



Programmgruppe Technologiefolgenforschung

Elektrische Antriebe

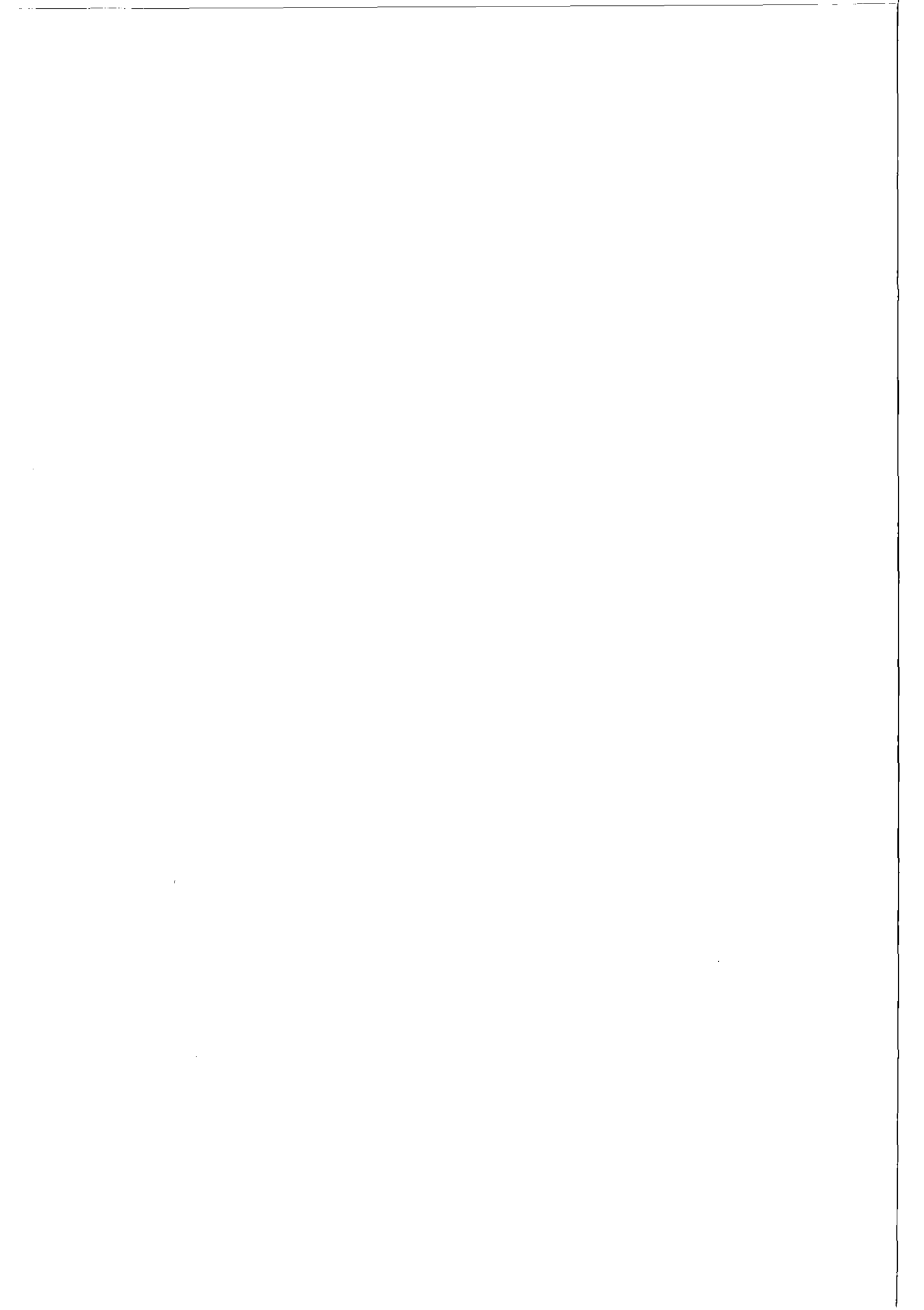
G. Immel, A. Saller

Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München

IKARUS

*Instrumente für
Klimagas-Reduktionsstrategien*







Teilprojekt 8 „Querschnittstechniken“
Forschungsstelle für Energiewirtschaft
der Gesellschaft für Praktische Energiekunde e.V. München

Elektrische Antriebe

G. Immel, A. Saller

Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München

IKARUS – ein Entwicklungsvorhaben des Forschungszentrums Jülich
im Auftrag des Bundesministers für Bildung, Wissenschaft,
Forschung und Technologie

Nr. 8-05

Die Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF; ehemals BMFT) unter dem Kennzeichen ET9188A durchgeführt.

Die Veröffentlichung erfolgt mit Zustimmung des Auftraggebers.

Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

Die Studie wurde im März 1997 fertiggestellt.

Koordinator Teilprojekt 8 „Querschnittstechniken“

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Helmut Schaefer

Forschungsstelle für Energiewirtschaft

der Gesellschaft für Praktische Energiekunde e.V. München

Projektleiter Teilprojekt 8 „Querschnittstechniken“

Dipl.-Ing. Werner Megele

Forschungsstelle für Energiewirtschaft

der Gesellschaft für Praktische Energiekunde e.V. München

Herausgeber: Forschungszentrum Jülich GmbH
Programmgruppe Technologiefolgenforschung
D-52425 Jülich
Telefon 0 24 61 / 61- 32 68 Fax 0 24 61/61- 24 96

Copyright: Forschungszentrum Jülich 1997

Vertrieb: Forschungszentrum Jülich GmbH
Zentralbibliothek
D-52425 Jülich
Telefon 0 24 61 / 61- 53 68 Fax 0 24 61/61- 61 03

ISSN 0946-0012

Vorwort der Projektleitung

Die vorliegende Studie stellt ein Teilergebnis der umfangreichen Arbeiten zum IKARUS-Projekt (IKARUS - Instrumente für Klimagasreduktions-Strategien) des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) dar.

