgende praktische Beispiel durchgerechnet [4].

Nach **Bild 8.9** ist die Pumpen-Charakteristik einer 355mm Radialpumpe für die Nenndrehzahl 1150 1/min gegeben. Die Pumpe speist gemäss Lastprofil des **Bildes 8.7** eine Warmwasseranlage mit 20m Förderhöhe und 90 l/s = 324 m³/h Fördermenge.

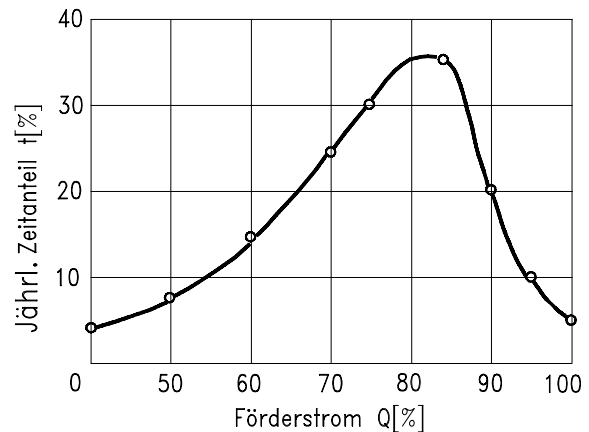


Bild 8.7: Lastprofil

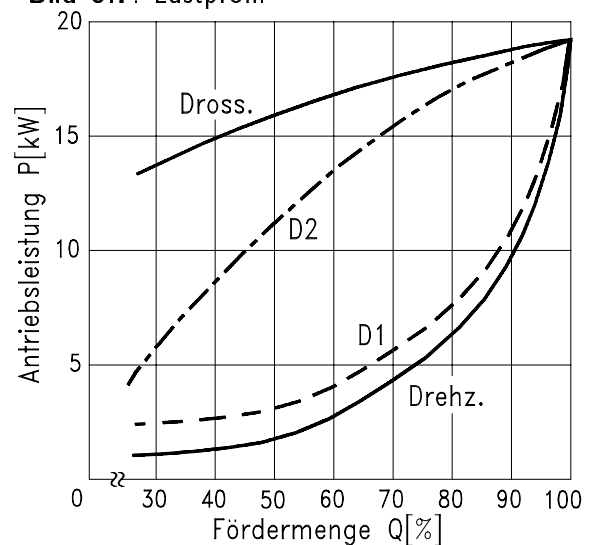


Bild 8.8: Antriebsleistungen im Drosselbetrieb und bei Drehzahlvariation

Die Anlage wird zunächst ohne statischen Förderdruck ($D1 = 31\%$, $D2 = 63\%$) betrachtet. Aus der gegebenen Pumpen-Charakteristik kann man die im **Bild 8.8** graphisch dargestellte Antriebsleistung mit der bei Drosselung angenommenen äquivalenten Reduzierung der Fördermenge erhalten.

Die für einen drehzahlvariablen Antrieb benötigten Antriebsleistungen können wegen der direkten Proportionalität von Fördermenge und Drehzahl sowie der kubischen Proportionalität von Antriebsleistung und Drehzahl aus den Strömungsgesetzen $Q \sim n$ und $P \sim n^3$ abgeleitet werden.

Im **Bild 8.8** ist für beide Methoden die für eine prozentuale Fördermenge benötigte prozentuale Antriebsleistung dargestellt. Somit können die in der zweiten Hauptspalte der **Tabelle 8.4**

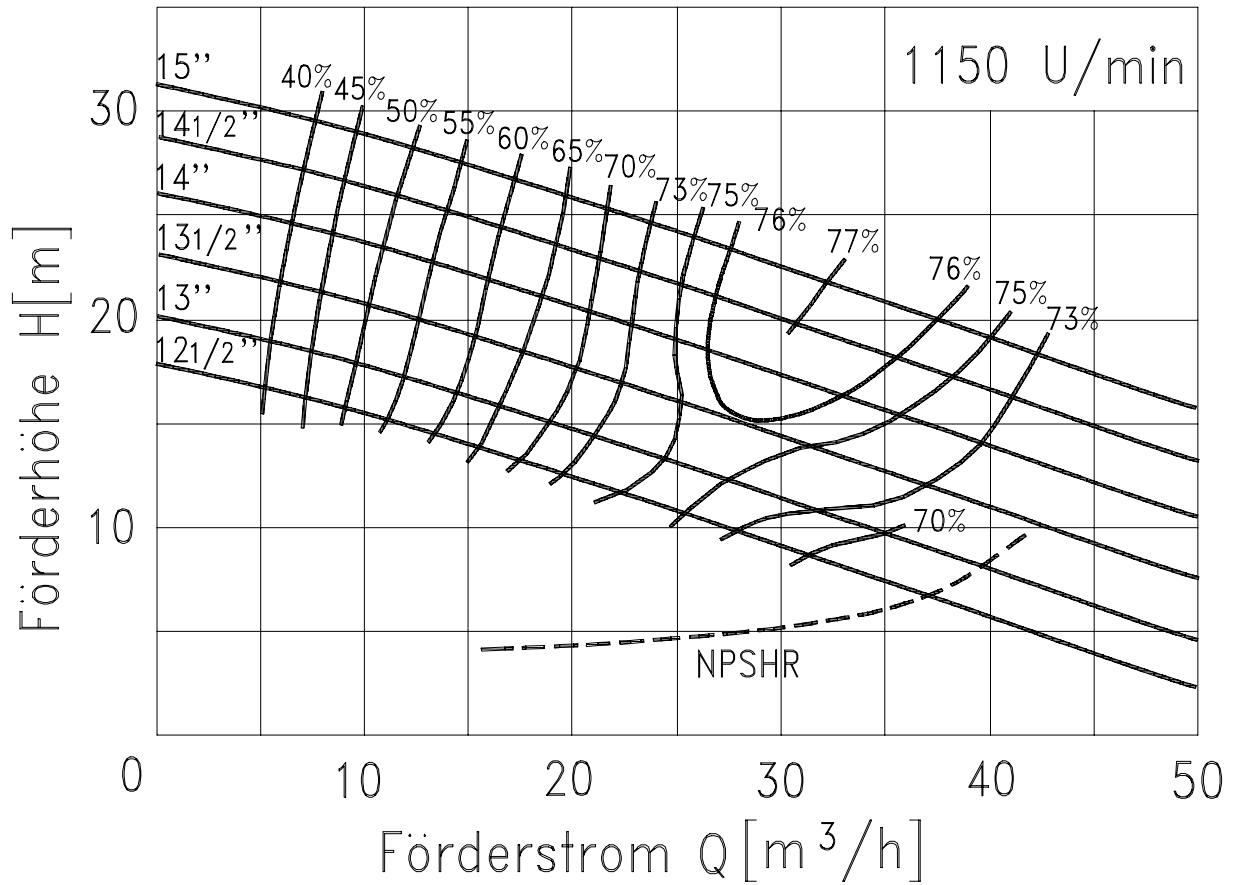


Bild 8.9: Pumpen-Charakteristik

Förder- menge %	Zeitanteile jährlich		Dross. / Drehz.		D1 / Drehz. $H = 31\%$		D2 / Drehz. $H = 69\%$	
	h	%	%	% h	%	% h	%	% h
100	420	5	—	—	—	—	—	—
96	840	10	14.7	12 384	0.7	588	2.5	2 100
83	2 940	35	45.7	134 358	1.8	5 292	7.3	21 462
76	2 520	30	51.7	143 892	1.8	4 536	8.8	22 176
59	1 260	15	68.0	85 680	1.4	1 764	10.7	13 482
42	420	5	63.0	26 460	0.8	336	6.4	2 688
	8 400			402 738		12 516		61 908

Tabelle 8.4: Energieeinsparung Drosselung/Drehzahlregelung

eingetragenen Verhältnisse der Antriebsleistungen unter Berücksichtigung des durchschnittlichen jährlichen Lastprofils berechnet werden. Es ergibt sich bei Verwendung eines drehzahlvariablen Antriebes gegenüber der Drosselung die beachtliche Energieeinsparung von $402738 : 8400 = 48\%$. Für eine genauere Rechnung müssen sowohl der Wirkungsgrad der Pumpe als auch der Wirkungsgrad des Motors berücksichtigt werden.

Energieeinsparungen hängen demnach entscheidend von der Zeit ab in der die Pumpe eine gewisse Förderleistung erbracht hat. Der Betrieb mit 60% der Gesamtfördermenge über eine bestimmte Betriebszeit hat eine höhere Energieeinsparung zur Folge als der Betrieb mit 80% der Gesamtfördermenge über den gleichen Zeitraum.

8.3 Energienutzung durch rückwärtslaufende Kreiselpumpen

Die effektive Nutzung der in Flussläufen, Staustufen und technischen Anlagen wie z.B. Fernwasserleitungen vorhandenen regenerativen Wasser-Energiepotentiale nach **Bild 8.10**, wird aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen immer dringender. Zur Erzeugung von elektrischer Energie setzt man heute auch rückwärtslaufende Kreiselpumpen im Turbinenbetrieb ein. Zu den energiereichsten technischen Anlagen gehören Fernleitungen der Trink- und Brauchwasserversorgung sowie Fernleitungen für Erdöl, Kraftstoffe und der Wärmeversorgung.

Beispiel: Energiegehalt einer Fernwasserleitung

Eine Trinkwasser-Fernleitung mit Rohren von 1.0 – 1.2m Durchmesser verfügt im Durchschnitt auf einer Länge von 430km über einen Rauminhalt von $410000m^3$. Bei einem mittleren Überdruck von 0.9Mpa beträgt der Energiegehalt der Fernwasserleitung $300.6GJ = 83.5MWh$. Ein beträchtlicher Teil dieser Energie kann bei der Entspannung für die Wasserspeicherung, die Wassermischung oder die Einspeisung in das elektrische Versorgungsnetz durch rückwärtslaufende Kreiselpumpen gewonnen werden.

Für die Bewertung der Nutzungsfähigkeit des Was-

serenergiepotentials einer Trinkwasser-Fernleitung ist der Durchfluss-Volumenstrom Q und die Gefällhöhe H , bzw. die Druckdifferenz Δp , massgebend. Mit Hilfe der Beziehung

$$P_A = g\rho QH = Q\Delta p$$

g = Erdbeschleunigung

ρ = spezifische Dichte [kg/m^3]

lässt sich die theoretische Anlagenleistung P_A berechnen.

Bewertungskriterien für die Nutzungsfähigkeit der Wasser-Energiepotentiale sind:

- **Erreichbare Anlagenleistung**, die unter Berücksichtigung der spezifischen Energiekosten sowie des Energieerlöses $5kWh$ nicht unterschreiten sollte.
- **Erforderliche Investitionskosten** für die Maschinenausrüstung, Anlagenteile und Bauausrüstung.
- **Spezifische Investitionskosten**, welche die auf die Nutzungsdauer bezogene Summe der finanziellen Aufwendungen berücksichtigen.
- **Spezifische Elektro-Energiekosten** sollten $0.7 - 1.5Rp/kWh$ erreichen die damit beträchtlich unter denen von Kohle- und Kernkraftwerken ($15 - 20Rp/kWh$) liegen

Praktisch bewährt haben sich die im **Bild 8.11** gezeigten Antriebsschaltungen für rückwärtslaufende Kreiselpumpen (RLP) die einen wirtschaftlichen Betrieb gewährleisten.

Eine RLP im Turbinenbetrieb mit direkter Kopplung an eine Kreiselpumpe ist im **Bild 8.11a** dargestellt. **Bild 8.11b** zeigt eine RLP zur Elektroenergieerzeugung mit starrer Kopplung der Asynchronmaschine im Generatorbetrieb. Die übersynchrone Generatordrehzahl n ist dabei konstant. Für dieses Antriebskonzept ist weiterhin ein Tachogenerator und eine Netzschalteinrichtung bei starrer Netzkopplung vorzusehen. Dagegen ist im **Bild 8.11c** eine RLP zur Elektroenergieerzeugung mit elastischer Kopplung der Asynchronmaschine im Generatorbetrieb dargestellt. Frequenzumrichter

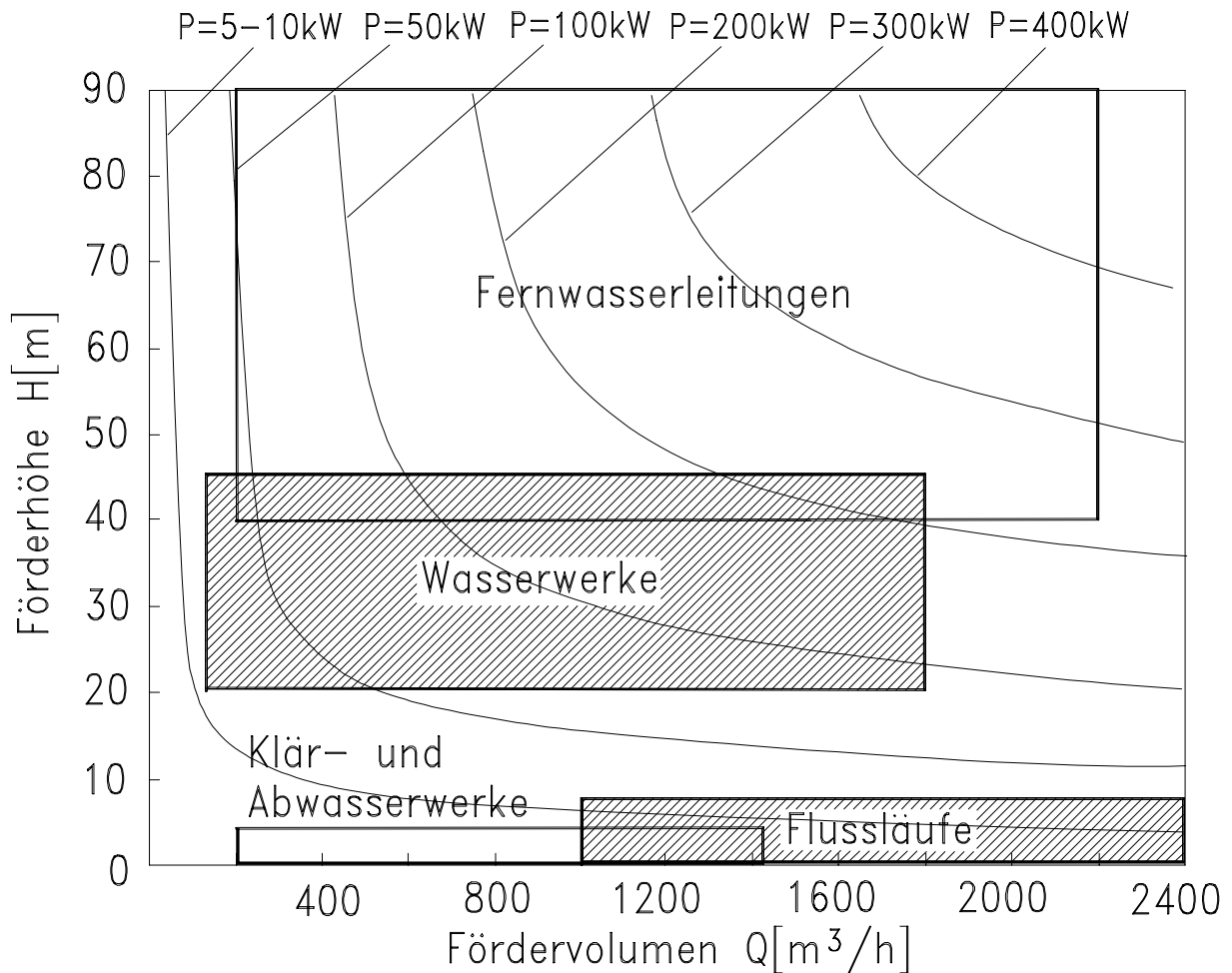


Bild 8.10: Erreichbare Leistungen technischer Wasseranlagen

ermöglichen eine variable Generatordrehzahl n , womit die Anpassung der Anlage bei Schwankungen des Durchflussvolumens möglich ist.

Im **Bild 8.12** und im **Bild 8.14** sind Betriebskennlinien von RLP gezeigt, für die folgenden Besonderheiten zu beachten sind:

- Das Turbinenkennfeld $H_T = H_T(Q, n)$ erstreckt sich nicht über den gesamten Quadranten des Kennfeldbereiches, wie im normalen Pumpenbetrieb bei positiver Drehrichtung.
- Beim Überschreiten der Leerlaufkennlinie arbeitet die RLP im Bremsbetrieb und muss deshalb angetrieben werden.

In der Praxis ändert sich der Druck in Wasserversorgungsanlagen während einer Betriebsperiode ziemlich stark, womit sich die Betriebsparameter

der RLP im Turbinenbetrieb ebenso ändern. Die Folge davon ist eine verminderte Leistungsausbeute der Anlage. Um bei variablen Anlagenparametern einen optimalen Betrieb zu gewährleisten, wird die Asynchronmaschine im Turbinenbetrieb mittels Frequenzumrichter an das Netz gekoppelt. Dieser wird gemäß **Bild 8.13** als Stromzwischenkreisumrichter im 4-Quadranten Betrieb geschaltet und ermöglicht über einen netzgeführten Gleichrichter die Energieeinspeisung in das Netz. Damit kann das Turbinenaggregat auf die optimale Betriebsdrehzahl eingestellt werden.

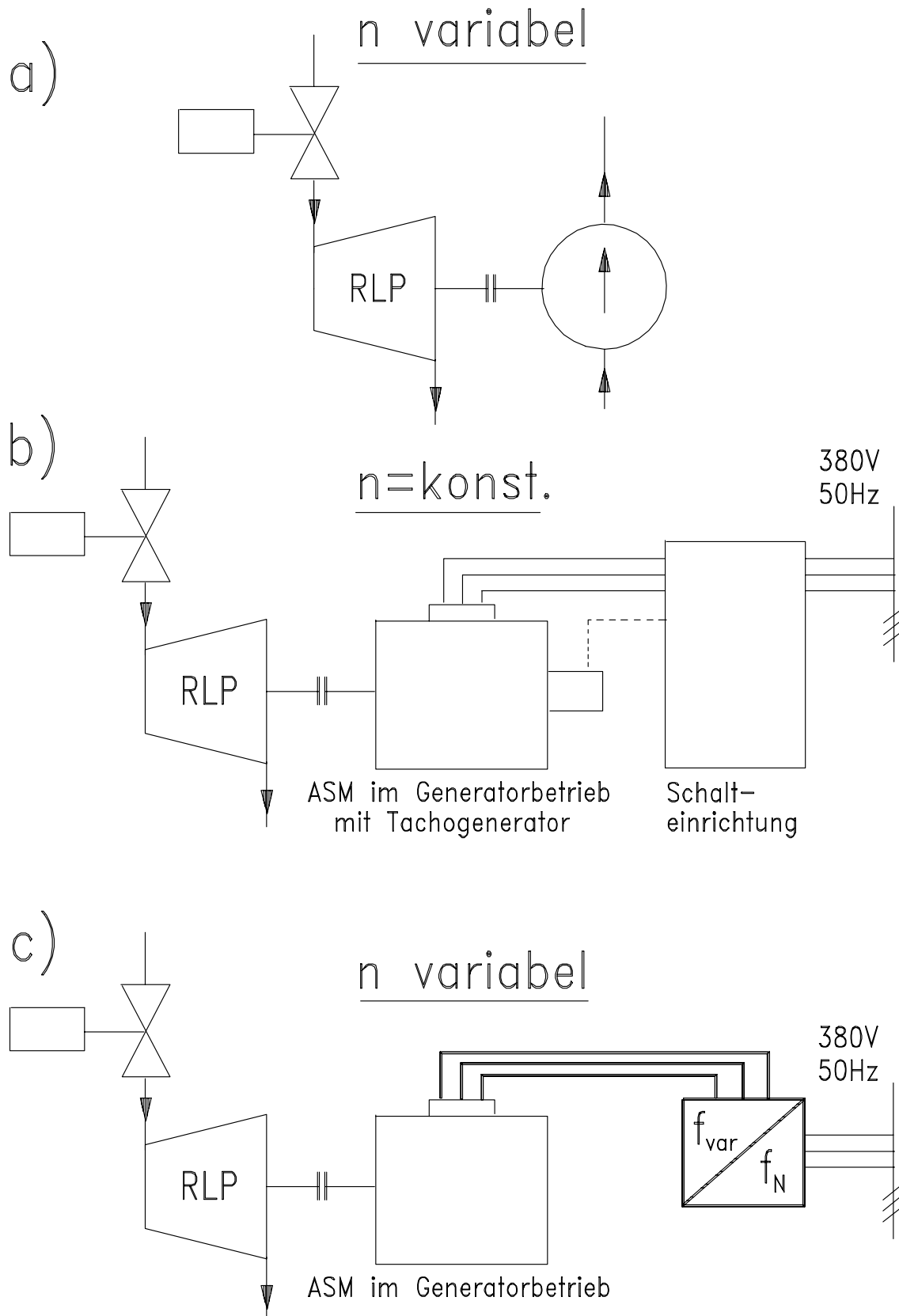


Bild 8.11: Praktische Antriebskonzepte von rückwärtslaufenden Kreiselpumpen

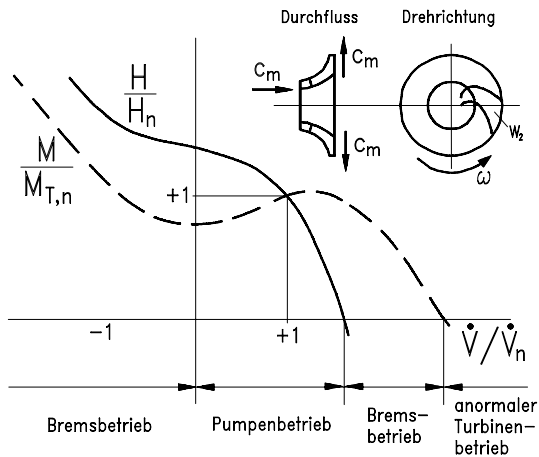


Bild 8.12: RLP-Betrieb bei positiver Drehrichtung: Durchfluss vom Lauf-radinnendurchmesser zum Aussendurchmesser

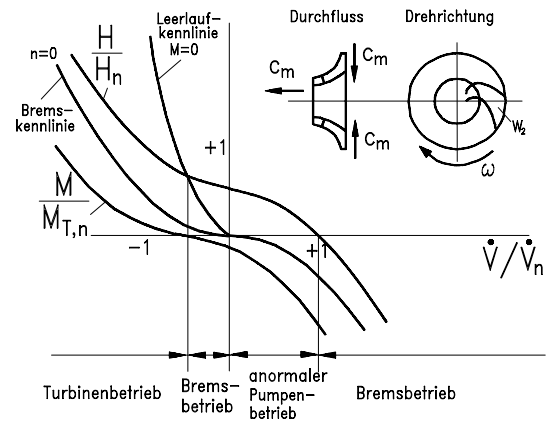


Bild 8.14: RLP-Betrieb bei negativer Drehrichtung: Durchfluss vom Lauf-radaussendurchmesser zum Innendurchmesser

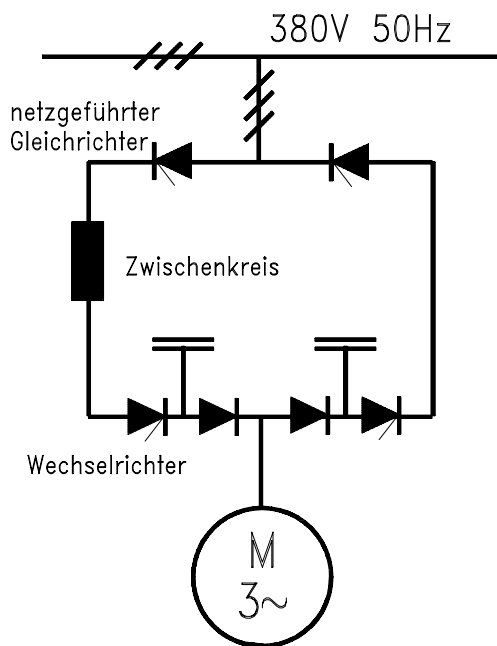


Bild 8.13: Stromzwischenkreisumrichter

9 Spezielle Probleme umrichter gespeister Antriebe

Grundsätzliches:

- **Bedingt durch zusätzliche Schaltbeanspruchungen unterliegt der umrichter gespeiste Asynchronmotor einer höheren Belastung, was sich hauptsächlich in frequenzabhängigen Zusatzverlusten und drehzahlabhängigen Geräuschen wieder spiegelt.**
- **Der sich ständig erweiternde Einsatz von Frequenzumrichtern verlangt die genaue Kenntnis der verschiedenen Umrichter-Schaltungen, deren Einsatzmöglichkeiten sowie deren Einflüsse auf die Motoren und das Speisernetz.**
- **Durch die verschiedenen Möglichkeiten der Blindleistungskompensation, durch steuerungstechnische Massnahmen und der gezielten Anwendung von Saugkreisen und Filtern, können Zusatzverluste, Netzbelastungen und Spannungsverzerrungen reduziert werden.**

9.1 Umrichter für elektrische Antriebe

9.1.1 Leistungshalbleiter

Was die technischen Möglichkeiten betrifft, mit denen heute elektrische Antriebe drehzahlvariabel ausgelegt werden können, so stehen bedingt durch die stürmische Entwicklung der letzten Jahre auf dem Gebiet der Halbleitertechnik die unterschiedlichsten Möglichkeiten zur Verfügung [13]. Hat man sich aber für eine bestimmte Variante der Drehzahlregelung eines Antriebes entschieden, so beeinflusst sie in der Regel die gesamte Betriebscharakteristik des Antriebes.

Obwohl die verschiedenen klassischen Methoden der Drehzahlregelung bei elektrischen Antrieben, wie z.B. der geregelte Gleichstromantrieb, Schleifringläufermotoren, Wirbelstromkupplungen oder die Veränderung der Drehzahl mit mechanischen

Mitteln wie Treibriemen etc. noch vielfältig genutzt werden, wird in diesem Kapitel nur auf die Methode der Regelung der Versorgungs-Spannung durch Veränderung der Speisefrequenz eingegangen. Damit kann eine weitgehend verlustlose Drehzahlsteuerung erreicht werden. Geeignete Stellglieder, welche die kontinuierliche Einstellung der Amplitude und Frequenz der Speisespannung ermöglichen, sind die zu mehr oder weniger komplizierten Schaltungen kombinierten Leistungshalbleiter, dessen Leistungsbereiche im **Bild 9.1** graphisch dargestellt sind.

Thyristoren (Thyratron - Transistor), die grössten steuerbaren Leistungshalbleiter, lassen sich in die zwei Hauptgruppen unterteilen:

- Einschaltthyristoren (nur einschaltbar) mit Schaltleistungen bis zu 20 MVA .
- Abschaltthyristoren (ein- und ausschaltbar), sogenannte GTO's (Gate-Turn-Off Thyristor), mit kritischen Spannungen bis 4.5 kV und abschaltbaren Strömen von 3 kA .

Der IGBT (Insulated-Gate-Bipolar- Transistor), eine jüngere Entwicklung in der Familie der Leistungshalbleiter, wird für den mittleren Leistungsbereich mit Sperrspannungen von 1.2 kV und Maximalströmen bis zu 400 A eingesetzt.

MOSFET's (Metall-Oxid-Silizium- Feld-Effect-Transistor) sind die schnellsten Leistungshalbleiter-Bauelemente im Bereich von $50\text{ V}/200\text{ A}$ bis $1000\text{ V}/5\text{ A}$.

Im folgenden wird auf die am häufigsten verwendeten Leistungshalbleiter-Schaltungen eingegangen und deren Vor- und Nachteile gegenübergestellt.

9.1.2 Frequenzumrichter

Antriebs-Steuermodule mit der die Drehzahl durch Variation der Speisefrequenz gesteuert werden kann, werden Frequenzumrichter oder Inverter genannt. Sie sind speziell für Asynchronmotoren geeignet und für Antriebsleistungen von Bruchteilen eines Kilowatts bis zu 1000 kW ausgelegt. Von

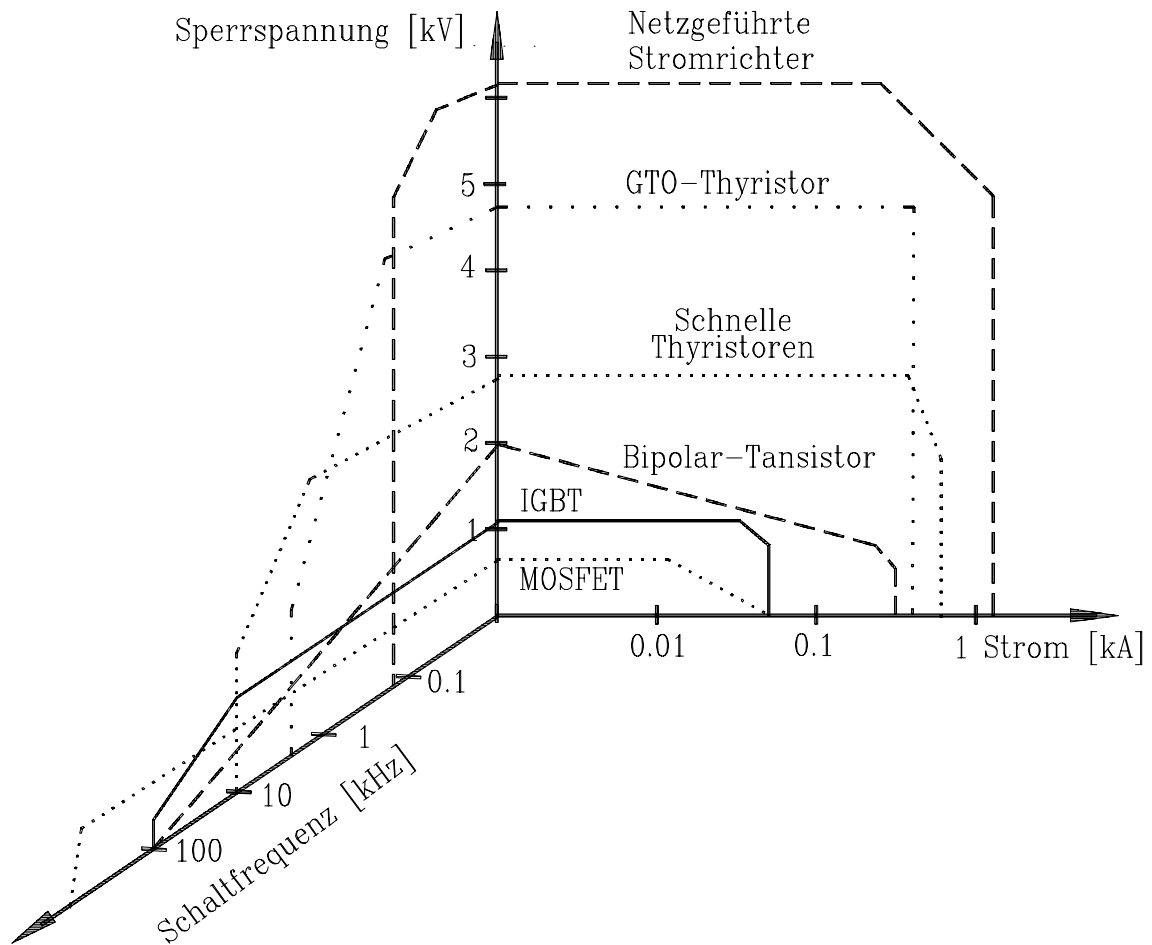


Bild 9.1: Halbleiter-Leistungsbereiche

grossen Vorteil ist, dass zu einer bereits existierenden Anlage nur die Installation eines geeigneten Frequenzumrichters notwendig ist, um sie drehzahlvariabel auszustatten. Dieser lässt sich zudem noch so einbauen, dass grössere Eingriffe in die existierende Anlage vermieden werden können.

Frequenzumrichter prägen dem Motor, neben dem für die Drehmomentbildung notwendigen Grundschwingungssystem, Spannungs- bzw. Stromober-schwingungen ein, welche zusätzliche Beanspruchungen der Motoren zur Folge haben. Diese sind:

- Zusätzliche Spannungsbeanspruchung des Isolationssystems, der Anschlussklemmen und der zündichten Leitungsdurchführungen.
- Zusätzliche mechanische Beanspruchung durch Drehmomentpulsation.
- Zusätzliche Verluste und thermische Beanspruchungen.
- Zusätzliche Schwingungsbeanspruchungen, wel-

che den Geräuschpegel erhöht

Zur Drehzahlregelung von Antriebsmotoren wird eine steuerbare Gleich- oder Wechselspannung benötigt, die heute fast ausschliesslich mit Stromrichter-Schaltungen erzeugt wird. Wie **Bild 9.2** zeigt, unterscheidet man dabei bezüglich der Einsatzmöglichkeiten die zwei Hauptgruppen, auf die nachfolgend im Detail eingegangen wird.

A) Direktstromrichter

Beim Direktstromrichter stehen die Leiter des Primärnetzes mit jenen des Sekundärnetzes über steuerbare Halbleiterventile jederzeit in direkter Verbindung. Die gewünschte Spannung und Frequenz auf der Lastseite wird so erzeugt, dass sich durch Zuschalten mittels einzelner Stromrichter in den drei Phasen die gewünschte Spannung aus den Abschnitten der netzseitigen Spannung zusammensetzt. Bei 50 Hz Netzfrequenz lassen sich mit

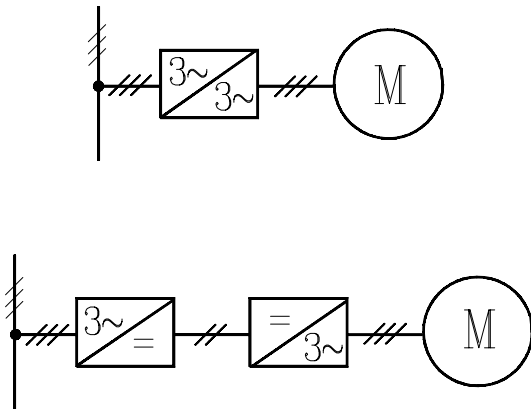


Bild 9.2: Stromrichter Hauptgruppen

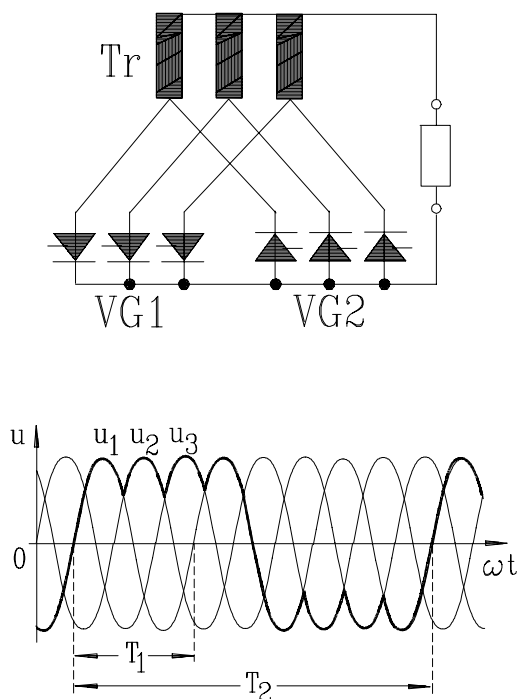


Bild 9.3: Direktstromrichter

diesem Stromrichtertyp ausgangsseitig Frequenzen von 15 Hz bis 40 Hz erzeugen.

Bei gleicher Schaltung im Leistungsteil gibt es verschiedene Möglichkeiten für die Steuerung der Ventile eines Direktstromumrichters

a) Trapezumrichter (Hüllkurvenumrichter)

Gemäss Bild 9.3 werden die Ventilgruppen VG1 und VG2, die pro Phase des Sekundärnetzes die beiden entgegengesetzten Stromrichtungen erzeugen, im Takt der gewünschten Sekundärfrequenz voll angesteuert.

b) Steuerumrichter (vorzugsw. für 3ph-Antriebe)

Der Steuerwinkel α des jeweils stromführenden Teilstromrichters einer Sekundärphase wird durch Phasenanschnitt kontinuierlich so verstellt, dass sich der Mittelwert der Sekundärspannung zeitlich sinusförmig ändert.

Die gemeinsamen Eigenschaften beider Varianten des Direktstromrichters sind:

- Primärnetz-geführte Kommutierung ist möglich, daher kein Aufwand für Zwangslöschung der Ventile erforderlich.
- Die Sekundärfrequenz f_2 ist mit Rücksicht auf die Kurvenform der Sekundärspannung auf maximal 50 % (abhängig von der Pulszahl der Stromrichter) der Primärfrequenz beschränkt. Beim Steuerumrichter würde bei zu hohen Sekundärfrequenzen die "mittlere Totzeit" (Zeit zwischen Zündimpuls und Stromübernahme eines Ventils) zu stark schwanken.
- Nur für grosse Leistungen wirtschaftlich, wegen der hohen Anzahl von Ventilen (für ein 3-phasiges Sekundärnetz und je einen Umkehrstromrichter in Brückenschaltung pro Strang sind mindestens $3 \times 2 \times 6 = 36$ Ventile nötig).

Der Netzstrom von Direktumrichtern enthält neben dem Grundschwungsanteil noch eine Vielzahl von Oberschwingungsströmen, die aufgrund vorhandener Netzimpedanzen Oberschwingungsspannungen hervorrufen, welche die ursprünglich sinusförmige Netzspannung verzerren.

Wegen des mit ansteigender Sekundärfrequenz wachsenden Oberschwingungsgehaltes der Spannungen sowie des ansteigenden Blindstrombedarfes, ist die Sekundärfrequenz auf den Bereich $f_2 \leq 0.8 f_1$ (f_1 = Speisefrequenz) beschränkt.

Die dem Direktumrichter eigene Abhängigkeit der maximal ausnutzbaren Ausgangsfrequenz f_2 von der primären Netzfrequenz f_1 , kann beseitigt werden, in dem ein Wechselrichter dem durch Gleichrichtung erzeugten Gleichspannungsnetz mit Glättungseinrichtung nachgeschaltet wird.

B) Zwischenkreisstromrichter

Von wenigen Ausnahmen abgesehen werden heute Frequenzumrichter mit einem Zwischenkreis für die

Speisung von Drehstrom-Asynchronmotoren vorgesehen. Zwischenkreisumrichter zeichnen sich dadurch aus, dass zwei Stromrichter über einen Gleichstrom- oder Gleichspannungszwischenkreis gekoppelt sind. Grundsätzlich wird dabei von einem netz- oder lastseitigen Stromrichter gesprochen. Im Motorbetrieb arbeitet der netzseitige Stromrichter als Gleichrichter und der maschinenseitige Stromrichter als Wechselrichter.