Ziel von IKARUS ist die Erarbeitung, Bereitstellung und Pflege eines Instrumentariums, bestehend aus Computer-Modellen und Datenbanken, mit dessen Hilfe verschiedene Strategien zur Reduktion der energiebedingten Emissionen von klimarelevanten Gasen, insbesondere CO₂, formuliert, gegeneinander abgewogen und in ihren Auswirkungen auf die Technikstrukturen, Emissionen und Kosten sowie in beschränktem Umfang auf die Gesamtwirtschaft überprüft werden können.

Kern der Modellentwicklung ist ein technikorientiertes Optimierungsmodell, das den Energiefluß der Bundesrepublik Deutschland mittels 2000 Techniken abbildet.

Für die Stützjahre 1989¹⁾, 2005 und 2020 ermittelt dieses Modell kostenoptimale energietechnische Strukturen unter vorgegebenen Randbedingungen wie z.B. einer CO₂-Reduktion. Zur Überprüfung der volkswirtschaftlichen Verträglichkeit der Modellergebnisse sowie zur Bereitstellung von Rahmendaten der Wirtschaftsentwicklung dient das Makroökonomische Informationssystem MIS. Neben Technikketten-Vergleichsrechnungen erlauben weitere Simulationsmodelle für die Bereiche "Raumwärme", "Strom und Fernwärme", "Verkehr" sowie "Industrie und Kleinverbraucher" detaillierte zusätzliche sektorspezifische Untersuchungen.

Die Datenbank ist einerseits Datenbasis für das Modellinstrumentarium, darüber hinaus aber auch als selbständiges Informationssystem nutzbar. Sie enthält alle relevanten technischen, wirtschaftlichen und umweltbezogenen Daten zu Einzel- und Mischtechniken für die Sektoren Primärenergie, Umwandlung, Haushalte, Kleinverbraucher, Industrie und Verkehr, die für die o.g. Stützjahre nach Expertenschätzung repräsentativ sind.

Als Bindeglied zwischen dem nationalen Projekt und dem internationalen Umfeld wurde ferner in die erste IKARUS-Projektphase das Vorhaben "Verifikation" integriert, mit dem Techniken und Verfahren zur Überprüfung der Vertragstreue der Staaten untersucht werden, die Mitglieder der Klimakonvention sind.

¹⁾ Gegenwärtig erfolgt eine Aktualisierung der Datenbasis auf das Bezugsjahr 1995.

Auftraggeber des Projektes ist der Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF), Auftragnehmer das Forschungszentrum Jülich GmbH. Die Projektleitung obliegt der Programmgruppe Technologiefolgenforschung (TFF) des Forschungszentrums Jülich, die auch die Verifikationsthematik bearbeitete.

Die Projektpartner und ihre Themen sind:

- 1.) Forschungszentrum Jülich, Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE): Modellentwicklung - Optimierungsmodell mit makroökonomischer Einbettung, Teilmodelle Raumwärme, Strom/Fernwärme, Verkehr.
- 2.) Fachinformationszentrum (FIZ), Karlsruhe: Datenbank.
- 3.) Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin: Primärenergie - Gewinnung fossiler Energieträger im Inland, Außenhandel, erneuerbare Energiequellen.
- 4.) Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart: Energieumwandlung, -speicherung, -transport und -verteilung.
- 5.) Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik, Technische Universität München: Haushalte und Kleinverbraucher - Raumwärme, Haushaltsgeräte, Prozeßwärme.
- 6.) Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe: Industrie - energieintensive Einzeltechniken, Branchen, Sparten; Teilmodell-Entwicklung.
- 7.) Technischer Überwachungsverein (TÜV) Rheinland, Sicherheit und Umweltschutz GmbH, Abt. Verkehr und Umwelt, Köln: Personen- und Güterverkehr auf Straße, Schiene, zu Wasser und in der Luft.
- 8.) Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), München: Querschnittstechniken - sektor- und branchenübergreifende Techniken zur Energieumwandlung.

Die im Projekt erarbeiteten Berichte können über die Zentralbibliothek des Forschungszentrums Jülich (KFA) erworben werden. Damit soll einerseits dem Gesichtspunkt der Transparenz und Nachvollziehbarkeit von Daten und Methoden in IKARUS Rechnung getragen und andererseits denjenigen, die nur an Teilbereichen interessiert sind, der einfache Zugang zu den Arbeitsergebnissen eröffnet werden.