Zwischenkreisstromrichter sind die am häufigsten eingesetzten Stromrichter, da sie sowohl für maschinenseitige Frequenzen über 50Hz geeignet sind, als auch für grosse Leistungen (bis 1000kW) ausgelegt werden können.

B1: I-Zwischenkreis Umrichter

Ist nur ein Einzelmotor mit veränderlicher Frequenz zu speisen, so ist es von Vorteil, den Strom des Zwischenkreises ZK zu glätten. Wie die Prinzipskizze des **Bildes 9.4** zeigt, wird dazu ein gesteuerter Netzgleichrichter GR eingesetzt,

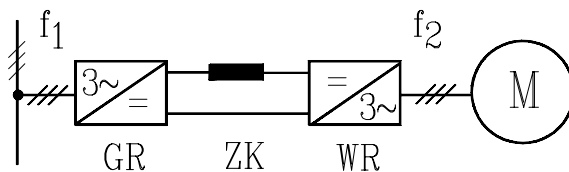


Bild 9.4: Prinzipdarstellung I-Umrichter

wobei der Ausgangsstrom des Wechselrichters WR , wie **Bild 9.5** zeigt, im einfachsten Falle aus Gleichstromblöcken wechselnder Vorzeichen besteht.

Merkmale des I-Umrichters

- Die Sekundärfrequenz f_2 ist von der Primärfrequenz f_1 unabhängig.
- Der netzseitige Stromrichter kommutiert netzgeführt und wird zwecks Regelung des Zwischenkreisstromes gesteuert ausgeführt.
- Der Wechselrichter kann lastgeführt oder selbstgeführt kommutieren. Die Schaltungen für selbstgeführte Kommutierung sind im Aufbau einfacher als beim U-Umrichter.
- Durch die Aussteuerung des netzseitigen Stromrichters in den Wechselrichterbetrieb ist eine Umkehr der Zwischenkreisspannung möglich, so dass bei fester Stromrichtung mit nur einem

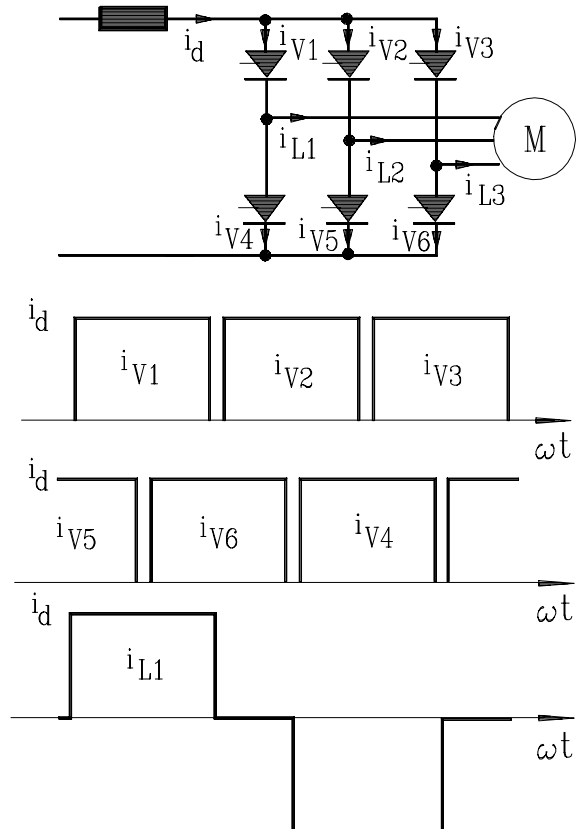


Bild 9.5: Umrichter mit eingprägtem Zwischenkreisstrom

Einfach-Stromrichter beide Energierichtungen gefahren werden können.

- Wegen des eingprägten Verbraucher-Stromes eignet sich die Schaltung nicht für Parallelbetrieb mehrerer Motoren.

Vorteile :

- Der maschinenseitige Umrichter kommutiert netzgeführt, wenn als Motor eine Synchronmaschine (SM) verwendet wird.
- Mit der SM wird ein guter Wirkungsgrad mit Werten bis zu 90 % bei voller Last und hoher Drehzahl erzielt.
- Sollte der I-Umrichter im Störfall versagen, kann der Betrieb direkt über die Hauptleitung aufrechterhalten werden.
- Überlast bei Antrieben mit hohem Masenträgheitsmoment kann durch ein geführtes Verhalten des I-Umrichters vermieden werden.
- Die Stromregelung begrenzt auch Fehlerströme, so dass der Schaden bei Überlast oder Kurzschluss gering bleibt.

Nachteile :

- Bei der Speisung von ASM treten im Rotor hohe Zusatzverluste auf, wenn keine lastseitige Filterung vorgesehen ist.
- Zur Verarbeitung des Drehzahl-Istwertes wird ein Tachogenerator benötigt.
- Falls während des Betriebes das Signal des Tachogenerators ausfällt, kann ein Hochlauf bis zur Höchstdrehzahl erfolgen.
- Der I-Umrichter ist der Betriebscharakteristik des Motors anzupassen. Wird im Störfall ein Motor gleicher Leistung jedoch eines anderen Herstellers eingesetzt, oder wird ein Motor des gleichen Typs aber unterschiedlicher Nennleistung verwendet, so ist normaler Betrieb meist nicht mehr gewährleistet.
- Der I-Umrichter kann nicht ohne den dazugehörigen Antriebsmotor getestet werden.
- Das Steuerprinzip des I-Umrichters basiert auf einer phasengeregelten Gleichrichterbrücke, womit bei niedrigen Drehzahlen ein geringer Leistungsfaktor einhergeht.
- Die Hauptkomponenten des I-Umrichters, wie Drosseln etc., bestimmen die Gesamtbaugröße.
- Da die gesamte Antriebsleistung über den Umrichter läuft, müssen die einzelnen Umrichter-Komponenten leistungsgemäss ausgelegt sein.

B2: U-Zwischenkreis Umrichter

Dieser besteht im einfachsten Falle, wie die Prinzipskizze des **Bildes 9.6** zeigt, aus einem gesteuerten oder ungesteuerten netzseitigen Gleichrichter *GR* und einem lastseitigen Wechselrichter *WR* mit Gleichspannungsblöcken wechselnder Vorzeichen im Zwischenkreis *ZK*, gemäss **Bild 9.7**.

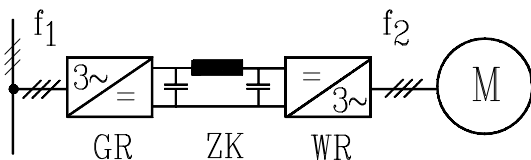


Bild 9.6: Prinzipdarstellung U-Umrichter

Dabei ist das Sekundärnetz vom Primärnetz vollständig entkoppelt. Daher ist die Frequenz f_2 durch entsprechende Taktung der Ventile beliebig wählbar (Begrenzung: Kommutierung, Freierzeit, Verluste). Der netzseitige Gleichrichter

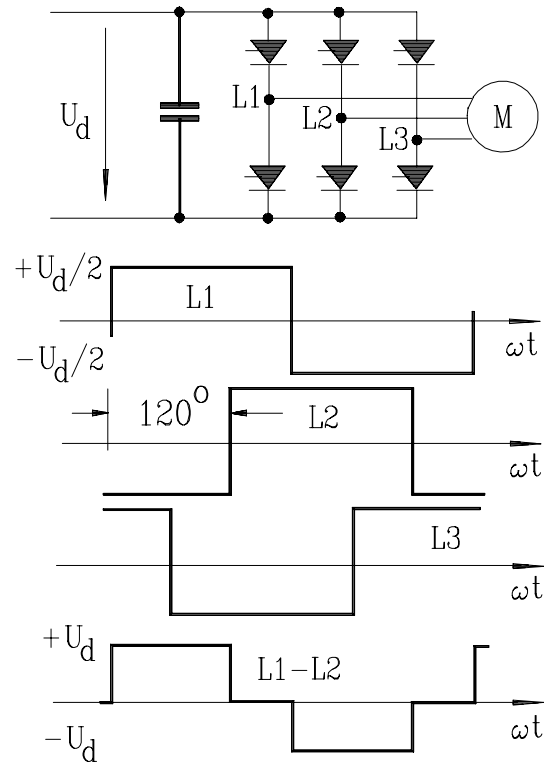


Bild 9.7: Umrichter mit eingepprägter Zwischenkreisspannung, Vollblockaussteuerung

kommutiert netzgeführt und kann daher ungesteuert (Diodengleichrichter) oder gesteuert sein (Zwischenkreisspannung konstant oder einstellbar). Die Kommutierung des Wechselrichters kann maschinengeführt erfolgen, wenn eine übererregte Synchronmaschine gespeist wird. Für die Speisung einer Asynchronmaschine ist fremdgeführte Kommutierung mit entsprechendem Aufwand für Zwangslöschung der Ventile und für die Steuerung erforderlich. Da die Verbraucher-Spannung eingepragt ist, eignet sich diese Schaltung besonders für die Parallelspeisung mehrerer Motoren.

Beim U-Umrichter können für den Wechselrichter zwei Ansteuermöglichkeiten genutzt werden:

- die **Vollblockaussteuerung** und
- die **pulsbreitenmodulierte Aussteuerung**.

a) Vollblockaussteuerung

Bei der **Vollblockaussteuerung** sind die Zündimpulse um 120° phasenverschoben. Die Maschinenspannung besteht aus Rechteckblöcken mit einer

Breite von 120° (vgl. **Bild 9.7**) und der Spannungsamplitude U_d , welche von der Zwischenkreisspannung bestimmt wird.

Da im Nennbetriebsbereich der magnetische Fluss im Motor, d.h. das Verhältnis U/f , konstant gehalten wird, muss bei der Vollblockaussteuerung die Zwischenkreisspannung U_d , drehzahl- und lastabhängig, über einen gesteuerten Gleichrichter eingestellt werden.

Bei der Vollblockaussteuerung so wie beim I-Umrichter existieren neben der Grundschiwingung mit der Frequenz f_2 Oberschwingungen, von denen insbesondere die niedrigste Harmonische (mit der Frequenz $6f_2$ bei sechspulsigen Schaltungen) Ursache für Drehmomentpendelungen des Motors sein kann. Abhilfe bringt hier die pulsbreitenmodulierte Aussteuerung.

b) Pulsbreitenmodulierte Aussteuerung

Aus der konstanten Zwischenkreisspannung U_d des **Bildes 9.6**, werden Impulse veränderlicher Breite derart herausgeschnitten, dass die Grundschiwingung dieser Impulsfolge, welche an der Maschinenwicklung anliegt, die gewünschte Frequenz und Amplitude aufweist, wie im **Bild 9.8** verdeutlicht wird. Für die steuerungstechnische Realisierung gibt es z.B. in [18] und [6] zahlreiche Hinweise.

Die gezeigten Rechteckpuls-Spannungen enthalten ebenfalls Oberschwingungen, mit merklichen Amplituden jedoch erst bei höheren Ordnungszahlen, was für die zu speisende Drehfeldmaschine wesentlich ist.

In der Praxis wird die Vollblockaussteuerung im Nennpunkt erreicht und im Feldschwächbereich verwendet.

Vorteile der U-Umrichterspeisung:

- Es können Asynchron-Normmotoren verwendet werden, welche schnell verfügbar, verlässlich und servicefreundlich sind, wobei eine Leistungsreduktion (ca. 25%) beachtet werden sollte.
- Für Testzwecke kann dieser Umrichter ohne Motor betrieben werden.
- Es wird ein guter Wirkungsgrad mit Werten bis zu 90% bei voller Last und hoher Drehzahl erzielt, wenn die Pulsmodulation so erfolgt, dass der Fluss möglichst sinusförmig verläuft.

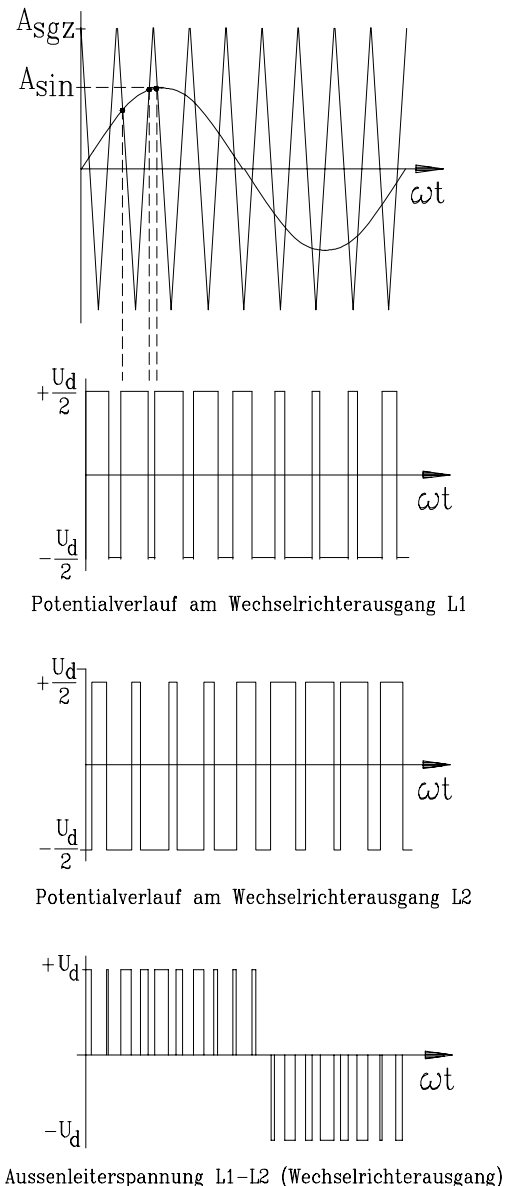


Bild 9.8: Wechselrichter-Ausgangsspannungen bei der pulsbreitenmodulierten Aussteuerung

- Für die Gleichrichtung der Eingangsspannung wird ein Dioden-Gleichrichter verwendet der über den gesamten Drehzahlbereich einen guten Leistungsfaktor gewährleistet.
- Sollte der U-Umrichter im Störfall versagen, kann der Betrieb direkt über die Hauptleitung aufrechterhalten werden.
- Eine Überlast bei Antrieben mit hohem Massenträgheitsmoment kann durch ein geführtes Verhalten des U-Umrichters vermieden werden.

- Es wird kein Tachogenerator benötigt und die Steuereinheit kann in einer gewissen Entfernung vom zu steuernden Antriebsmotor installiert werden.
- Mit diesem Umrichter können mehrere Motoren gleichzeitig betrieben werden, da er solange nicht sensitiv gegenüber Motortyp oder Motorleistung reagiert, solange der gesamte Laststrom den Umrichter-Nennstrom nicht überschreitet.

Nachteile :

- Mit einem Einfachstromrichter netzseitig ist wegen der eingprägten Zwischenkreisspannung Energiefluss nur in einer Richtung möglich. Vierquadrantenbetrieb erfordert daher einen Umkehrstromrichter (also 2 Teilstromrichter mit oder ohne Kreisstrom). Als Behelfslösung für nur kurzzeitigen Bremsbetrieb kommt Beschaltung des Zwischenkreises mit ohmschen Widerständen in Frage. Energierücklieferung ohne eine der beiden Massnahmen führt zum Ansteigen der Zwischenkreisspannung infolge Aufladung der Glättungskondensatoren.
- Die Steuerung dieses Umrichters geschieht mit einer Reihe von komplizierten elektronischen Schaltkreisen. Der Einsatz von LSI-Technik und Mikroprozessoren erlaubt das Einführen einer System-Selbstdiagnose, was jedoch im Störfall wiederum hochqualifiziertes Personal erfordert.

9.2 Maschinenprobleme umrichter gespeister Antriebe

9.2.1 Einführung

Die als elektromechanischer Energiewandler zu verstehende Drehstrom Asynchronmaschine setzt im wesentlichen nur die elektrische Grundschiwungsleistung in mechanische Leistung um. Die nichtgrundschiwungsfrequenten Anteile von Statorstrom und Statorspannung, hervorgerufen durch den Einsatz schneller Leistungshalbleiter, verursachen zusätzliche Verluste und Pendelmomente. Rein gedanklich kann man unter dieser Voraussetzung die Drehstrom-Asynchronmaschine in eine Grundschiwungsmaschine und eine unendliche Zahl von Oberschiwungsmaschinen aufteilen und so die durch Oberschiwungsströme verursachten Verluste und Pendelmomente analysieren.

Oberschiwungsfrequente Strom- und Spannungsanteile führen, wie nachfolgend im Detail erläutert, zu erhöhten elektromagnetischen Geräuschen die über die Maschinenoberfläche abgestrahlt werden, insbesondere dann wenn eine anregende Frequenz mit der mechanischen Resonanzfrequenz der Maschine zusammenfällt.

9.2.2 "Umrichter geeignete" Asynchronmaschine

Der Asynchronmotor ist das wichtigste Element der Antriebstechnik zur Realisierung umrichter gespeister, drehzahlvariabler Antriebe. Dabei stellt sich die Frage, ob der in grossen Mengen, in breiten Leistungsreihen hergestellte Normmotor für Umrichterspeisung geeignet ist oder ob dafür ein Asynchronmotor mit besonderen Eigenschaften erforderlich ist.

Es scheint aber heute schon sicher zu sein, dass eine spezielle Ausführung von Asynchronmotoren für Umrichterspeisung nur in Sonderfällen, wie z. B. für Spindelantriebe mit grossem Drehzahlstellbereich, erforderlich sein wird. Vielmehr werden die für einen frequenzgestellten Betrieb wichtigen Eigenschaften der Normmotoren neu zu definieren, wenn notwendig zu verbessern und dann über die üblichen Eigenschaften des Normmotors hinaus zu garantieren sein.

Insgesamt kann man dann von einem umrichter geeigneten Motor sprechen, wenn er in der Lage ist, die höheren Belastungen zu verkraften, denen ein solcher Motor bei Umrichterspeisung ausgesetzt ist:

- Zusätzliche Verluste und veränderte Kühlungsverhältnisse im spannungs-, frequenz- und drehzahlvariablen Betrieb,
- erhöhter, drehzahlabhängiger Geräuschpegel bei Speisung mit nichtsinusförmigen Spannungen,
- Wicklungs-Impulsspannungsbeanspruchung,
- erweiterter Betriebsbereich, im Anlauf-, Nenn- und Feldschwächbereich.

Wie im **Kapitel 5** schon begründet wurde, setzt die sachgemässe Projektierung eines drehzahlvariablen Antriebes neben der Kenntnis der von Umrichter zu Umrichter unterschiedlichen, im Verlaufe der Entwicklung sich abbauenden Oberwelleneinflüsse,

ein neues thermisches Modell des Motors voraus. Die bisher für Standard-Antriebe benutzten Einkörpermodelle haben sich schon für den drehzahlkonstanten Antrieb als unzureichend herausgestellt. Die verschiedenen drehzahl- und frequenzabhängigen Eigenschaften eines Motors können sie nicht feinfühlig genug widerspiegeln. Besser sind die bereits diskutierten Zwei- oder Dreikörper-Modelle.