G. Stein, Projektleitung IKARUS

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	1
1.1 ALLGEMEINES	1
1.2 GLIEDERUNG DER DOKUMENTATION	2
1.3 METHODIK	2
2 SYSTEMANFORDERUNGEN	3
2.1 DREHZAHL- UND DREHMOMENTANFORDERUNG	4
2.2 BETRIEBSARTEN	9
2.2.1 Betriebsart S1	9
2.2.2 Betriebsarten S2, S3 und S6	10
2.2.3 Betriebsarten S4, S5, S7, S8 und S9	11
2.3 SCHUTZARTEN	15
2.4 KÜHLARTEN	17
3 TECHNIK BESCHREIBUNG	20
3.1 MOTOREN	21
3.1.1 Asynchronmaschine	21
3.1.2 Synchronmaschine	30
3.1.3 Gleichstrommaschine	34
3.2 STELLGLIEDER	38
3.2.1 Frequenzumrichter für Synchron- und Asynchronmaschinen	38
3.2.2 Stromrichter für Gleichstrommaschinen	48
4 ANLAGEN- UND SYSTEM BESCHREIBUNG	49
5 TECHNISCH PHYSIKALISCHE ANALYSE	51
5.1 MASCHINENVERLUSTE	51
5.1.1 Stromwärmeverluste	51
5.1.2 Eisenverluste	52
5.1.3 Reibungsverluste	52
5.1.4 Zusatzverluste	52
5.2 UMRICHTERVERLUSTE	53
5.3 MAßNAHMEN ZUR STEIGERUNG DER ENERGETISCHEN EFFIZIENZ	54
5.3.1 Vermeidung von unnötigem Energieverbrauch	55
5.3.2 Reduzierung des spezifischen Energieverbrauches	56
5.3.3 Verbesserung der Wirkungsgrade	56
5.3.4 Energierückgewinnung	64

6 DATENBLATT	66
6.1 DATENBLATT „MOTOR“	67
6.1.1 Allgemeine Angaben	67
6.1.2 Motorkenndaten	69
6.1.3 Konstruktionsdaten	70
6.1.4 Betriebsdaten	70
6.1.5 Ökonomische Daten	71
6.1.6 Umrichterbetrieb	72
6.2 DATENBLATT „UMRICHTER“	73
6.2.1 Allgemeine Angaben	73
6.2.2 Umrichterkenndaten	73
6.2.3 Konstruktionsdaten	75
6.2.4 Geeignete Motoren	75
6.2.5 Betriebsdaten	75
6.2.6 Ökonomische Daten	76
6.3 QUERVERBINDUNGEN	76
7 DATENSAMMLUNG	77
7.1 NOMENKLATUR DER DATENBLÄTTER	77
7.2 BEREICHSEINTEILUNG	79
7.2.1 Motoren	79
7.2.2 Umrichter	83
8 ÜBERGREIFENDE ANALYSE	88
8.1 ASYNCHRONMOTOREN	90
8.1.1 Wirkungsgrade	90
8.1.2 Leistungsfaktoren	94
8.1.3 Leistungsgewichte	98
8.1.4 Kosten	98
8.2 ASYNCHRONMOTOREN AM I-UMRICHTER	100
8.2.1 Wirkungsgrade	100
8.2.2 Kosten	103
8.3 ASYNCHRONMOTOREN AM PULSWECHSELRICHTER	104
8.3.1 Wirkungsgrade	104
8.3.2 Kosten	107
8.4 SYNCHRONMOTOREN	108
8.4.1 Wirkungsgrade	108
8.4.2 Leistungsgewichte	108
8.4.3 Kosten	108

8.5 SYNCHRONMOTOREN AM I-UMRICHTER.....	110
8.5.1 Wirkungsgrade.....	110
8.5.2 Kosten.....	112
8.6 SYNCHRONMOTOREN AM PULSWECHSELRICHTER.....	112
8.6.1 Wirkungsgrade.....	112
8.6.2 Kosten.....	114
8.7 GLEICHSTROMMOTOREN.....	115
8.7.1 Wirkungsgrade.....	115
8.7.2 Leistungsgewichte.....	115
8.7.3 Kosten.....	116
8.8 GLEICHSTROMMOTOREN AM STROMRICHTER.....	117
8.8.1 Wirkungsgrade.....	117
8.8.2 Kosten.....	118
9 BEISPIEL FÜR DIE HANDHABUNG DER DATENBLÄTTER	120
9.1 ANWENDUNGSFALL FÜR EINEN DREHKOLBENVERDICHTER MIT $M = \text{CONST}$	120
9.1 ANWENDUNGSFALL FÜR EINEN VENTILATOR MIT $M \sim N^2$	128
9.2 BELIEBIGER LASTFALL.....	131
10 QUELLENVERZEICHNIS	134
ANHANG.....	135



1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Mit Hilfe der Komponenten der elektrischen Antriebstechnik wird elektrische Energie in mechanische Energie der jeweils erforderlichen Form umgewandelt und der Betrieb von Arbeitsmaschinen mit ihren vielfältigen Anforderungen an Drehmoment, Drehzahl, Regel- und Anfahrverhalten ermöglicht. Theoretisch könnten sämtliche Antriebsaufgaben mit einem einzigen Universalantrieb gelöst werden. Allerdings sollte aufgrund des Kostenaspekts und einer rationalen Energienutzung stets ein angepaßtes, hinreichend optimiertes Antriebskonzept ausgewählt werden.

Für eine spezielle Antriebsaufgabe ist generell ein Antriebssystem zu bestimmen, das den gewünschten Leistungs-, Drehzahl- und Umfelforderungen genügt. Das Antriebssystem muß sowohl ein- als auch ausschaltbar sein, wobei mit Hilfe des Antriebsmotors der gesamte Maschinenverbund hochgefahren werden kann. Oft ist zusätzlich eine Drehzahlstellung oder auch -regelung während des Betriebs zu gewährleisten. Dies bedeutet, daß neben dem Motor selbst elektrische Komponenten notwendig sind, die die Ausführung der geforderten Nebenbedingungen ermöglichen. Diese Aufgabe erfüllen heutzutage in erster Linie Umrichter, die sowohl über die Einspeisespannung als auch die Einspeisefrequenz des Motors die Grundlage für eine Drehzahlstellung liefern.

Der Elektromotor sowie der Umrichter stellen die Hauptkomponenten eines elektrischen Antriebssystems dar. Die Investitionen und die energetischen Eigenschaften des Gesamtsystems sind daher entscheidend von der Art und Dimensionierung des Motors und des Umrichters abhängig.

Die Ursachen für niedrige Nutzungsgrade und den damit verbundenen erhöhten Energieverbrauch von elektrischen Antriebssystemen sind in den meisten Fällen

- eine oft anzutreffende Überdimensionierung,
- eine nicht optimierte Abstimmung der Einzelkomponenten,
- eine fehlende bzw. nicht optimierte Regelung oder
- eine energetisch ungünstige Betriebsweise.

Die Zielsetzung der im Rahmen des BMBF-Projekts IKARUS (TV 8) angefertigten Studie *Elektrische Antriebe* besteht darin, es dem Nutzer zu ermöglichen, ein Antriebssystem gemäß den vorhandenen Systemanforderungen zu selektieren und anhand von ausgewählten Motor- und Umrichterdatenblättern ein bezüglich der technischen, energetischen und wirtschaftlichen Aspekte optimiertes Antriebssystem zu bestimmen.

1.2 Gliederung der Dokumentation

Der Bericht *Elektrische Antriebe* stellt die durch eine Arbeitsmaschine sowie das Betriebsfeld bedingten Anforderungen an ein Antriebssystem heraus (*Kapitel 2*) und gibt darüber hinaus einen allgemeinen Überblick über die verschiedenartigen Techniken von Elektromotoren und Umrichtern (*Kapitel 3*). Über die wechselseitigen energetischen Rückwirkungen von Motor und Umrichter (*Kapitel 4*) wird auf Möglichkeiten zu einer Steigerung der energetischen Effizienz im betrachteten Technikbereich hingewiesen (*Kapitel 5*).

Der Beschreibung der Datenblätter der verschiedenen Motoren und Umrichter (*Kapitel 6/7*) folgt eine übergreifende Analyse technischer sowie wirtschaftlicher Zusammenhänge und Tendenzen (*Kapitel 8*). Anhand von konkreten Anwendungsbeispielen wird die Handhabung der Datenblätter demonstriert (*Kapitel 9*). Die einzelnen Datenblätter der Motoren und Umrichter sind im IKARUS-Bericht 8-05a *Elektrische Antriebe: Datensammlung* zusammengefasst.

1.3 Methodik

Als Datenbasis für den vorliegenden Bericht dienten in erster Linie Herstellerdaten. Um die technikspezifischen Kennwerte in eine nutzerfreundliche Form zu bringen, wurden repräsentative Daten zur Beschreibung typisierter Motoren und Umrichter zusammengefaßt. Die Ergebnisdarstellung ist in Form und Inhalt darauf ausgerichtet, eine Abbildung des dem praktischen Einsatz entsprechenden Betriebsverhaltens der Elektromotoren und Umrichter zu ermöglichen. Die gewählte Vorgehensweise ermöglicht somit den Vergleich konkurrierender Techniken.

Folgende *Motorenarten* wurden untersucht:

- Asynchronmaschine (Käfigläufer, Hoch- und Niederspannung)
- Synchronmaschine (permanent- und fremderregt)
- Gleichstromnebenschlusmaschine (fremderregt)

Folgende *Umrichterarten* wurden untersucht:

- Spannungszwischenkreisumrichter für Drehfeldmaschinen
- Stromzwischenkreisumrichter für Drehfeldmaschinen
- Stromrichter (in Mikroprozessor- und Hybridtechnik) für Gleichstrommaschinen

Für die energetische Bewertung elektrischer Antriebssysteme wurde zum einen ausschließlich der Elektromotor, d.h. das Antriebssystem ohne Umrichter, für unterschiedliche Auslastungen betrachtet. Zum anderen wurden Kombinationen aus Umrichter und Elektromotor für die beiden charakteristischen Lastverläufe ($M = \text{const.}$ und $M \sim n^2$) untersucht. Die Datenblätter enthalten darüber hinaus alle wesentlichen Kenngrößen zur technischen, energetischen und wirtschaftlichen Beurteilung.

2 Systemanforderungen

Produktionsanlagen mit stationären Antrieben sind überwiegend mit Elektromotoren ausgerüstet, die eine Vielzahl unterschiedlicher Antriebsaufgaben bei verschiedensten Belastungsbedingungen erfüllen. Hierbei sind unterschiedlichste Verstell- und Transportbewegungen durchzuführen. Elektrische Antriebe zeichnen sich in erster Linie dadurch aus, daß der Energiefluß einfach, schnell und verlustarm steuerbar ist. Hieraus resultieren kurze Reaktionszeiten und ein hoher Systemwirkungsgrad.

Aufgrund wesentlicher Vorteile gegenüber anderen Kraftmaschinen sind Elektromotoren bei stationären Antrieben weit verbreitet. Beispielsweise läuft im Verbrennungsmotor die Energieumsetzung nur unter Schadstoff- und hoher Geräuschentwicklung ab. Zudem liefert dieser im Vergleich zum Nennmoment ein geringes Anzugsmoment und muß deshalb über eine Kupplung und ein Schaltgetriebe an die geforderten Betriebsbedingungen angepaßt werden.

Turbinenantriebe können nur bei relativ hohen Drehzahlen und relativ hohen Einheitsleistungen betrieben werden. Zudem ist wie bei Dampfmaschinen eine eigene Dampferzeugungsanlage erforderlich, wodurch sich der Systemwirkungsgrad erheblich vermindert. Wasserturbinen weisen den Nachteil auf, daß sie örtlich gebunden sind.