Die Eigenschaften des "umrichter geeigneten Asynchronmotors", welche vom Hersteller des Motors, aber auch in Abstimmung mit dem Umrichterhersteller für jeden Typ gemessen und garantiert werden, sind neben den thermischen Zeitkonstanten, die für den sachgemässen Einsatz des Motors bekannt sein müssen,

- die Drehzahlabhängigkeit der Kühlung für den Fall der Eigenbelüftung,
- die Spannungs- und Frequenzabhängigkeit der Eisen- und Wicklungsverluste,
- die Frequenzabhängigkeit der Zusatzverluste,
- die Abhängigkeit der Reibungsverluste von der Drehzahl.

Diese Eigenschaften liegen heutzutage in Form von Dateien für die Projektierungssoftware vor, so wie es im Kapitel 4.3 erläutert wurde.

A) Zusätzliche Stromwärmeverluste

A1: Oberschwingungen im Lastkreis

Der maschinenseitige Stromrichter prägt je nach Auslegung des Zwischenkreises der Last ein Drehspannungs- (U-Umrichter) oder ein Drehstromsystem (I-Umrichter) auf. Stellt man, wie im Bild 9.10 gezeigt, Strom- und Spannungsverläufe des I-Umrichters und des getakteten und gepulsten U-Umrichters gegenüber, so ist daraus ersichtlich, dass die Ströme und Spannungen erheblich von der Sinusform abweichen.

Lediglich im Pulsbetrieb lässt sich mit steigender Pulszahl je Halbwelle immer besser eine ober-schwingungsarme Grundschwingung des Stromes herstellen. Aufgrund der vorhandenen Induktivitäten ist der Strom immer ober-schwingungsärmer als die Spannung.

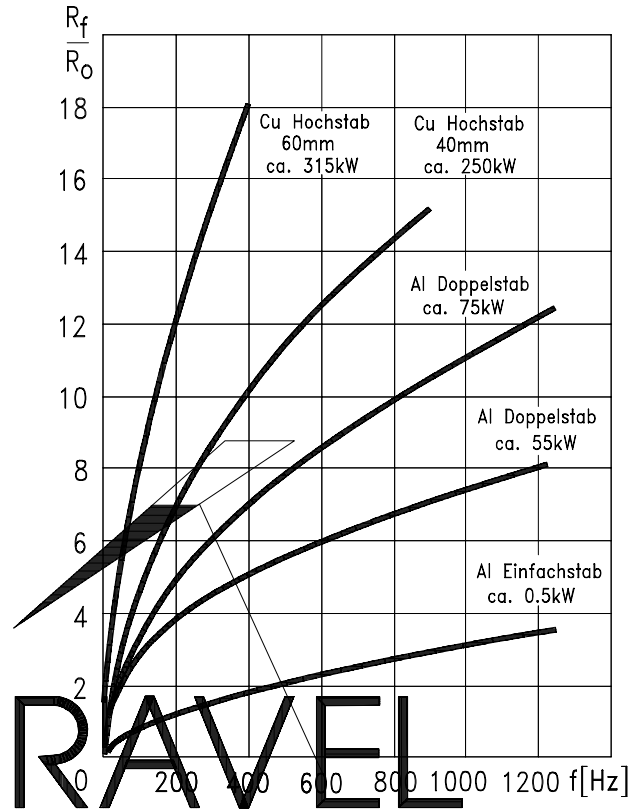


Bild 9.9: Läuferwiderstandserhöhung durch Stromverdrängung in Abhängigkeit der Oberschwingungsfrequenz für verschiedene Nennleistungen und Läuferausführungen.

Oberschwingungsströme erzeugen Verluste, entsprechend den effektiven Widerständen der Wicklungen bei den Frequenzen dieser Oberschwingungen. Oberschwingungsspannungen verursachen eine geringfügige Erhöhung der Eisenverluste, vor allem im Stator.

Während die Statorwicklungswiderstände kleiner und mittlerer Maschinen wegen der kleinen Leiterquerschnitte sehr wenig von der Frequenz abhängig sind, wirkt die Stromverdrängung bei höheren Frequenzen im Läufer von Asynchronmaschinen sehr stark widerstandserhöhend, wie es das Bild 9.9 zeigt.

Nach dem Durchflutungsgesetz sind in einer Asynchronmaschine die Rotorüberschwingungsströme ein Spiegelbild der Statorüberschwingungsströme, unter Berücksichtigung der Drehzahlverhältnisse. Dasselbe gilt auch für die Dämpferwicklungen von Synchronmaschinen d.h., die Rotorüberschwing-

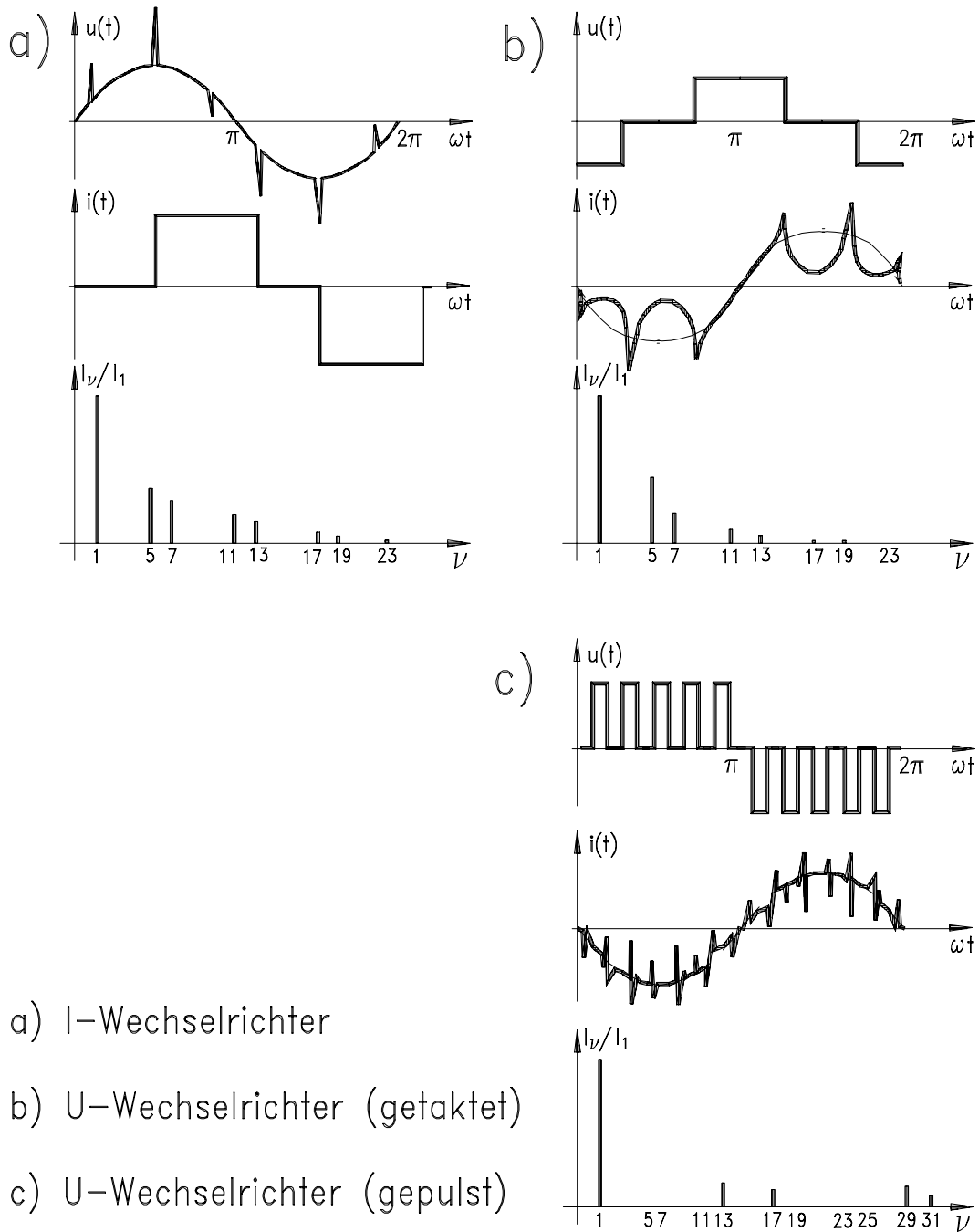


Bild 9.10: Motor Strom- und Spannungsverläufe

ungsströme können beträchtliche, zusätzliche Verluste hervorrufen, welche mit der eigentlichen Funktion der Maschine, der Drehmomentbildung, nicht in Beziehung stehen.

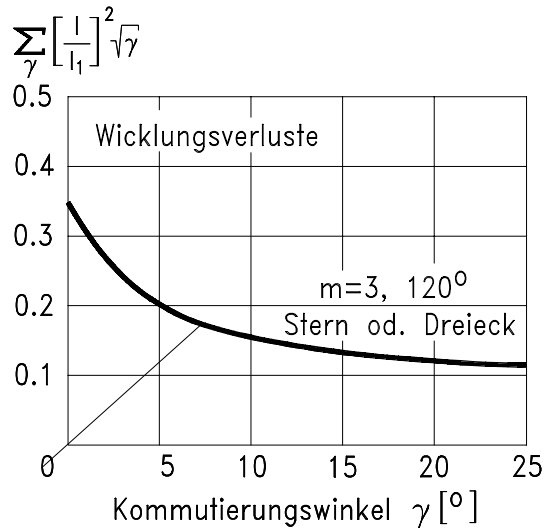


Bild 9.11: Relative Oberschwingungsverluste von Drehstrom Asynchronmaschinen am I-Umrichter

A2: U-Umrichter Verluste

Beim U-Umrichter mit Vollblockaussteuerung und beim I-Umrichter, vgl. **Bild 9.10**, sind die Stromoberschwingungsspektren stark ausgeprägt, dementsprechend gross sind auch die dadurch verursachten Verluste.

Pulsumrichter verursachen im wesentlichen Stromoberschwingungen höherer Ordnungszahlen, entsprechend ihrer Pulsfrequenz welche mit der Wurzel des Frequenzverhältnisses ansteigen. Die Grösse der Oberschwingungsströme wird jedoch von den induktiven Widerständen des Motors bestimmt, so dass deren Amplitude mit steigender Pulsfrequenz sinkt.

Beim I-Umrichter werden die Oberschwingungen durch die Kommütierung vermindert, diejenigen höherer Frequenz werden unterdrückt.

In **Bild 9.11** ist die Summe der relativen Oberschwingungsverluste für Hochstabläufer bei I-Umrichterspeisung in Abhängigkeit des Kommütierungswinkels angegeben. Die Oberschwingungsverluste sinken mit kleiner werdender Belastung des Motors.

B: Schwingungen und Geräusche

Die Schwingungen des Motors hängen von den Nutzahlverhältnissen im Motor, von den anregenden, umrichterbedingten Kraftwellen mit höheren Drehfelddrehzahlen und von dem Schwingungs- und Resonanzverhalten der Magnetkörper, insbesondere des Ständers der Motoren, ab.

Die Gestaltung der Nutzahlverhältnisse lässt keinen grossen Spielraum zur Anpassung an einen Umrichterbetrieb offen. Man kann überdies annehmen, dass aufgrund der guten Berechenbarkeit der magnetischen Geräusche die Leistungsreihen der Asynchronmotoren daraufhin durch Wahl günstiger Nutzahlverhältnisse optimiert wurden.

Bild 9.12 zeigt ein Beispiel für eine solche Berechnung des zu erwartenden Geräuschpegels, und zwar einmal nur mit dem Ziel der günstigen Gestaltung der Magnetkreiskonturen als Berechnung der Abhängigkeit des Geräuschpegels von der Frequenz einer sinusförmig eingespeisten Spannung, und andererseits um den Einfluss unterschiedlicher Umrichtertypen, hier Spannungszwischenkreis (U) - und Stromzwischenkreis (I)- Umrichter erkennen zu können.

Für den umrichter geeigneten Asynchronmotor interessiert vor allem das vom Umrichter unabhängige Verhalten, das sich in einer Schwingungs-Frequenz- Abhängigkeit mit mehr oder weniger stark ausgeprägten Resonanzstellen äussert. Durch solche Berechnungen werden allerdings noch nicht die Einflüsse von Unsymmetrien im aktiven Teil des Motors erfasst. Symmetriestörungen können sein:

- Luftspaltunsymmetrien,
- Nichtkonstanz des Streusteges am Umfang,
- Ungleichmässigkeit der Isolation zwischen Läuferkörper und Aluminiumkäfig (Unregelmässigkeiten des Läuferkäfigs werden ausgeschlossen).

All diese Unsymmetrien führen zu zusätzlichen umlaufenden und gegenlaufenden Kraftwellen, sie beeinflussen das Schwingungsverhalten des Motors wesentlich.

Das Schwingungsverhalten hängt natürlich auch von den Eigenschaften der schwingenden Körper

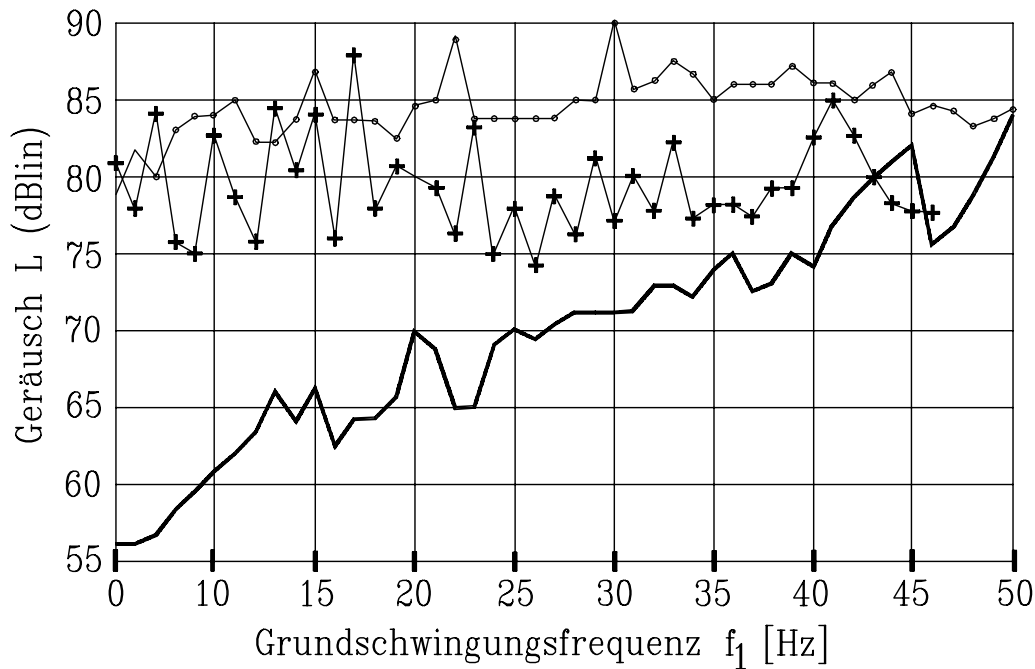


Bild 9.12: Rechnergebnisse zur Geräusentwicklung von Asynchronmotoren bei Speisung durch
— Sinusgenerator
★ Stromzwischenkreis-Umrichter
• Spannungszwischenkreis-Umrichter

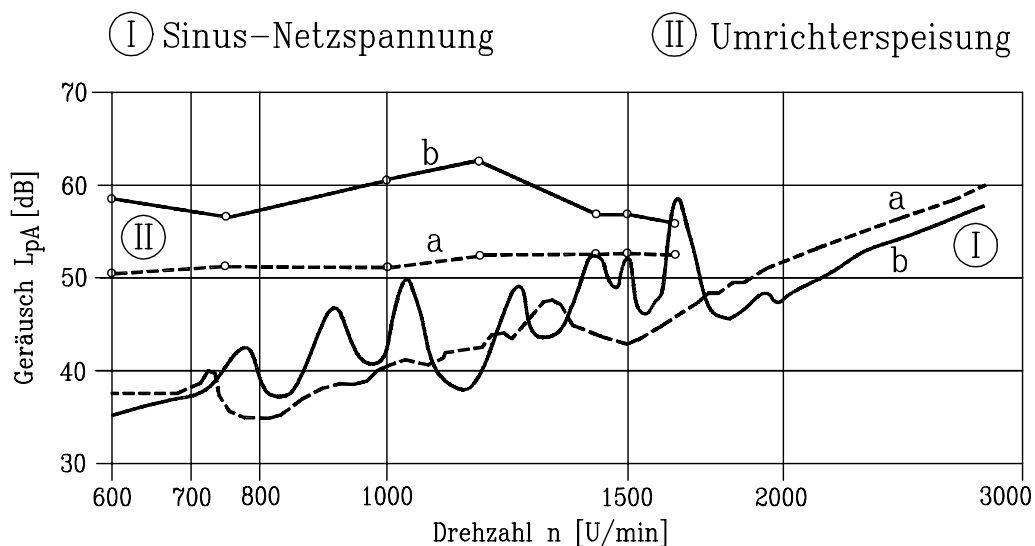


Bild 9.13: Messung der Geräusentwicklung von Asynchronmotoren unterschiedlicher Konstruktion
a) Weichgeglühte Magnetkörper und Graugussgehäuse
b) Magnetkörper aus Dynamoband und Aluminiumgehäuse

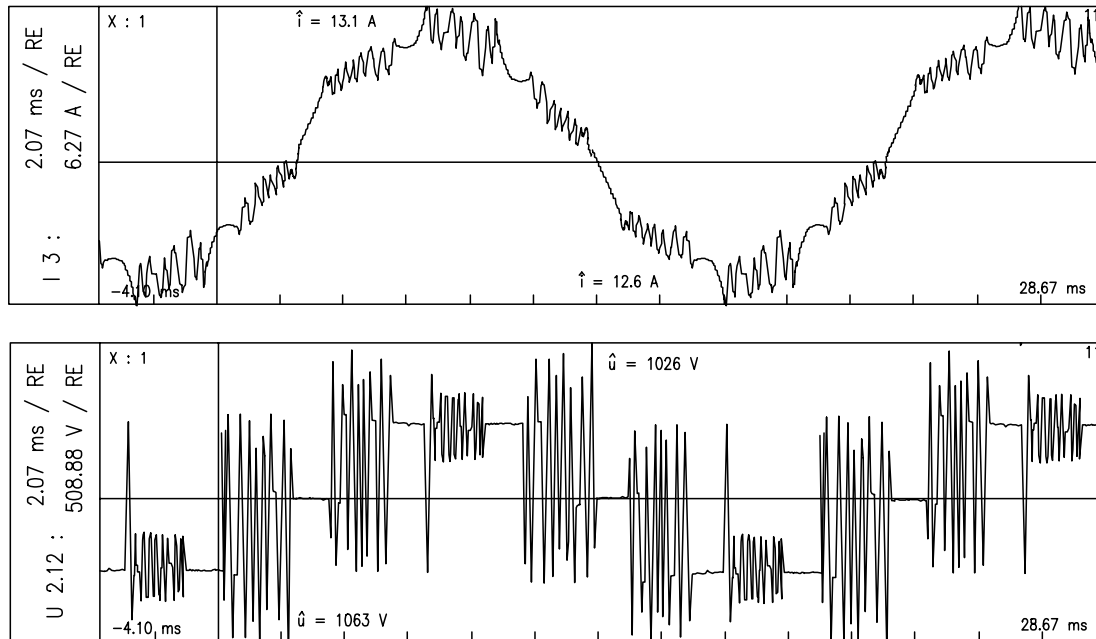


Bild 9.14: Strom- und Spannungsverläufe an den Wicklungsklemmen eines Asynchronmotors, gespeist durch einen mit IGBT-Halbleiterschaltern bestückten Puls-umrichter

ab. Bemerkenswerte Unterschiede können durch die Wahl des Magnetwerkstoffes entstehen. Hier gibt es die Alternative, hartes schlussgeglühtes Dynamoblech und weiches, sogenanntes semi-finished Dynamoblech, das sich auch im Dämpfungsverhalten von konventionellen Werkstoffen unterscheidet, einzusetzen. Dabei spielt auch der mechanische Kontakt zum Gehäuse und natürlich die Ausbildung des Gehäuses eine Rolle.