Generell weisen elektrische Antriebe folgende Vorzüge auf:

- hohe Leistungsdichte verbunden mit hoher kurzzeitiger Überlastbarkeit
- einfache Auslegung auf den Arbeitsprozeß
- optimale Anpassungsmöglichkeit an die Arbeitsmaschine
- vergleichsweise hohe Wirkungsgrade
- gutes Teillastverhalten
- nahezu wartungsfreier sowie zuverlässiger Betrieb
- einfache und sichere Bedienbarkeit bei kontinuierlicher Betriebsbereitschaft
- lokal emissionsfreie und geräuscharme Energieumwandlung

Neben den durch das globale Prozeßumfeld vorgegebenen äußeren Bedingungen wie Schutzart, Raumangebot, Netzanschluß etc. bilden Leistung, Drehzahl, Lastkennlinie und Betriebsart die wesentlichen Auswahlparameter für ein Antriebssystem.

In den folgenden Kapiteln werden die wesentlichen Systemanforderungen, die an ein Antriebssystem gestellt werden, näher erläutert.

2.1 Drehzahl- und Drehmomentanforderung

Die Aufgabe von Elektromotoren ist es, elektrische Energie in mechanische Energie umzuwandeln und diese einer nachgeschalteten Arbeitsmaschine zur Verfügung zu stellen.

In **Bild 2-1** ist schematisch der Verbund zwischen einem elektrischem Antriebssystem und einer Arbeitsmaschine mit den entsprechenden Leistungsflüssen dargestellt.

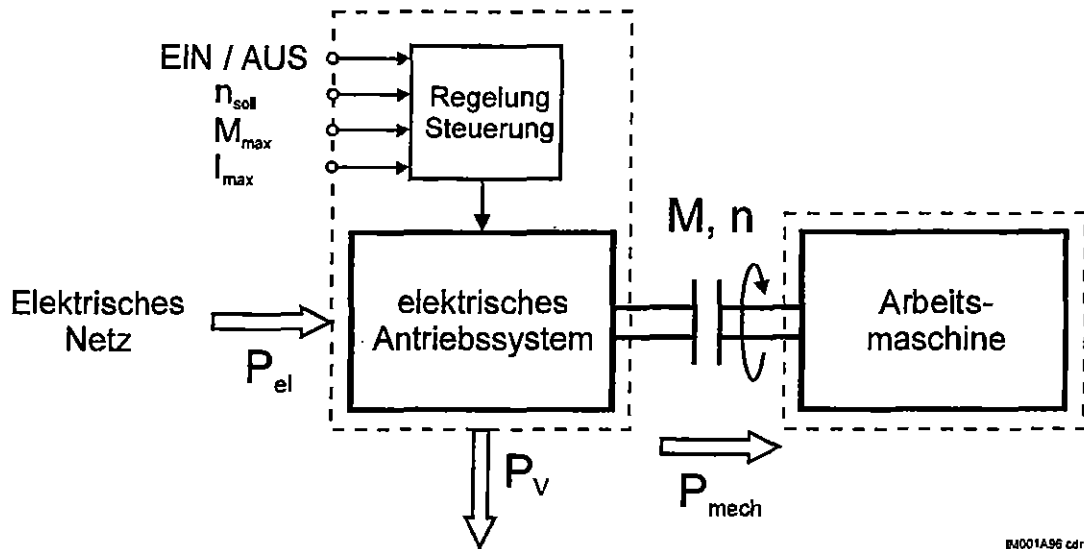


Bild 2-1: Schematische Darstellung des Verbundes Antriebssystem/Arbeitsmaschine

Über die für eine bestimmte Antriebsaufgabe festgelegte Drehzahl- und Drehmomentanforderung ergibt sich die von der Arbeitsmaschine benötigte mechanische Leistung P_{mech} nach:

$$P_{mech} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot M}{60} \quad [W] \quad (2-1)$$

n : Betriebsdrehzahl [min^{-1}]

M : Drehmoment an der Welle [Nm]

Die gesamte aus dem Netz aufgenommene, elektrische Wirkleistung P_{el} stellt sich entsprechend der von der Arbeitsmaschine geforderten mechanischen Leistung P_{mech} und der im Antriebssystem umgesetzten Verlustleistung P_v ein. Die elektrische Wirkleistung P_{el} eines Antriebssystems errechnet sich bei symmetrischer Belastung wie folgt:

$$P_{el} = P_{mech} + P_v = m \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [W] \quad (2-2)$$

m : Anzahl der Netzphasen [-]

U : Netzstrangspannung [V]

I : Stromaufnahme des Antriebes je Strang [A]

$\cos \varphi$: Leistungsfaktor [-]

Der in dem Ausdruck für die elektrische Wirkleistung P_{el} enthaltene Faktor $\cos \varphi$ wird Leistungsfaktor genannt. Der Leistungsfaktor errechnet sich allgemein aus der Wirkleistung P_{el} und der Scheinleistung S wie folgt:

$$\cos \varphi = \frac{P_{el}}{S} \quad [-] \quad (2-3)$$

P_{el} : Wirkleistung [W]
S: Scheinleistung [W]

Abhängig vom Einsatzfall kann ein Antriebssystem ungesteuert bzw. unregelt, gesteuert oder geregelt betrieben werden, wobei eine Einbindung in ein übergeordnetes Steuerungs- bzw. Regelungssystem, vor allem für flexible Produktionsabläufe, sinnvoll und notwendig ist.

Für einen Großteil der Antriebsaufgaben ist nur näherungsweise eine Drehzahlkonstanz erforderlich, so daß der Antrieb unregelt betrieben werden kann. Als Eingangsbefehle für die Steuerung genügen in diesem Fall *EIN* und *AUS*. Bei Belastungsänderungen stellt sich eine Motordrehzahl entsprechend der Maschinencharakteristik bzw. ein neuer Arbeitspunkt ein.

Gesteuerte bzw. geregelte Antriebe kommen überall dort zum Einsatz, wo für bestimmte Stellgrößen (Leistung, Drehzahl, Drehmoment etc.) ein fest vorgegebener Verlauf gefordert wird. Die dem Antrieb zugeführte elektrische Leistung muß durch eine Leistungssteuerungs- oder Leistungsregelungsvorrichtung kontrolliert werden. Sie gewährleistet die Steuerung bzw. Regelung des Antriebs, wobei im Fall einer Steuerung die Stellgröße nach einem festen Fahrprogramm vorgegeben ist.

Bei einer Regelung des Antriebes werden dagegen Istwerte wie beispielsweise Drehzahl oder Drehmoment erfaßt, mit den vorgegebenen Sollwerten verglichen und ggf. korrigiert. Die Regelung bietet somit den Vorteil, auf Belastungsschwankungen bzw. Störungen im Produktionsablauf einzugehen und diese zu kompensieren. Zum Schutz von Antriebssystem und Arbeitsmaschine kann darüber hinaus eine Vorgabe von maximalen Strom-, Momenten- oder Drehzahlwerten erforderlich sein.

Gesteuerte bzw. geregelte Antriebssysteme erlauben eine Integration der Steuervorrichtung in das Umfeld der Anlage. Darüber hinaus wird die Funktionssicherheit der Maschinen gesteigert und der Schutz von Bedienpersonal und Produktionseinrichtungen verbessert. Bei komplexeren Antriebsaufgaben kommen Kombinationen aus Regel- und Steuereinrichtungen zum Einsatz.

Für die Auswahl einer geeigneten Umrichterschaltung muß neben den Nenndaten auch die Betriebsweise des Antriebssystems bekannt sein, d.h. ob der Antrieb im Motorbetrieb für eine

oder beide Drehrichtungen eingesetzt wird bzw. ob eine Möglichkeit zur Nutzbremung (Rekuperation) im Generatorbetrieb vorzusehen ist. Bei einem elektrischen Antriebssystem ist daher generell zwischen dem Einquadranten- und dem Vierquadrantenbetrieb zu unterscheiden. Die unterschiedlichen Betriebszustände eines Antriebssystems lassen sich durch die Lage ihrer M/n -Kennlinie im Koordinatensystem verdeutlichen.

In **Bild 2-2** sind beispielhaft für eine Gleichstrommaschine die möglichen Betriebsbereiche in Form eines Koordinatensystems dargestellt.

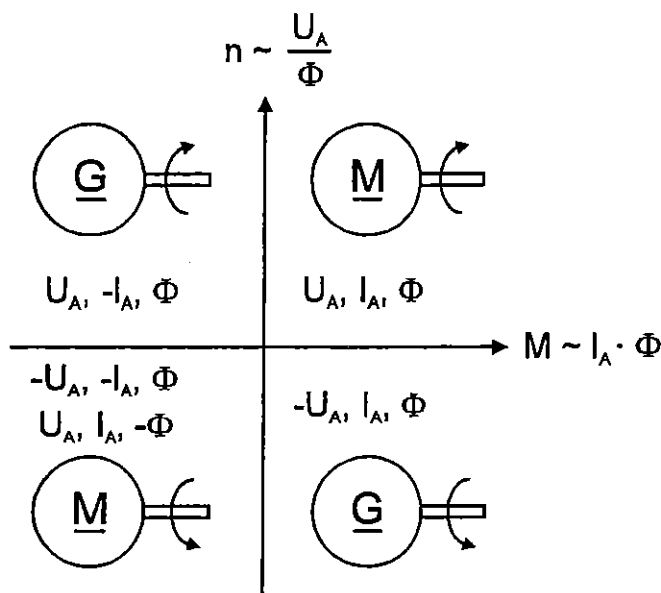


Bild 2-2: Schematische Darstellung der Betriebsbereiche einer Gleichstrommaschine /FIS/

Der Motorbetrieb im 1. Quadranten stellt den Referenzfall dar, wobei die Ankerspannung U_A , der Ankerstrom I_A und das Hauptfeld Φ positiv sind. Für die verschiedenen Betriebsbereiche liegt demnach fest, welches Vorzeichen Ankerspannung, Ankerstrom und Hauptfeld haben müssen. Innerhalb jedes Quadranten lassen sich die Drehzahl und das Drehmoment zwischen Stillstand und Nennwert durch Steuerung der Ankerspannung und darüber hinaus durch Feldänderung variieren.

Stationäre Antriebe an Produktionsanlagen werden oft mit Reduktionsgetrieben, Bremsen und Kupplungen kombiniert und treiben die verschiedensten Aggregate an, wobei sie eine Vielzahl möglicher Bewegungsaufgaben bei unterschiedlichsten Belastungsbedingungen erfüllen müssen. Die Belastung eines Elektromotors wird durch die Charakteristik der Arbeitsmaschine festgelegt. Unerlässlich für die Auswahl eines Antriebes und auch für die Diskussion der Betriebsdaten ist die Kenntnis der Abhängigkeit des Gegen- bzw. Lastmomentes M_L von der Drehzahl.