Auch die mechanischen Eigenschaften des in den Nuten des Magnetkörpers liegenden Isolations-systems haben grossen Einfluss auf die Dämpfung der magnetisch angeregten Schwingungen.

Bild 9.13 zeigt Geräuschvergleiche, die die Möglichkeit der Unterdrückung von Resonanzer-scheinungen bei veränderlicher Frequenz durch ein gutes Dämpfungsverhalten der Magnetkörper be-weisen.

Günstige Schwingungs- und Geräuscheigenschaf-ten können erreicht werden durch:

- den durchgängigen Einsatz von Grauguss-gehäusen auch bei kleinen Leistungen der Asyn-chronmotoren,

- den Einsatz von weichgeglühtem und zusätz-lich oxydiertem Dynamoband. Der Einsatz die-ses Materials führt auch im Läufer zu symme-trischen Leitwertverhältnissen, weil die Läufer-bleche in dem nach dem Stanzen eingeordneten Glühprozess definiert durch ihre Fe_3O_4 -Schicht isoliert werden,
- die gewissenhafte Imprägnierung des Isolations-systems im Verbund mit dem Magnetkörper, bei grossen Asynchronmotoren immer realisiert durch Vakuum-Imprägnierung.

C: Schaltspannungsfestigkeit

Die Speisung von Asynchronmotoren durch mo-derne, gepulste Frequenzumrichter ist durch das schnelle Schalten durch Leistungshalbleiter ge-kennzeichnet. Diese Schaltvorgänge zeichnen sich insbesondere beim Einsatz von IGBT-Schaltele-menten durch eine hohe Stromsteilheit und durch dadurch hervorgerufene Spannungsspitzen aus.

Bild 9.14 zeigt Strom- und Spannungsverläufe ei-nes mit IGBT ausgerüsteten Umrichters, wobei al-lerdings die Spannungsspitzen weitgehend von der Länge der Speiseleitungen zwischen Inverter und Motor abhängig sind.

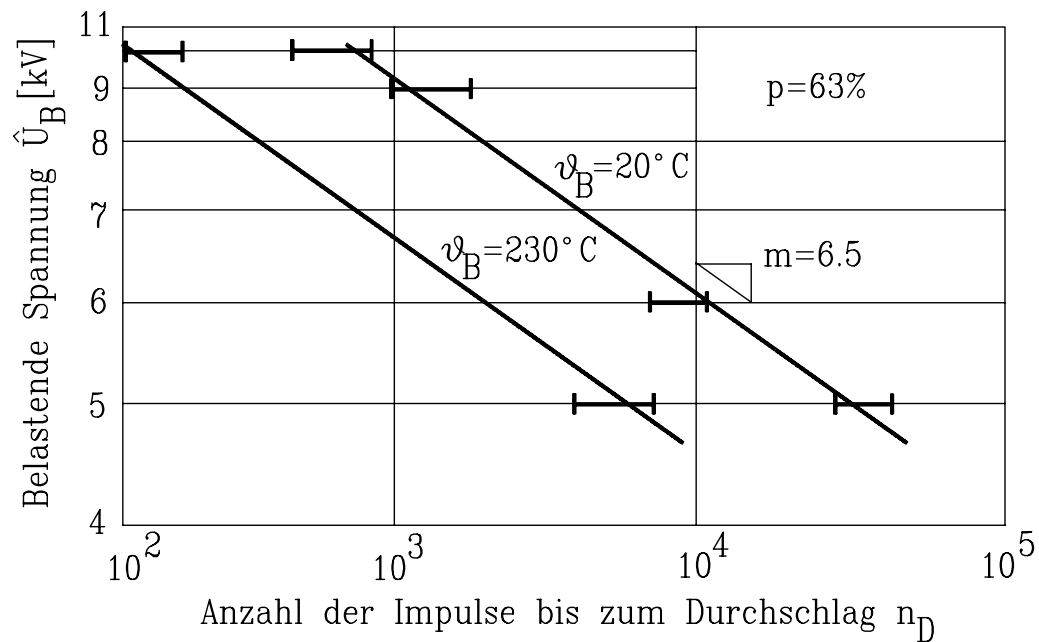


Bild 9.15: Zusammenhang zwischen Spannungsimpulshöhe, Impulszahl, Temperatur und Durchschlag der Wicklung eines Asynchronmotors

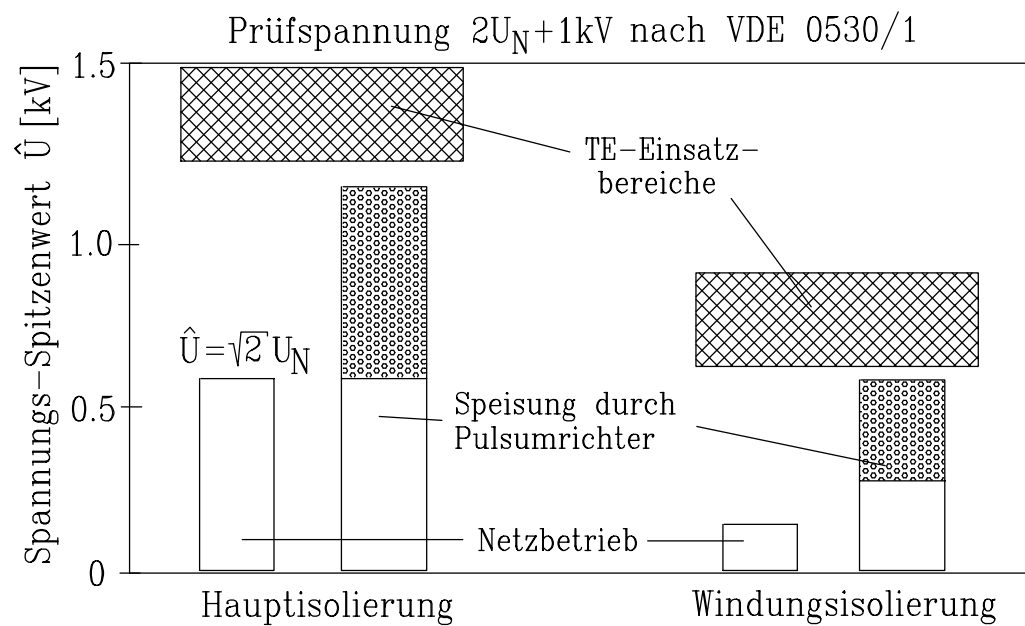


Bild 9.16: Spannungsbeanspruchung der Motorisolierung für $U_N = 400\text{V}$

Treten solche Spannungsimpulse auf, so wirken sie in Anbetracht der hohen Häufigkeit für die Isolierung des Motors lebensdauermindernd. Die Beanspruchungen durch Schaltspannungen sind durch umfangreiche Untersuchungen über das Verhalten der Motoren im Zusammenhang mit Vakuum-Schaltern ähnlich hoher Stromsteilheiten, bekannt.

Der Zusammenhang zwischen der eine Isolierung belastenden Spannung U_B und der Anzahl der Impulse n_D , nach der die Isolierung durchschlägt, kann mit der empirischen Lebensdauerbeziehung

$$U_B = K_D * n_D^{-1/m}$$

beschrieben werden. Diese Zusammenhänge, experimentell für verschiedene thermische Beanspruchungen bestimmt, zeigt prinzipiell und für sehr hohe Spannungsspitzen **Bild 9.15**. Die Erweiterung der Untersuchungen zu höheren Impulszahlen und kleineren Spannungsspitzen steht noch aus.

Die Eigenschaften des umrichter geeigneten Asynchronmotors werden durch die Angaben der "Impulsspannungs-Kategorie - (IK)" gekennzeichnet. Es handelt sich dabei um einen Zahlenwert (0, I, II, III, IV), der ausdrückt, welcher Prüfimpulsspannung das Isoliersystem im Neuzustand des Motors standhält, z.B.:

$$\text{IK III: } U_{prf} = 4 kV \text{ bei } U_N = 380 V$$

Entscheidend für eine Schädigung der Motorwicklung sind die durch Spannungsimpulse verursachten Teilentladungen (TE). Unter der Annahme, dass die durch den schnellen Schaltvorgang im Umrichter ausgelöste Ladungsträgerwelle nur einmal an den Klemmen des Motors reflektiert wird und somit nur der doppelte Wert der maximalen Spannung auftreten kann, werden z.B. bei einem 400V Motor die Bereiche einsetzender Teilentladung gerade noch nicht erreicht wie **Bild 9.16** zeigt. Eine Gefährdung, besonders bei hohen Spannungen und ungünstigen Schaltungskonstellationen, liegt aber immer vor.

D: Notwendigkeit einer konstruktiven Modifikation der Asynchronmaschine

Die bisher genannten Eigenschaften eines umrichter geeigneten Asynchronmotors können und müssen von Typen einer Normmotoren - Leistungsreihe erfüllt werden.

Dabei ergeben sich allerdings aufgrund der gegebenen Eigenschaften und Parameter verschiedene *Nachteile*:

- Bei der Umrichterspeisung treten Zusatzverluste auf d. h., bei gleicher Erwärmung kann der Motor nicht mit der vollen Leistung ausgenutzt werden.
- Im Feldschwäcbereich d.h., bei Speisung mit konstanter Spannung aber variabler Frequenz ist das Drehmoment umgekehrt proportional zum Quadrat der Frequenz: $M \sim 1/f^2$, nimmt also sehr schnell ab. Dadurch ist der Feldschwäcbereich sehr stark eingeschränkt.
- Bei grösseren Maschinen müssen isolierte Lager zur Vermeidung von Lagerschäden durch Lager-Oberschwingungsspannungen eingesetzt werden.
- Aufgrund der Oberwelligkeit der Speisung enthält auch das Drehmoment Oberschwingungen, welche störend wirken und den Antriebsstrang zu Schwingungen anregen oder sogar beschädigen können.
- Das Geräuschniveau des Motors wird vergrößert.

Eine Umrichterspeisung bringt aber auch *Vorteile*:

- Durch die Speisung mit einer zur Frequenz proportionalen Spannung, welche bei kleinen Frequenzen zur Kompensation des ohm'schen Spannungsabfalles noch angehoben wird, und einer strombegrenzenden Regelung, wird der Anlaufstrom und das Drehmoment begrenzt und damit die Verluste im Anlauf und die Drehmomentbeanspruchung des Antriebs durch Pendelmomente wesentlich vermindert.
- Der Motor kann wegen des Wegfallens der Anlaufverluste höher ausgenutzt werden.
- Der Motor kann bei gleicher Leistung mit einer höheren Frequenz und damit mit einer höheren Ausnutzung betrieben werden, z.B. anstelle eines zweipoligen Motors, welcher mit 50 Hz gespeist wird kann ein kleinerer vierpoliger Motor eingesetzt werden, welcher dann mit 100 Hz zu speisen ist.

Zur Verbesserung des Verhaltens des Motors am Umrichter können weitergehende Modifikationen am Normmotor vorgenommen werden, wobei aber

dadurch unter Umständen das Betriebsverhalten bei sinusförmiger Speisung (Netzbetrieb) verändert wird:

- das Ausräumen des Läuferleitermaterials aus dem Streustegbereich,
- die Isolation des Läuferkäfigs vom Läuferkörper über die Qualität einer gezielten Oxydschicht hinaus,
- das Vermeiden des Überdrehens des druckgegossenen Läuferkörpers durch "Ausstanzen des Luftspaltes",
- die Beeinflussung (Verminderung) der Streureaktanzen des Motors und die Gestaltung der Läufernut.

Das Ausräumen des Läuferleitermaterials aus dem Streusteg kann die Verlustbilanz eines drehzahlgestellten Asynchronmotors relativ leicht verbessern. So führt diese Massnahme bei einem 18 kW-Motor zu einer Erhöhung des zulässigen Grenzdrehmomentes von 64 % auf 81 % des bei Sinusspeisung verfügbaren Motormomentes. Gleichzeitig gehen die Oberschwingungs-Kupferverluste dabei von 924 W auf 482 W zurück.

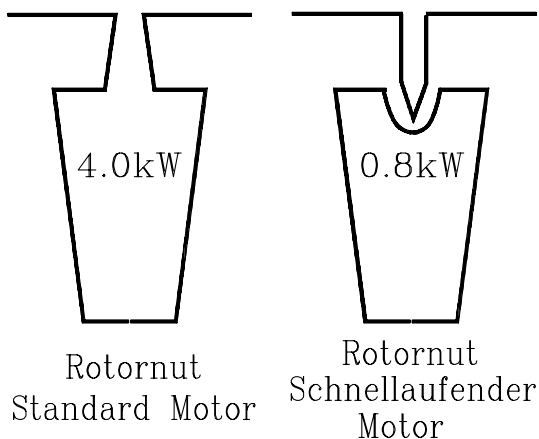


Bild 9.17: Verringerung der Nutstreuung und der Oberflächenverluste durch speziellen Nutschnitte im Rotor

Interessant ist die Lösung des Problems der hohen Verluste im Gebiet der Nutöffnung nach **Bild 9.17**. Der spezielle Nutschnitt verringert diese Verluste und zugleich aber auch die Nutstreuung, so dass das Kippmoment und damit die mechanisch-dynamische Belastbarkeit und der Feldschwächbereich des Motors zunimmt.

Allgemein ist jedoch festzuhalten, dass ein für

I - Umrichterspeisung optimierter Motor eine möglichst kleine Streureaktanz, eine für U - Umrichterspeisung optimierter Motor eine möglichst grosse Streureaktanz haben sollte, um den Oberschwingungsgehalt der Spannungen und Ströme möglichst klein zu halten. Da das Kippmoment dem Kehrwert der Streureaktanz proportional ist, vermindert eine derartige Auslegung die "Überlastbarkeit und den Feldschwächbereich.

Die Tendenz besteht darin, bei U-Umrichterspeisung durch Stromregelung möglichst sinusförmige Ströme einzuprägen und dann Motoren mit einer möglichst kleinen Streureaktanz und einem möglichst kleinen Rotorwiderstand, ohne Stromverdrängung (auch bei höheren Frequenzen) zu verwenden. Derartige Motoren sind dann allerdings für den Netzbetrieb nur noch bedingt zu gebrauchen, da sie einen sehr grossen Einschaltstrom und ein kleines Anlaufdrehmoment aufweisen.

9.3 Netzprobleme umrichtergespeister Antriebe

9.3.1 Netzurückwirkungen

Umrichtergespeiste Antriebe beeinflussen das speisende Netz und die Umwelt durch:

- **Oberschwingungen**, die durch die nichtlineare Stromrichter-Charakteristik verursacht werden,
- **Hochfrequente, elektromagnetische Vorgänge** bei der Kommutierung, welche zu EMV-Problemen führen,
- Variable, induktive **Blindleistungsanteile**, die von der übertragenen Wirkleistung und dem Steuerwinkel α abhängig sind, welche Spannungsabfälle und Zusatzverluste im Netz verursachen.

Stromrichter erzeugen, verursacht durch die Schaltfunktion der elektrischen Ventile, sowohl auf der Wechsel-, bzw. Drehstromseite, als auch auf der Zwischenkreis-Gleichstromseite Strom- und Spannungsüberschwingungen. Erwünscht wären auf der Netzseite möglichst sinusförmige Ströme und auf der Gleichstromseite ein vollkommen geglätteter Gleichstrom. Da die Stromrichterventile zwar nichtlineare Schaltfunktionen ausführen, jedoch keine Speicherwirkung besitzen, ist dies nur durch zusätzliche, aus Kondensatoren und Induk-

	p=2		3		6		12		18		24	
ν	$u_{\nu i}$ [%]	$i_{\nu i}$ [%]	$u_{\nu i}$ [%]	$i_{\nu i}$ [%]	$u_{\nu i}$ [%]	$i_{\nu i}$ [%]	$u_{\nu i}$ [%]	$i_{\nu i}$ [%]	$u_{\nu i}$ [%]	$i_{\nu i}$ [%]	$u_{\nu i}$ [%]	$i_{\nu i}$ [%]
2	41.14	—	—	50.00	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	33.33	17.68	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	9.34	—	—	25.00	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	20.00	—	20.00	—	20.00	—	—	—	—	—	—
6	4.04	—	4.04	—	4.04	—	—	—	—	—	—	—
7	—	14.29	—	14.29	—	14.29	—	—	—	—	—	—
8	2.24	—	—	12.50	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	11.11	1.77	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	1.43	—	—	10.00	—	—	—	—	—	—	—	—
11	—	9.09	—	9.09	—	9.09	—	9.09	—	—	—	—
12	0.99	—	0.99	—	0.99	—	0.99	—	—	—	—	—
13	—	7.69	—	7.69	—	7.69	—	7.69	—	—	—	—
14	0.73	—	—	7.14	—	—	—	—	—	—	—	—
15	—	6.67	0.63	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	0.55	—	—	6.25	—	—	—	—	—	—	—	—
17	—	5.88	—	5.88	—	5.88	—	—	—	5.88	—	—
18	0.44	—	0.44	—	0.44	—	—	—	0.44	—	—	—
19	—	5.26	—	5.26	—	5.26	—	—	—	5.26	—	—
20	0.35	—	—	5.00	—	—	—	—	—	—	—	—
21	—	4.76	0.32	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	0.29	—	—	4.55	—	—	—	—	—	—	—	—
23	—	4.35	—	4.35	—	4.35	—	4.35	—	—	—	4.35
24	0.25	—	0.25	—	0.25	—	0.25	—	—	—	0.25	—
25	—	4.00	—	4.00	—	4.00	—	4.00	—	—	—	4.00
w_i	48.34	—	18.27	—	4.20	—	1.03	—	0.46	—	0.25	—
i_L	—	111.07	—	120.92	—	104.72	—	101.15	—	100.51	—	100.29

Bild 9.18: Oberschwingungen im Netzwechselstrom und überlagerte Wechselspannungen

tivitäten aufgebaute Filter- und Glättungseinrichtungen zu bewerkstelligen.

A) Oberschwingungen

Der ungesteuerte Stromrichter kann wegen seiner unstetigen Arbeitsweise den zeitlich konstanten Gleichstrom nicht in einen sinusförmig verlaufenden Netzstrom umformen, woraus folgt, dass die Netzströme stets Oberschwingungen enthalten.

Die überlagerten Wechselspannungen auf der Gleichstromseite und die Oberschwingungen im Netzwechselstrom können unter der Voraussetzung einer sinusförmigen, symmetrischen Netzspannung und vollkommen geglätteten Gleichstrom, wie im **Bild 9.18** in einer Übersicht gezeigt, einfach berechnet werden.