Die Drehzahlabhängigkeit des Gegenmomentes ($M_L = f(n)$) läßt sich entsprechend der Charakteristik der anzutreffenden Arbeitsmaschine idealisierend durch die folgenden vier typischen Lastfälle beschreiben:

1. Konstantes Belastungsmoment ($M_L = const.$)
(sog. *Konstant-Moment-Antrieb*)
2. Belastungsmoment dem Quadrat der Drehzahl proportional ($M_L \sim n^2$)
(sog. *Strömungsmaschinen-Antrieb*)
3. Hyperbolisch von der Drehzahl abhängiges Belastungsmoment ($M_L \sim 1/n$)
4. Linear von der Drehzahl abhängiges Belastungsmoment ($M_L \sim n$)

Die charakteristischen Lastkennlinien einer Arbeitsmaschine, die alle Grenzfälle möglicher Betriebspunkte einschließen, sind mit beispielhaften Anwendungsgebieten in **Bild 2-3** dargestellt.

Von der Drehzahl unabhängige, konstante Belastungsmomente sind vor allem bei Hebezeugen, Transportbändern und Walzwerken anzutreffen. In manchen Fällen muß beim Anlauf solcher Anlagen ein hohes Losbrechmoment überwunden werden. Das Losbrechmoment einer Maschine beschreibt das Moment, das der Antrieb beim Anfahren aus dem Stillstand aufbringen muß. In diesem Fall ist bei der Auslegung des Antriebs sicherzustellen, daß eine entsprechende kurzzeitige Überlastung ohne Schaden möglich ist. Die vom Antrieb zu erbringende Leistung steigt hierbei proportional mit der Drehzahl an. Soll jede beliebige Drehzahl im Dauerbetrieb gefahren werden können, ist zur Vermeidung von thermischer Überlastung eine Fremdlüftung vorzusehen. Bei Eigenbelüftung ist u.U. das Dauerlastmoment zu reduzieren.

Rund zwei Drittel aller in der Industrie eingesetzten Antriebsmaschinen, im wesentlichen Ventilatoren und Pumpen, weisen die Lastcharakteristik $M_L \sim n^2$ auf. Die Losbrechmomente sind bei diesen Anwendungsfällen meistens sehr gering. Die zur Bewältigung der Antriebsaufgabe geforderte Leistung ändert sich mit der dritten Potenz der Drehzahl.

Die Lastcharakteristik $M_L \sim 1/n$ ($P = const.$) ist gefordert, wenn mit konstantem Materialzug und konstanter Materialgeschwindigkeit gearbeitet wird (z.B. Wickelantriebe, Fahrwerke). Auch bei der spanabhebenden Bearbeitung von Werkstoffen tritt diese Charakteristik auf (z.B. Drehmaschinen). Bei kleinen Drehzahlen sind hier hohe Momente gefordert, bei hohen Drehzahlen wird dagegen mit geringem Moment gearbeitet. Antriebsmotoren weisen im Feldschwäcbereich genau diese Lastcharakteristik auf.

Arbeitsmaschinen mit der Charakteristik $M_L \sim n$ sind in erster Linie bei Kalandern zu finden. Losbrechmomente findet man bei dieser Anwendungsform kaum. Der Leistungsbedarf steigt quadratisch mit der Drehzahl an, so daß eine entsprechende Dimensionierung des Antriebs vorzusehen ist.

In der Praxis treten am häufigsten *Konstant-Moment-* und *Strömungsmaschinen-Antriebe* auf. Daher wird das energetische Verhalten der elektrischen Antriebe ausschließlich für diese beiden Typen in den Datenblättern dargestellt (vgl. Kapitel 6).

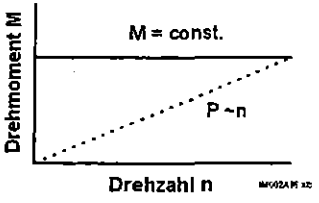
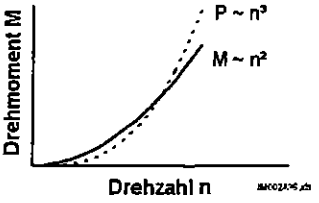
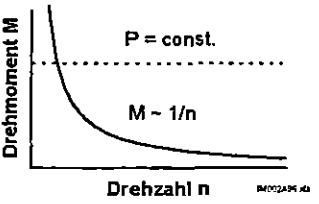
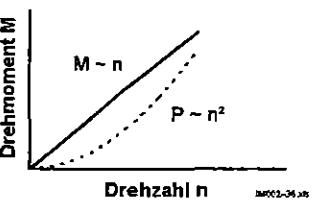
Lastfall	Anwendungsgebiete
 <p>Drehmoment M</p> <p>$M = \text{const.}$</p> <p>$P \sim n$</p> <p>Drehzahl n</p>	<p>Kompressoren, Transportbänder, Mühlen, Textilmaschinen, Hubwerke, Spinnmaschinen, Extruder, Mischer, Sägen, Prüfstände, Walzwerke, Hobelmaschinen etc.</p>
 <p>Drehmoment M</p> <p>$M \sim n^2$</p> <p>$P \sim n^3$</p> <p>Drehzahl n</p>	<p>Pumpen, Ventilatoren, Zentrifugen, Kompressoren, Prüfstände etc.</p>
 <p>Drehmoment M</p> <p>$P = \text{const.}$</p> <p>$M \sim 1/n$</p> <p>Drehzahl n</p>	<p>Rührwerke, Mühlen, Sägen, Fräsmaschinen, Fahrwerke, Drehmaschinen, Wickler, Rundschälmaschinen etc.</p>
 <p>Drehmoment M</p> <p>$M \sim n$</p> <p>$P \sim n^2$</p> <p>Drehzahl n</p>	<p>Wirbelstrombremse, Kalandr etc.</p>