Neben der ideellen Gleichspannung U_{di} ergeben sich überlagerte Wechselspannungen mit den Ordnungszahlen

$$\nu = kp$$

für $k = 1, 2, 3, \dots$ und $p =$ Pulszahl des Stromrichters, deren Effektivwert bei Vollaussteuerung nach

$$\frac{U_{\nu i}}{U_{di}} = \frac{\sqrt{2}}{\nu^2 - 1} = u_{\nu i}$$

berechnet werden kann. Im Netzwechselstrom treten Oberschwingungen $I_{\nu i}$ der Ordnungszahl $\nu = kp \pm 1$ auf, deren Effektivwert mit Hilfe von

$$\frac{I_{\nu i}}{I_{1i}} = \frac{1}{\nu} = i_{\nu i}$$

mit $I_{1i} =$ Effektivwert der Grundschiwingung des ideellen Netzstromes,

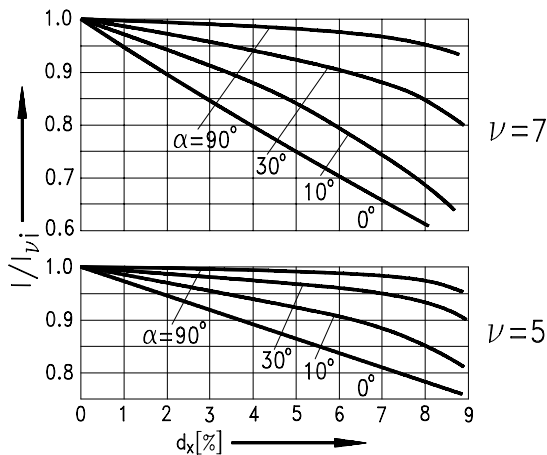


Bild 9.19: Bezoogene Netzstromüberschwingungen I_ν als Funktion des induktiven Spannungsabfalls d_x

berechnet werden kann. Der ideale Netzstrom hat den Effektivwert

$$\frac{I_{L\nu}}{I_{1i}} = \sqrt{1 + \sum \frac{1}{\nu^2}} = i_{L\nu}$$

Die Pulszahl der Stromrichterschaltung bestimmt also die Ordnungszahl der auftretenden Oberschwingungen und die Grösse der Oberschwingung hängt dann nur noch von der Ordnungszahl ν ab.

Zur Charakterisierung des realen Netzstromes wurde der Verzerrungsfaktor $v = I_{N1}/I_N$ definiert, der das Verhältnis zwischen den Effektivwerten des Grundschwingungsstromes I_{N1} und des gesamten Netzstromes I_N angibt.

Beim gesteuerten Stromrichter wirken alle netz- und ventileitigen Reaktanzen verzögernd auf die Stromübergabe zwischen den kommutierenden Ventilen. Die Netzflanken werden dadurch so verformt, dass die Netzstromüberschwingungen insgesamt kleiner werden. **Bild 9.18** zeigt, wie die netzseitigen Oberschwingungsströme der Ordnungszahlen $\nu = 5, 7$ vom induktiven Gleichspannungsabfall d_x und vom Zündverzögerungswinkel α abhängen.

Elektrische Versorgungsnetze sind meist vermascht und unterliegen aufgrund unterschiedlicher Verbraucher nur statistisch bekannten Belastungen. Die durch Stromrichter-Schaltvorgänge hervorgerufenen Überspannungen breiten sich als Wanderwellen vom Entstehungsort über das Netz aus

und können andere Betriebsmittel und Verbraucher zusätzlich thermisch belasten, ihre Funktion beeinträchtigen oder gar beschädigen.

Höhere Harmonische wirken mit zunehmender Frequenz verstärkt auf andere Stromkreise ein, z.B. auf Nachrichtenkanäle.

Die durch Stromrichter verursachten Netzzrückwirkungen hängen direkt mit dem Netz selbst zusammen. Unter der Voraussetzung linearer Netze erklärt sich dies aus den Netzimpedanzen Z_{Ni} die, wenn mit dem vom Stromrichter erzwungenen Strom I_i multipliziert wird, die Störspannungen im Netz $U_i = Z_{Ni}I_i$ (i = Ordnungszahl der Harmonischen) ergeben.

Die vom Stromrichter hervorgerufenen Stromüberschwingungen verursachen, wie im **Bild 9.20** gezeigt, an den verschiedenen Netzimpedanzen Spannungsabfälle die die rein sinusförmige Netzspannung U_N zu einer entsprechend überschwingungshaltigen Spannung U_M macht. Diese stören in vielen Fällen sogar die Arbeitsweise des Stromrichters selbst.

A1: Induktives Netz

Der Stromrichter wird als Oberschwingungserzeuger mit konstantem Stromverhalten aufgefasst, so dass die auf der Netzseite erzeugten Oberschwingungsströme unabhängig von den Netzimpedanzen durch die Stromrichterbelastung eingeprägt sind. Diese erzeugen an den gekoppelten Netzimpedanzen Z_ν induktive Störspannungen, nach **Bild 9.21**.

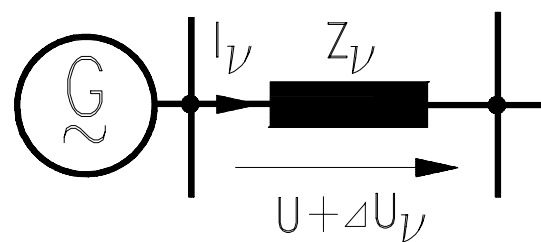


Bild 9.21: Spannungsabfälle an den Netzimpedanzen Z_ν durch Stromüberschwingungen im induktiven Netz

Bei einer Kurzschlussleistung S_K beträgt die Netzeingangsimpedanz für die Grundschwingung

$$Z_1 = v_B \cdot 3 \cdot U^2 / S_K = X_{LL} \cdot \sqrt{1 + (r_L / x_{LL})^2}$$

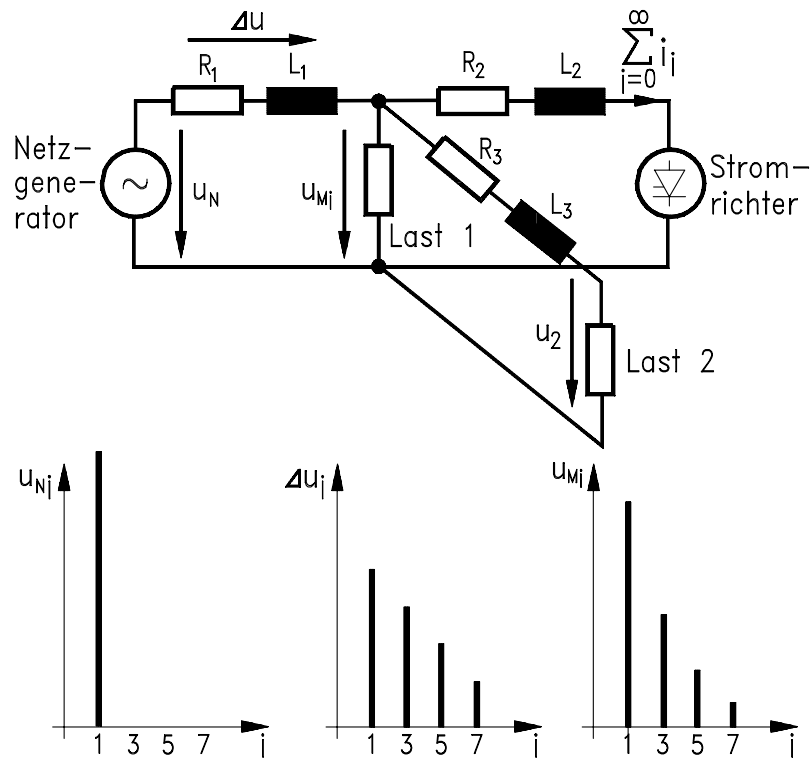


Bild 9.20: Die an den Netzimpedanzen Z_{Ni} durch Strom Oberschwingungen verursachten Spannungsabfälle

- $v_B = 1.1$ Spannungsbeiwert für Drehstromanlagen über $1kV$
- X_{LL} Netz-Grundwellenreaktanz
- r_L Netz Widerstand auf Leitungslänge bezogen (netzabhängig wegen Stromverdrängung)
- x_{LL} Netzreaktanz auf Leitungslänge bezogen

Fallen die Stromharmonischen mit $1/\nu$ ab und steigt die Netzimpedanz infolge Leitungsinduktivität linear mit ν an, so ergeben sich in der Amplitude konstante Störspannungen

$$\Delta U_\nu = I_\nu Z_\nu \quad \text{mit} \quad Z_\nu = \nu \cdot X_{LL} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{r_L}{\nu} x_{LL}\right)^2}$$

die im Frequenzbereich $0.05 - 1.5 kHz$ auch praktisch gemessen wurden.

A2: Schwingungsfähiges Netz

Oberschwingungsspannungen mit bestimmten Frequenzen können durch Resonanzerscheinungen im Netz, die an das Vorhandensein von Kapazitäten wie Kabelnetze oder Blindleistungskondensatoren gebunden sind, erheblich verstärkt werden. Die

vom Stromrichter eingeprägte Strom Oberschwingung ruft wegen der durch Resonanz stark angewachsenen harmonischen Eingangsimpedanz Z_ν sehr hohe Oberschwingungsspannungen ΔU_ν hervor, deren Amplitude:

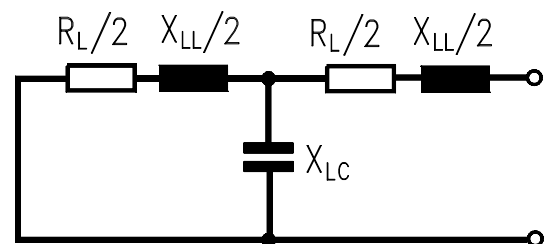


Bild 9.22: T-Vierpol Ersatzschaltung eines schwingungsfähigen Netzes

- vom Verhältnis der Stromrichterleistung zur Grundschwingungs- Kurzschlussleistung des Kommutierungskreises
- vom Zündwinkel α und Zünd-Ungenauigkeiten
- und von der Ordnungszahl der gesperrten Oberschwingung

abhängt. Für die Bestimmung der Eingangsimpe-

danz

$$Z_\nu = k_\nu \cdot \nu \cdot X_{LL} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{r_L}{\nu} x_{LL}\right)^2}$$

kann dem schwingungsfähigen Netz ein T-Vierpol, wie **Bild 9.22** zeigt, als Ersatzschaltung zugrundegelegt werden.

Der kapazitive Blindwiderstand des Netzes je Phase für die Grundwelle ist X_{LC} . Der Kapazitätseinflussfaktor k_ν ist für die Grundschiwingung 1 und nimmt für Oberschwingungen höherer Ordnungszahlen wesentlich grössere Werte an.

B) Blindleistungsbelastung durch Umrichter

Der durch Steuerung ($0 \leq \alpha \leq \alpha_{max}$) und Kommutierung verursachte Blindleistungsbedarf phasenanschnittgesteuerter Antriebsschaltungen wird generell aufgeteilt in die Grundschiwingungs-Blindleistung Q_{1L} und in die **Verzerrungs-Blindleistung** D

$$D = U_L \cdot \sqrt{\sum_{\nu=2}^N I_{\nu L}^2},$$

wobei U_L die verkettete Netzspannung und $I_{\nu L}$ der ν -te Oberschwingungsanteil des Netzstromes ist.

Sie bildet mit der Grundschiwingungs-Blindleistung Q_{1L} die gesamte Netzblindleistung Q_L

$$Q_L = \sqrt{Q_{1L}^2 + D^2}$$

Die **Grundschiwingungs-Blindleistung** Q_{1L} , infolge der nacheilenden Verschiebung des Grundschiwingungsstromes I_{1L} gegenüber der Netz-Strangspannung U_{1L} um den Winkel φ_1 beträgt:

$$Q_{1L} = S_{1L} \cdot \sin \varphi_1$$

mit der Scheinleistung $S_{1L} = \sqrt{3} \cdot U_{1L} \cdot I_{1L}$. Wie das **Bild 9.23** verdeutlicht, ist der netzseitige Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ mit dem Kosinus des Zündwinkels α gekoppelt.

Eine weitere Abhängigkeit der Blindleistung besteht in der **Art der Stromrichterschaltung**.

Die **halbgesteuerte Drehstrombrücke** ist wegen des "Freilauffeffektes" eine blindstromsparende

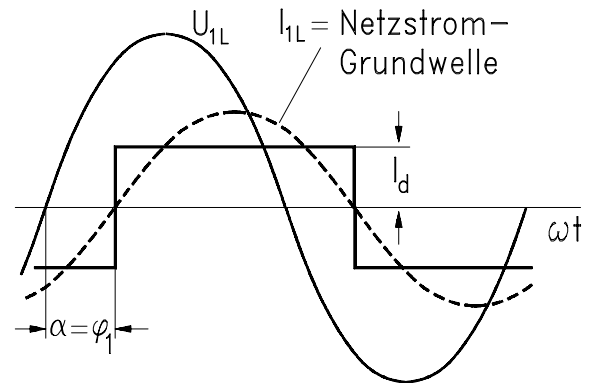


Bild 9.23: Blindleistung bei vollgesteuerter Gleichrichtung

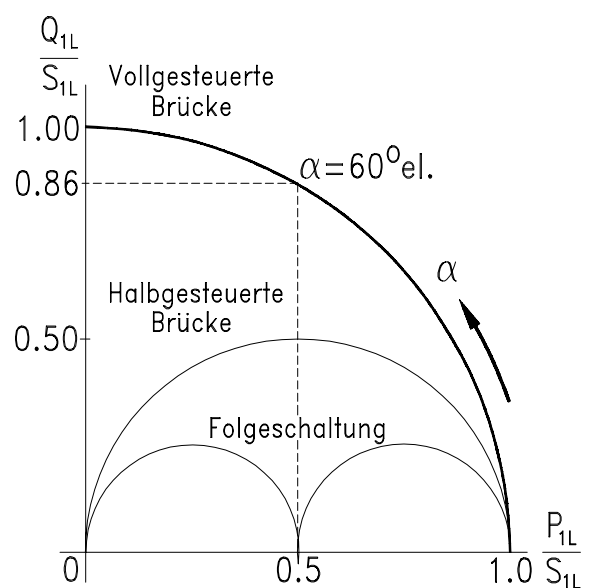


Bild 9.24: Blindleistungsbedarf verschiedener Stromrichter-Schaltungen

Schaltung. Der Zusammenhang zwischen Blindleistung und Aussteuerungsgrad geht aus dem **Bild 9.24** hervor. Halbgesteuerte Gleichrichter, für die einzelne Brückenarme mit Dioden bestückt sind, werden dann eingesetzt, wenn vom Stromrichter kein Wechselrichterbetrieb gefordert wird.

Werden Stromrichter in Reihe geschaltet, so dass immer nur ein Stromrichter den gesamten Steuerbereich durchläuft, während sich alle anderen in einer der beiden Steuer-Endstellungen befindet, so spricht man von **Folgesteuerung**. Aus **Bild 9.24** geht der Blindleistungsbedarf dieser Schaltungen in Abhängigkeit von der Wirkleistung der Last hervor. Einer feineren Aufteilung in Teil-Stromrichter sind aus wirtschaftlichen Gründen Grenzen gesetzt,

weil der zusätzliche Aufwand an Stromrichtern die nur geringe Einsparung an Blindleistung nicht mehr rechtfertigt.

B1: Blindleistung ungesteuerter Gleichrichtung, U-Umrichter mit pulsbreitenmodulierter Aussteuerung

Bei ungesteuerter Gleichrichtung tritt im allgemeinen eine geringe Grundswingungs-Blindleistung Q_{1L} auf, die wegen der endlichen Kommutierungsdauer von der relativen Netzkurzschluss-Spannung u_K und damit von der Netzreaktanz abhängig ist. Der netzseitige Leistungsfaktor wird damit

$$\cos \varphi_1 = 1 - \frac{u_K}{2}.$$

Für eine übliche Netzkurzschluss-Spannung von z.B. 4%, ergibt sich ein Grundswingungs-Leistungsfaktor $\cos \varphi_1 = 0.98$.

Wie Bild 9.25 zeigt, ist der Grundswingungs-Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ für Umrichter mit Spannungszwischenkreis und pulsbreitenmodulierter Aussteuerung annähernd gleich 1, womit sich bei dieser Schaltung die Blindleistungskompensation für die Grundswingungs-Blindleistung erübrigt.

Die im Bild 9.25 gezeigten Kurven gelten unter Berücksichtigung einer Netzkommütierungs-drossel mit einer Kurzschluss-Reaktanz von $u_K = 4\%$. Diese reduziert die Oberschwingungsströme, womit die Netzanschlussbedingungen verbessert werden.

B2: Blindleistung bei gesteuerter Gleichrichtung (GM, I-Umrichter)

Bei Systemen mit eingepprägtem, gesteuertem Zwischenkreisstrom, ergibt sich der Cosinus des Steuerwinkels α des gesteuerten Gleichrichters aus der Motorspannung U_M und dem Motor-Phasenwinkel φ_M zu

$$\cos \alpha = \frac{U_M}{U_{1L}} \cos \varphi_M,$$

wobei U_{1L} die Netzspannung ist.

Im Betrieb mit konstantem Fluss ($U_M \sim f_M$) verhält sich der Steuerwinkel α wie der Phasenwinkel φ_M des Motors, multipliziert mit dem Quotienten der Motorfrequenz f_M zur Motor-

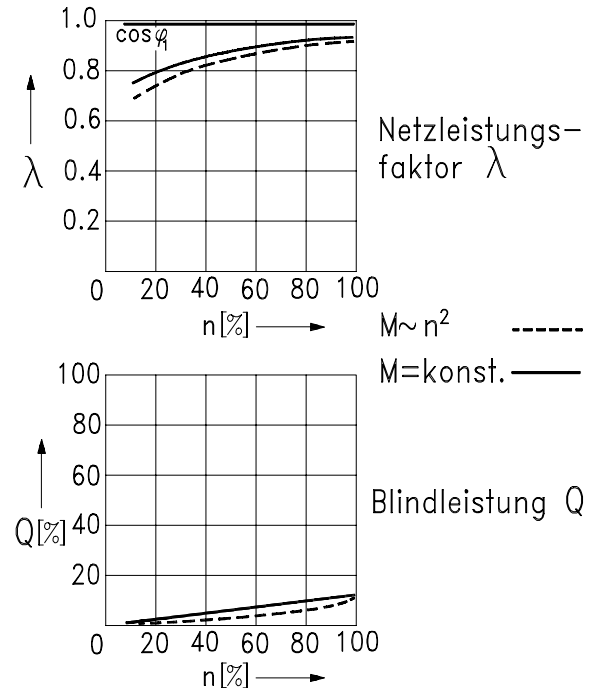


Bild 9.25: U-Umrichter Netz-Blindleistungsbelastung

Nennfrequenz f_{MN} :

$$\cos \varphi_1 = \frac{f_M}{f_{MN}} \cos \varphi_M.$$

Damit lässt sich die Netz-Grundswingungsblindleistung

$$Q_{1L} = S_{1L} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1}$$

mit der Scheinleistung

$$S_{1L} = \sqrt{3} \cdot U_{1L} \cdot I_{1M}$$

berechnen, wobei U_{1L} die Netzspannung und I_{1M} der Grundswingungsstrom des mit einem U-Umrichter gespeisten Asynchronmotors ist.

Da für die Bestimmung des Blindleistungsbedarfs neben dem Grundswingungsanteil auch noch die Oberschwingungsanteile berücksichtigt werden müssen, so ist der Leistungsfaktor λ

$$\lambda = g \cdot \cos \varphi_1$$

einzuführen, der sich aus dem Grundswingungs-Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ und dem Grundswingungsgehalt g des Netzstromes zusammensetzt.

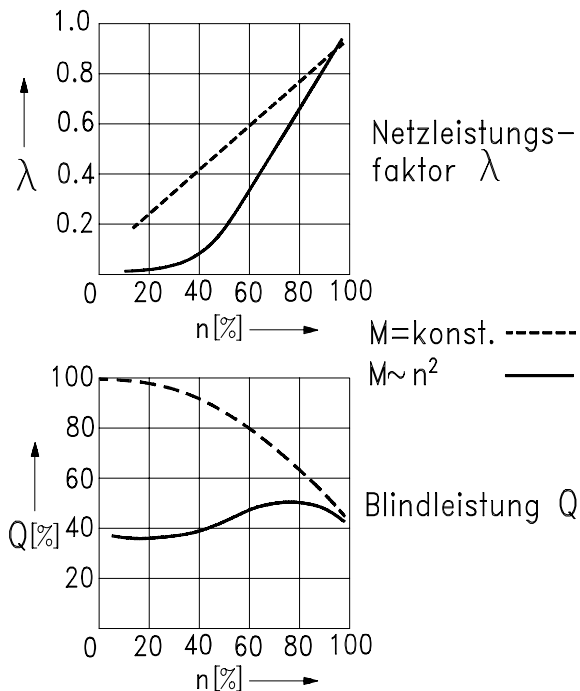


Bild 9.26: I-Umrichter Netz-Blindleistungsbelastung

Der Grundswingungsgehalt g ist das Verhältnis von Effektivwert der Grundswingung des Motorstromes I_{M1} zum Effektivwert des Maschinenstromes I_M , der für Stromzwischenkreis-Umrichter

$$g = \frac{I_{M1}}{I_M} = \frac{3}{\pi}$$

beträgt. Die das Netz belastende, gesamte Blindleistung, ist somit

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_M \cdot I_M \cdot \sqrt{1 - \lambda^2}$$

Typische Verläufe der Netz-Blindleistungsbelastung für zwei übliche Lastfälle sind im **Bild 9.26** dargestellt.

B3: Blindleistung bei gesteuerter Gleichrichtung (U-Umrichter)

Die variable Zwischenkreisspannung U_d wird über den Steuerwinkel α proportional zur Ausgangsfrequenz verstellt $U_d = f(\alpha)$. Beim Betrieb mit konstantem Fluss $U/f = konst.$ gilt für Umrichter mit variablem Spannungszwischenkreis

$$\cos \varphi_1 = 0.95 \cdot \frac{f_M}{f_{MN}}$$

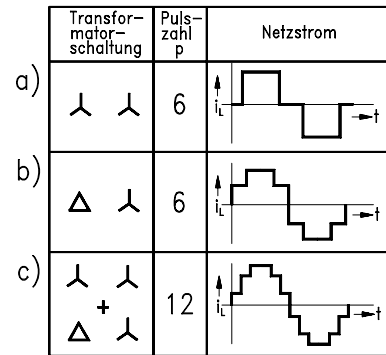


Bild 9.27: Netzströme von 6- und 12-pulsigen Stromrichtern

Damit kann die Netz-Grundswingungsblindleistung Q_{1L} wie für den Fall des I-Umrichters berechnet werden.

9.2.3 Netzseitige Massnahmen zur Vermeidung von Netzurückwirkungen

Im folgenden Abschnitt sollen einige Möglichkeiten angeführt werden, den Oberschwingungsgehalt der Netzspannung und den damit gekoppelten erhöhten Blindleistungsbedarf zu reduzieren.

A) Erhöhung der Stromrichter-Pulszahl

Die Stromrichter-Pulszahl p ist definiert als die Gesamtzahl der nicht-gleichzeitigen Stromübernahmen durch Hauptzweige einer Stromrichter-Schaltung während einer Periode.

Mit grösserer Pulszahl nähert sich der Verlauf des Netzstromes, wie im **Bild 9.27** gezeigt, immer mehr der Sinusform an, d.h. der Oberschwingungsgehalt des Stromes wird geringer. Die Erhöhung der Pulszahl setzt demnach eine Erhöhung der Anzahl der Hauptzweige eines Stromrichters voraus.

Die Netzstromkurven a) und b) des **Bildes 9.27** haben gleiches Amplitudenspektrum, jedoch unterschiedliche Phasen für die 5., 7., 17. und 19. Stromharmonische die sich im Falle einer Addition **Bild 9.27 c)** gegenseitig auslöschen.

B) Steuerungstechnische Massnahmen

Es ist üblich, in Anlagen etwa 50% der Gesamtleistung in Schaltgruppen Stern/Stern und 50% in Dreieck/Stern auszuführen (vgl. **Bild 9.27c**). Sind diese Stromrichter-Teilgruppen jedoch

ungleichmässig belastet, dann weisen auch ihre Netzüberschwingungen unterschiedliche Beträge (Summe und Differenz der Teilüberschwingungsströme) auf. Der Kompensationsgrad für die 5., 7., 17. und 19. Stromharmonische auf der Netzseite kann also durch die zeitliche Belastung der einzelnen Stromrichtergruppen beeinflusst werden.

In vielen Fällen weichen neben der Belastung auch die Steuerwinkel der Stromrichter-Teilgruppen mehr oder weniger stark voneinander ab. Obwohl die Netzstromkurve vom Zündwinkel unabhängig ist, tritt eine vom Steuerwinkel abhängige Phasenverschiebung im Vergleich zur Netzspannungskurve auf. Für die Oberschwingung des Netzstromes der Stromrichtergruppe bedeutet das eine Verschiebung um den Winkel $\nu\alpha$, womit im gemeinsamen Netzstrom wiederum die unerwünschten Mischprodukte der entsprechenden Oberschwingungsströme auftreten können.

C) Saugkreise und Filter

Gefährliche Resonanzzustände im Netz werden mit Sicherheit durch Einschalten von sogenannten Saugkreisen, wie im Bild 9.28 dargestellt, vermieden.

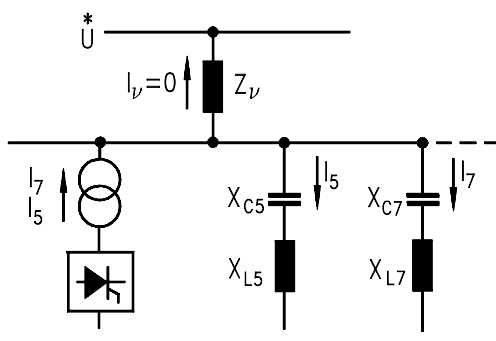


Bild 9.28: Prinzipschaltbild von Saugkreisen

Im Resonanzfall geht der resultierende Widerstand des Saugkreises gegen Null. Dadurch werden Oberschwingungsströme, die der Resonanzfrequenz des Saugkreises entsprechen, kurzgeschlossen.

Für Oberschwingungen, deren Frequenzen höher sind als die Abstimmfrequenz f_A des Saugkreises, ist die induktive Komponente $X_{L\nu} = \nu X_{L1}$ grösser als die kapazitive Komponente $X_{C\nu} = X_{C1}/\nu$.

Der Saugkreis verhält sich also wie eine Induktivität, die parallel zur Netzimpedanz liegt, wo-

mit für diese Oberschwingungen keine Resonanzerscheinungen auftreten können. Saugkreisanlagen müssen deshalb so dimensioniert werden, dass die Oberschwingungen mit der niedrigsten Ordnungszahl durch einen entsprechend abgestimmten Kreis kurzgeschlossen wird.

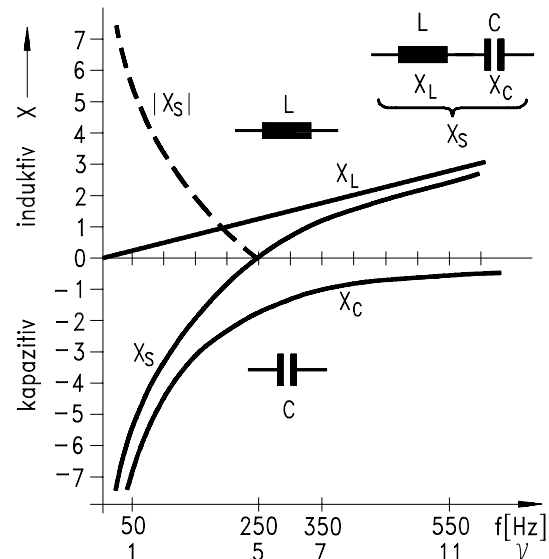


Bild 9.29: Reaktanzverlauf eines Reihenresonanzkreises

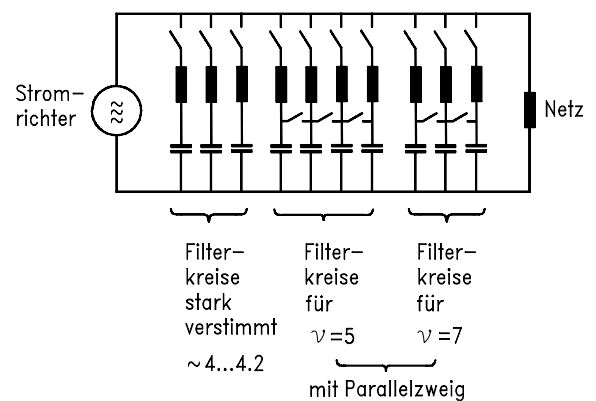


Bild 9.30: Prinzipskizze eines regelbaren Filterkreises

Bei Energieumformung mit Stromrichtern lässt sich wegen der nichtlinearen Halbleiterschalter ohne Speicherwirkung die Voraussetzung sinusförmiger Ströme auf der Drehstromseite leider nicht ohne weiteres erfüllen. Die durch periodische Schaltvorgänge verursachten Oberschwingungen lassen sich nur durch die Hinzunahme von magnetischen und elektrischen Speichern, die zu Filterkreisen ausgebildet sind, unterdrücken.

Filter bestehen grundsätzlich aus einer Drosselspule mit einem in Reihe oder parallel geschalteten Kondensator. Die Induktivität der Spule und die Kondensatorkapazität sind so zu bemessen, dass eine Resonanz für die gewünschte Frequenz entsteht.

Bild 9.29 zeigt den Reaktanzverlauf eines Filters für 250 Hz in Abhängigkeit von der Frequenz. Im Resonanzfall geht der resultierende Widerstand des Filters gegen Null. Dadurch werden Ströme der entsprechenden Resonanzfrequenz des Filters zu einem erheblichen Teil

Die Spannung auf der Gleichstromseite wird im allgemeinen durch einen magnetischen Speicher ausreichend geglättet.

D) Blindleistungskompensation

Die Blindleistung einer elektrischen Last verschwindet, wenn zwischen Spannungs- und Stromverlauf an einer Last keine zeitliche Verschiebung auftritt. Diese Aussage gilt auch für nichtsinusförmige Wechselspannungen. Bei stromrichter gesteuerten Antrieben sind Spannung und Strom in der Regel phasenverschoben, womit stets Blindleistung auftritt. Für den Leistungsfaktor, dem Verhältnis von übertragener Wirkleistung zur auftretenden Scheinleistung, ist demnach ein Wert von 1.0 anzustreben.

Die Kompensation der Blindleistung von Antrieben geschieht mit zusätzlichen Kapazitäten oder Induktivitäten, die sich mit Stromrichtern kontaktlos schalten oder mittels Anschnittsteuerung auch stetig verstellen lassen.

Im **Bild 9.31** ist für eine induktive Last das Prinzip der Parallelkompensation mit thyristorgeschalteten Kompensationskondensatoren aufgezeigt. Bei der reinen Blindstromkompensation verbleibt ein ohm'scher Längsspannungsabfall $I_N R_N$ der durch Netzstrom-Kompensation gemäss **Bild 9.31 c** jedoch aufgehoben werden kann.

Eine weitere Kompensationsmöglichkeit ergibt sich mit einem Satz binär gestufter Kondensatoren, die über Thyristoren und gegenparallel geschalteten Dioden am Netz betrieben werden. Für die 4 Kondensatoren des **Bildes 9.32** ergeben sich damit bereits 15 verschiedene Kompensationsmöglichkeiten. Obwohl die maximale Schaltfrequenz die

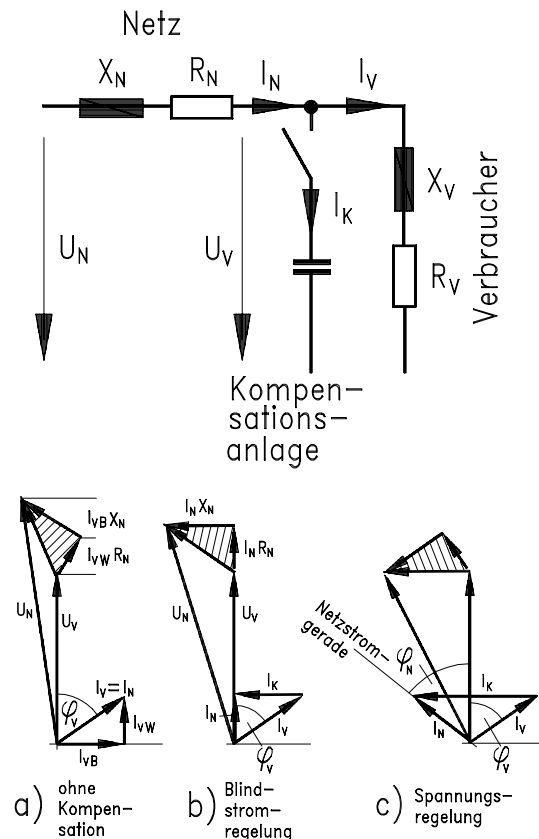


Bild 9.31: Prinzip der Parallelkompensation

Netzfrequenz ist, lässt sich bei diesem Verfahren eine gute dynamische Spannungsstabilität erzielen.

Für spezielle Anwendungen kann Blindstromkompensation, im Zusammenhang mit fest eingebauten Kompensationskondensatoren auch durch Zuschalten von Induktivitäten erfolgen.

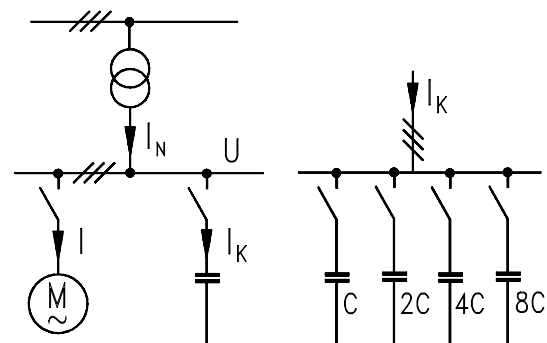


Bild 9.32: Binär kombinierte Kompensationskondensatoren

Checkliste zum Einsatz umrichter gespeister Antriebe:

Es ist sinnvoll, umrichter gespeiste Antriebe dann einzusetzen wenn:

- Drehzahl, Geschwindigkeit, Fördermenge, Leistung, Drehmoment usw. in einem gewissen Bereich stetig eingestellt oder geregelt werden muss, z.B. bei Lüftern, Pumpen, Verarbeitungsmaschinen, Krananlagen, Aufzügen.
- Einzelantriebe koordiniert gestellt oder geregelt betrieben werden müssen, z.B. bei Förderanlagen, Verarbeitungsmaschinen, Wickelmaschinen.
- Massen beschleunigt und gebremst werden müssen, u.U. mit Energierückgewinnung, z.B. bei Krananlagen, Aufzügen und Zentrifugen.

Umrichter gespeiste Antriebe haben:

- Grundsätzlich einen schlechteren Wirkungsgrad (höhere Verluste) als netz gespeiste Antriebe.
- Nebenwirkungen, welche bei netz gespeisten Antrieben nicht auftreten, wie z.B.:
Zusätzliche Verluste im Motor, Drehmomentpulsationen, Umrichter-Oberschwingungs- und Blindleistungbelastung des Speisernetzes, Überspannungsbeanspruchung der Wicklungen.
- Nur eine Brems- und Energierückspeisefähigkeit, wenn der Umrichter dafür ausgelegt ist.
- Einen grösseren Aufwand für die Planung, Projektierung und Inbetriebsetzung.

Erforderliche Angaben für die Projektierung umrichter gespeister Antriebe:

Motor:

- Belastungskennlinie $M(n)$: 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
- Belastungsart (S1 .. S10): dauernd, intermittierend Umgebungsbedingungen
- Schutzart: offen, geschlossen ...
- Bauart, Motorschutz
- Zusätzliche Motorkühlung bei niedrigen Drehzahlen

Umrichter:

- Umrichterart: U-/I-/Zwischenkreis-/Direktumrichter,
- Bypass-System für den Betrieb bei Umrichterausfall, direkt, Stern-Dreieck
- Schutzart, Bauart, Kühlung, Verlustabfuhr
- Aufstellung, Platzbedarf
- Netzbelastung durch Blindleistung und Oberschwingungen, Filter, Kompensation
- Netzanschluss, Schaltgeräte
- Art der Regelung: Lage, Drehzahl, Moment, Leistung, Menge, Sollwerte, Grenzwerte, Genauigkeit
- Steuerung, Instrumentierung, Rechner-Interface
- Automatischer Anlauf, gesteuertes Anhalten, Wiedereinschalten
- Schutz gegen Überlast, Kurzschluss ...

Weitere Informationen über die Eigenschaften und Möglichkeiten der Umrichtertechnik sind in der **Tabelle 9.1** zu finden.

	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 % +Feldschwächung	0 – 100 % +Feldschwächung	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	f/I+Grenzen

Tabelle 9.1: Eigenschaften der Umrichter für Drehfeldmaschinen-Antriebe

ASM = Asynchronmaschine, SM = Synchronmaschine,
(PM) = Synchronmaschine mit Dauermagneterregung,
Filter = LC-Glied an den Motorklemmen

Bemerkungen:

Die Grenze des Frequenzbereiches wird bestimmt durch die Schaltfrequenz der Stromrichterbauelemente, welche mit steigender Leistung abnimmt.

Umrichter für Gleichstromantriebe sind in diesem Vergleich nicht enthalten. Es werden gesteuerte Gleich- oder Wechselrichter eingesetzt, dh. der Aufwand ist kleiner, die Netzbelastung ist wie beim I-Umrichter, der Drehzahlstellbereich ist gross, die Drehmomentwelligkeit klein.

10 Wirtschaftlichkeit des Energiesparens bei elektrischen Antrieben

10.1 Einführung

Massnahmen zur sparsamen und rationellen Energienutzung bei elektrischen Antrieben werden nur dann durchgeführt, wenn sie

- Kosteneinsparungen erbringen,
- die Anlage technisch verbessern.

Als Beispiele sind hier der Einsatz von "High-Efficiency-Motoren", der Ersatz von einfachen Antrieben durch umrichter gespeiste Antriebe oder der Einsatz von komplexen Steuerungssystemen zu nennen.

Bei der Bewertung der Massnahmen nach rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten, können verschiedene Verfahren eingesetzt werden:

- Statische Verfahren, bei denen mit konstanten Kosten und Erträgen gerechnet werden kann.
- Dynamische Verfahren, bei denen die Veränderung der Kosten und Erträge während der Nutzungsdauer abgeschätzt und der Zeitwert des Geldes berücksichtigt wird [32].

Investitionen im Energiebereich haben i.A. eine lange Nutzungsdauer, mehr als 5 Jahre, dh. sie erfordern eine langfristige Betrachtungsweise, unter Berücksichtigung der Veränderung der Kosten und Erträge. Bei der Wahl der Verfahren ist dieser Umstand zu berücksichtigen.

Daher ist eine rein statische Wirtschaftlichkeitsrechnung, welche die Teuerung und Preissteigerung nicht berücksichtigt, aufgrund des langen Betrachtungszeitraumes ungeeignet.

Bezüglich der Aufgabenstellung ist zu unterscheiden zwischen

- **Vergleich von Systemen:** Vergleich verschiedener Varianten einer Massnahme zur Verbesserung der Energiesituation auf der Basis: Unterschied der jährlichen Kosten während der Nutzungsdauer. Welches Antriebssystem ist für

einen bestimmten Fall am wirtschaftlichsten ?

- **Beurteilung von Energiesparmassnahmen,** im Vergleich zum Istzustand auf der Basis: Rückflussdauer der Mittel, jährliche Einsparungen an Kapital- und Energiekosten.

10.2 Grundbegriffe, Rechengrößen

Der Wirtschaftlichkeitsrechnung muss eine eindeutige Aufgabenstellung, ein Modell mit einer klaren Zielsetzung und fundierten Parametern, zugrunde gelegt werden.

Die Aufgabenstellung sollte

- die Problemstellung,
- die zu vergleichenden Alternativen,
- die für die Analyse erforderlichen Parameter und Grunddaten

umfassen.

Die folgenden Größen sind zu ermitteln und in der Analyse zu berücksichtigen:

- Investitionskosten I : Für Anlage, Planung und Finanzierung während der Basiszeit.
- Nutzungsdauer der Anlage n : 15 - 25 Jahre.
- Laufende, jährliche Kosten für den Kapitaleinsatz I , d.h. Abschreibungen und Zinsen bei einem Zinssatz i ,

gekennzeichnet durch die Annuität An , bzw. den Annuitätsfaktor a :

$$An = I \cdot \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \approx I \cdot (1/n + 0,5i)$$

$$a = \frac{(1+i)^n i}{(1+i)^n - 1} \approx (1/n + 0,5i)$$

Die Grösse des Zinssatzes hängt von der Aufgabenstellung ab.

Bei Investitionen in Gebäuden kann der Hypothekarzinssatz gewählt werden. Für Investitionen in der Industrie ist ein höherer Zinssatz

zu nehmen, welcher i.a. ungefähr 1 - 2 % über dem Hypothekarzinssatz liegt, da neben den Kosten für das Fremdkapital auch noch die Eigenkapitalverzinsung zu berücksichtigen ist.

- Betriebskosten K_B für Bedienung, Unterhalt, Verwaltung...
- Jährliche Betriebskosten K_v für Energie:

$$K_v = P_{el} \cdot t_B \cdot K_E$$

mit: P_{el} der mittleren elektrischen Aufnahmeleistung
 t_B der jährlichen Betriebszeit in h
 K_E dem spezifischen Energiepreis in $Fr./kWh$

Die Preissteigerungsrate für Energie (Elektrizität, Öl, Erdgas), Wartungs- und Unterhaltskosten sind, gleich der Inflationsrate e plus einem Zuschlag von 1 - 2 %.

Bei einem **Vergleich unterschiedlicher Systeme** kann die mittlere elektrische Aufnahmeleistung P_{el} wie folgt bestimmt werden:

- Aus der Nennleistung P_{nenn} und dem Auslastungsgrad a :

$$P_{el} = P_{nenn} \cdot a$$

- Aus der abgegebenen Leistung P , dem Wirkungsgrad η_N und einem Minderungsfaktor $k_\eta (< 1)$, welcher die Reduktion des Wirkungsgrades bei Teillast berücksichtigt:

$$P_{el} = a \cdot P \frac{1}{k_\eta \cdot \eta_N}$$

Bei der **Beurteilung von Energiesparmassnahmen** ist die Differenz der jährlichen Energiekosten massgebend.

10.3 Wirtschaftlichkeitsrechnungen

A) Statische Wirtschaftlichkeitsrechnung

Die durchschnittlichen Jahreskosten K_s einer Variante mit den Investitionskosten I , den Betriebs- und Energiekosten $K_B + K_v$ und dem Annuitätsfaktor $a \approx (1/n + 0,5i)$ sind:

$$K_s = K_v + K_B + a \cdot I$$

Damit ergibt sich:

- Bei einem Variantenvergleich ein Kostenunterschied:

$$\Delta K_s = K_{v1} + K_{B1} - K_{v2} - K_{B2} - a \cdot (I_2 - I_1)$$

- Bei einer Energiesparinvestition I_i eine Kosteneinsparung G gegenüber dem Istzustand K_o :

$$G_s = K_{Vo} + K_{Bo} - K_{Vi} - K_{Bi} - a \cdot I_i$$

und eine Amortisationszeit m (Kapitalrückflusszeit) von: $m = I_i / G_s$

B) Dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung

Dabei geht man z.B. nach [26] vom Gegenwartswert B (Barwert) eines Ausgabenstromes A (Investition und jährlichen Betriebskosten) aus,

$$B = A \cdot d$$

welcher mit dem Diskontierungsfaktor d bewertet wird:

$$d \approx \frac{(1 + i_r)^n - 1}{(1 + i_r)^n \cdot i}$$

Dabei ist i_r der reale Zinssatz: $i_r = i - e$, mit i dem Zinssatz und e dem Teuerungssatz (Inflationsrate).

Die durchschnittlichen Jahreskosten K_D sind dann:

$$K_D = (K_V + K_B) \cdot d \cdot a + a \cdot I$$

Vernachlässigt man die Teuerung, so ist $K_S = K_D$.

Damit ergibt sich

- eine Kosteneinsparung gegenüber dem Istzustand:

$$G_D = (K_{vo} - K_{vi} + K_{Bo} - K_{Bi}) \cdot d \cdot a - I_i \cdot i \cdot a$$

- ein Kostenunterschied:

$$\Delta K_D = \Delta K_{vB} \cdot d \cdot a - a \cdot (I_2 - I_1)$$

$$\text{mit: } \Delta K_{vB} = (K_{v1} - K_{v2} + K_{B1} - K_{B2})$$

Der Faktor $d \cdot a$ stellt die mittlere, prozentuale Wertsteigerung während der Nutzungsdauer über n Jahre dar.

Die **Beurteilung der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung** erfolgt aufgrund der Kennwerte K , G und m , dh. eine Investition ist wirtschaftlich sinnvoll, wenn

- der Gewinn G , bzw. die Kostenunterschiede ΔK_s bzw. ΔK_D positiv sind.
- Die Kapitalrückflusszeit m positiv und nicht zu gross ist.

10.4 Aufwandsrechnung für einen Lüfterantrieb

In einer lufttechnischen Anlage zur Absaugung von Luft mit einem Staubgehalt von $0.5g/m^3$ und einer Temperatur von $85^\circ C$ ist ein Volumenstrom von $V_N = 38000m^3/h$ bei einer Gesamtdruckerhöhung von $3825Pa$ erforderlich.

Entsprechend den Anlagenforderungen wird ein Lüfter radialer Bauart mit den Daten

$$\begin{aligned}\dot{V} &= 31000 - 39500 \text{ m}^3/h \\ \Delta p_g &= 4170 - 3435 \text{ Pa} \\ P_{max} &= 54 \text{ kW} \\ \eta_L &= 0.75 \\ n_L &= 1450 \text{ U/min}\end{aligned}$$

sowie ein Antriebsmotor der Nennbetriebsdaten

$$P_N = 75 \text{ kW}; \quad \eta_M = 0.93; \quad n_N = 1480 \text{ U/min}$$

eingesetzt.

Für die Volumenstromregelung werden die Varianten

- **Drosselregelung** mit Drosselklappe und Stellantrieb
- **Drehzahlregelung** mit Frequenzumrichter

angenommen und miteinander verglichen.

Investitionskosten I

Die spezifischen Kosten der Aggregate sowie die spezifischen Gesamtkosten betragen nach Herstellerangaben

Aggregat	Dross.	Drehz.
Lüfter	8600. – Fr.	8600. – Fr.
Motor	6700. – Fr.	6700. – Fr.
Drosselorgan	7400. – Fr.	
F-Umrichter		34800. – Fr.
Gesamt	22700. – Fr.	50100. – Fr.

Energiebedarf der Varianten

Die Teilparameter zur Berechnung des Energiebedarfs wurden wie folgt ermittelt

Teilparameter	Dross.	Drehz.
Teillastgrad a bei $\dot{V}/\dot{V}_N = 0.65$	0.28	0.28
Lüfter Ausgangsleistung P_{NA} in kW	41	41
Nennwirkungsgrad $\eta_{1N} = \eta_L \eta_M$ $\eta_{2N} = \eta_L \eta_M \eta_U$	0.745	0.72
Wirkungsgradminderungsfaktor $k_{\eta 1} = k_{\eta L} k_{\eta M}$ $k_{\eta 2} = k_{\eta L} k_{\eta M} k_{\eta U}$	0.375	0.95
Betriebszeit in h/a	5366	5366
Energiepreis in Fr./kWh	0.11	0.11

Leistungsbedarf: $P_{el} = a \cdot P \frac{1}{k_{\eta} \cdot \eta_N}$

Drosselregelung:

$$P_{el} = 0.28 \cdot 41 (1 / (0.375 \cdot 0.745)) \text{ kW} = 41.1 \text{ kW}$$

Drehzahlregelung:

$$P_{el} = 0.28 \cdot 41 (1 / (0.95 \cdot 0.72)) \text{ kW} = 16.8 \text{ kW}$$

Mögliche Energieeinsparungen pro Jahr:

$$E_B = t_B \cdot P_{el}$$

Drosselregelung:

$$E_B = 5366 \cdot 41.1 \text{ kW} = 220'500 \text{ kWh}$$

Drehzahlregelung:

$$E_B = 5366 \cdot 16.8 \text{ kW} = 90'100 \text{ kWh}$$

Die Energieeinsparungen beim Einsatz der Drehzahlregelung betragen gegenüber der Drosselregelung 59%.

Jährliche Kosten

	Drossel- regelung	Drehzahl- regelung
Investitionskosten	22'700 Fr	50'100 Fr
Annuitätsfaktor	0.11	0.11
Kapitalkosten	2'497 Fr	5'511 Fr
Heutige Energiekosten	24'255 Fr	9'911 Fr
Mittl. Wertsteigerungsfaktor $d \cdot a$	1.421	1.421
Mittlere Energiekosten	34'466 Fr	14'084 Fr
Totale Kosten	36'963 Fr	19'595 Fr

Die mittlere jährliche Einsparung beträgt 17'368 Fr. Die Mehrkosten für die Drehzahlregelung von 27'400 Fr werden in weniger als 2 Jahren durch die Verminderung der jährlichen Energiekosten um 14'344 Fr. gedeckt.

Schlussfolgerung

Für das angenommene Beispiel ist der Einsatz eines drehzahlgeregelten Lüfters ökonomisch, da eine Einsparung von 60 % durch Elektroenergieeinsparung erzielt werden kann und der Mehraufwand damit innerhalb von 2 Jahren zurückgezahlt wird.

10.5 Variantenvergleich

Das folgende Beispiel soll zeigen, wie die Wirtschaftlichkeitsrechnung durchzuführen ist, wenn die Nutzungsdauern der zu untersuchenden Varianten (10 und 20 Jahre) verschieden gross sind.

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung wird wie oben angegeben durchgeführt, die Zinssätze und Preissteigerungsraten müssen jedoch unter Berücksichti-

gung der Inflationsrate auf reale Grössen umgerechnet werden [9].

	nomin. Grösse	Infla- tions- rate	reale Grösse
Zinssatz	7%	4%	$7\% - 4\% = 3\%$
Strompreissteigerung	5%	4%	$5\% - 4\% = 1\%$
Preissteigerung für Wartung, Unterhalt	5%	4%	$5\% - 4\% = 1\%$

Damit ergeben sich die folgenden jährlichen Kosten für die Varianten I und II:

	Variante I	Variante II
Nutzungsdauer	20 Jahre	10 Jahre
Investitionskosten	100'000 Fr	80'000 Fr
Annuitätsfaktor	0.067	0.117
Kapitalkosten	6'700 Fr	9'360 Fr
Heutige Wartungskosten	5'000 Fr	5'000 Fr
Mittl. Wertsteigerungsfaktor $d \cdot a$	1.101	1.101
Mittlere Wartungskosten	5'505 Fr	5'505 Fr
Heutige Energiekosteneinsparung	16'000 Fr	14'500 Fr
Mittl. Wertsteigerungsfaktor $d \cdot a$	1.101	1.101
Mittlere Energiekosten	17'616 Fr	15'964 Fr
Totale Kosten	5'411 Fr	1'099 Fr

Die mittlere Einsparung bei der Variante I ist also 5 mal grösser als bei der Variante II. Schliessen sich diese beiden Varianten gegenseitig aus, so ist die Variante I die rentablere.

Literatur

- [1] Biller, G.: *High Efficiency Motors for Severe Duty Environments*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-14, No.4, July 1978
- [2] Böhm, W.: *Elektrische Antriebe*, Kamprath-Reihe Vogel Buchverlag, Würzburg, 1984
- [3] M.Bongard, M.Jufer: *Analyse du rendement energetique de processus industriels de productique*, Projet RAVEL-Domaine 21: Force Projet d'étude 21.55, avril 1992, Best.Nr. 724.397 D
- [4] Bradley, A.: *Energy Savings with Adjustable Frequency Drives*, Publikation DGI - 2.1, 1984
- [5] Bradley, A.: *SMC Plus - Intelligente Motorsteuerung als Pumpensteuerung*, Publikation 150-911G, 1989
- [6] Budig, P.K.: *Drehzahlvariable Drehstromantriebe mit Asynchronmotoren*, VEB Verlag Technik, Berlin, 1988
- [7] Budig, P.K.; Muster, J.; Zimmermann, R.: *Programmpaket PEMOVER*, Tagung an der TU Chemnitz, Februar 1989
- [8] Bundesamt für Konjunkturfragen: *Auslegung und Betriebsoptimierung von Umwälzpumpen*, 1991, Best.Nr. 724.330 D
- [9] Bundesamt für Konjunkturfragen: *RAVEL zahlt sich aus*, 1992, ECOPLAN
- [10] Bundesamt für Konjunkturfragen: *Schweizerische Gesamtenergiestatistik*, 1990
- [11] *Energieverbrauch in der schweizerischen Industrie im Jahre 1990*, Schweizerischer Energie-Konsumenten-Verband von Industrie und Wirtschaft
- [12] Grumbrecht, P.; Shehata, M.A.: *Comparative Study on Different High Power Variable Speed Drives with Permanent Magnet Synchronous Motors*, AEG Berlin, FRG
- [13] ETH Zürich: *Leistungselektronik - Messtechnik: Einführung in die Leistungselektronik*
- [14] Federal Energy Administration: *Energy Efficiency and Electric Motors*, Washington DC, Case 78 537, May 1976
- [15] Fischer, R.: *Elektrische Maschinen*, C.Hanser Verlag, Heidelberg, 1987
- [16] Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik e.V.: *Beeinflussungsprobleme elektrischer Energieversorgungsnetze*, Technischer Bericht 1-262, 1989
- [17] Gutt, H.-J.; Zeller, Th.: *Self-Learning Temperature-Simulation- System for Thermal Protection of Squirrel-Cage-Motors*, ICEM 88
- [18] Heumann, K.: *Grundlagen der Leistungselektronik*, Teubner Studienbücher, Stuttgart, 1985
- [19] Hoffmann, S.: *Ermittlung von statistischen Unterlagen zur ökonomischen Beurteilung der elektrischen Kennwerte von Asynchronmotoren mit 0.25 bis 100 kW*. Bericht 12/01/67 der Zentralstelle für wirtschaftliche Energieanwendung Leipzig.
- [20] Hortig, G.: *Betriebsarten elektrischer Maschinen*, EMA 66.Jahrg., Nr.12, Heidelberg, 1987
- [21] Huneus, H./et al.: *Medium Alloyed Magnetic Steel with Low Core Loss and High Permeability*, Journal of Magnetism 112, 1992, p159-161
- [22] IEC Empfehlung: *Leitfaden für die Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades von Umrichter gespeisten Induktionsmotoren (I C2, SC C2)*
- [23] Krawtschik, A.E., Strelbitzki, E.K.: *Einfluss von Ausgangsdaten auf die Geometrie und die technisch-ökonomischen Kennziffern von Asynchronmotoren*, Elektrotechnik 1976, H.11, S28-80
- [24] Kümmel, F.: *Elektrische Antriebstechnik*, Bd.2, VDE Verlag, Berlin-Offenbach, 1986
- [25] Lappe, R.: *Thyristor-Stromrichter für Antriebsregelungen*, VEB Verlag Technik, Berlin, 1970

- [26] Leemann, R.: *Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalyse von Energiesystemen - Ein Leitfaden*, RAVEL-Impulsprogramm, Zürich, 1991
- [27] Meinecke AG, Südstrasse 2, D - 3014 Laatzen: *Ultraschall Durchflussmesser UDM*
- [28] Meyer, M.: *Elektrische Antriebstechnik I*, Springer Verlag, Berlin, 1985
- [29] Meyer, M.: *Elektrische Antriebstechnik II*, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1987
- [30] Mirbach, E.; Reiche, H.: *Der Einsatz ronden-geglühter Magnetkörper- eine energiewirtschaftliche Alternative für die Herstellung und den Betrieb von Asynchronmotoren*, Elektrik 8, Berlin, 1992
- [31] Piltz, E.: *Energiebedarf und Schallerzeugung bei verschiedenen Methoden der Volumenstromvariation in Ventilatoranlagen*, Sonderdruck Stäfa Ventilator AG, 09.61E - 12/80
- [32] RAVEL-Handbuch: *Strom rationell nutzen*, Verlag Fachvereine, Zürich, 1992
- [33] Schorch GmbH : *Energieeinsparungen durch drehzahlveränderbare Drehstromantriebe*, 1987
- [34] Siemens AG: *Projektierung von Normmotoren*, Sonderdruck Energietechnik
- [35] Smit, A.S.: *Evaluation of Motor Efficiency*, The Technical Engineer, June 1980, pp 53-55
- [36] Stüben, H.: *Elektrische Antriebstechnik - Formeln, Schaltungen, Diagramme*, Brown Boveri Fachbuch, Mannheim, 1987
- [37] VEM-Handbuch: *Die Technik der elektrischen Antriebe*, VEB Elektroprojekt und Anlagenbau, Berlin, 1986
- [38] Vogel, J.: *Grundlagen der elektrischen Antriebstechnik mit Berechnungsbeispielen*, Dr. A.Hüthig Verlag, Heidelberg, 1976
- [39] Vogel, J.: *Erwärmungsberechnung und Typenleistungsbestimmung elektrischer Maschinen nach dem Zweikomponentenmodell*, Dissertation TU Dresden, 1963
- [40] Vogel, J.: *Wicklungserwärmung elektrischer Maschinen im nichtstationären Betrieb*, Elektrik 37, Berlin, 1983, S.19-20
- [41] Vogel, J. u.a.: *Elektrische Antriebstechnik*, 4.Auflage, VEB Verlag Technik, Berlin, 1988
- [42] Vogel, J.: *Systemelemente des thermischen Zweikomponentenmodells*, Elektrik 37, Berlin, 1983, S.74-75
- [43] *Gleichstrom- oder Drehstromantrieb?* Zentralverband der elektrotechnischen Industrie (ZVEI) der Bundesrepublik Deutschland, Fachverband Elektrische Antriebe