Bild 2-3: Charakteristische Lastkennlinien elektrischer Antriebe

Im allgemeinen erzeugt der Elektromotor ein von der Drehzahl abhängiges Drehmoment. Wird der Motor belastet, so steht dem Motormoment M bei gleicher Drehzahl das Lastmoment M_L der Arbeitsmaschine entgegen. Das Beschleunigungsmoment M_b errechnet sich aus der Differenz aus M und M_L :

$$M_b = M - M_L \quad (2-4)$$

Falls das Motor- und das Lastmoment gleich groß sind, wird das Beschleunigungsmoment zu Null, d.h. die Drehzahl bleibt konstant. Wird der Motor im Leerlauf, d.h. ohne Last betrieben, so wirken als Belastung nur sein Lüfter, die Lager- und Luftreibung sowie ggf. die Bürstenreibung. Für den Fall, daß das Motormoment überwiegt, wird der Motor beschleunigt, im umgekehrten Fall wird der Motor abgebremst.

Um einen sicheren Anlauf zu gewährleisten, muß im gesamten Hochlaufbereich bis zur Betriebsdrehzahl stets ein positives M_b zur Verfügung stehen ($M > M_L$). Der Motor läuft hierbei aus dem Stillstand bis zu der Drehzahl hoch, die sich bei Belastung mit einer Arbeitsmaschine einstellt (Arbeitspunkt: $M = M_L$). Soll ein elektrischer Antrieb für einen Anlauf unter Last ausgelegt werden, so ist zu untersuchen, wie lange der Hochlauf dauert und ob die Maschinenerwärmung im Hinblick auf die beim Anlauf auftretende hohe Verlustleistung in den zulässigen Grenzen bleibt. Beim Anlauf aus dem kalten Maschinenzustand wird vom Hersteller i.allg. eine maximale Hochlaufzeit von bis zu 10 s angegeben.

Ein Arbeitspunkt ist nur dann stabil, wenn von diesem Punkt aus betrachtet zu größeren Drehzahlen hin das Lastmoment und zu kleineren Drehzahlen hin das Motormoment überwiegt. Bei einer Auslenkung aus einem stabilen Arbeitspunkt wird der Antrieb durch Beschleunigung oder Verzögerung wieder in den ursprünglichen Arbeitspunkt gezogen. Beim Betrieb in einem instabilen Arbeitspunkt wird der Antrieb dagegen bei geringfügigen Drehzahlschwankungen unzulässig beschleunigt oder abgebremst.

2.2 Betriebsarten

In der Praxis beschränken sich die Aufgaben elektrischer Antriebe nicht ausschließlich auf ihren Nennbetrieb. Vielmehr arbeiten sie in bestimmten Drehzahl- und Drehmomentbereichen bzw. in Betriebsarten, bei denen sich Anlauf-, Beschleunigungs-, Brems- und Stillstandsintervalle abwechseln. Die geforderte Betriebsart beeinflusst entscheidend die Wicklungstemperatur und muß deshalb bei der Motorauswahl berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurden in einer Norm /VDE 0530.1/ neun unterschiedliche Betriebsarten (S1 bis S9) definiert, anhand derer verschiedene zeitliche Lastverläufe beurteilt werden können.

2.2.1 Betriebsart S1

Die Betriebsart S1 kennzeichnet einen Dauerbetrieb bei konstantem Belastungszustand. Der Motor wird mit den im Datenblatt angegebenen Nenngrößen für Drehmoment, Drehzahl und Leistung an der Welle belastet. Im Dauerbetrieb erreicht die Ständerwicklung im Beharrungszustand die maximale Motortemperatur ϑ_{max} . Übersteigt diese die Grenztemperatur gemäß der Isolierstoffklasse der Wicklungsisolation, so verringert sich die Lebensdauer der Maschine. Im Dauerbetrieb kann ein Antrieb maximal mit seiner Nennleistung betrieben werden.

Die zeitlichen Verläufe von Wellenleistung P , Verlustleistung P_V und Motortemperatur ϑ sind in **Bild 2-4** dargestellt.

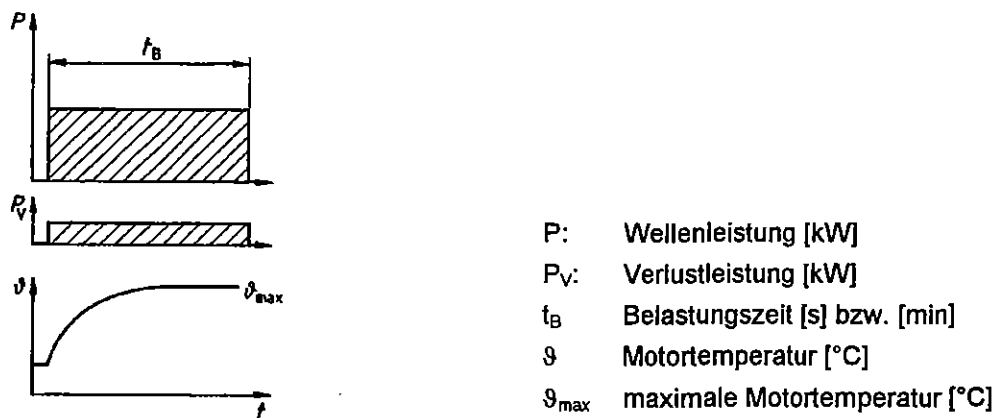


Bild 2-4: Verlauf von Wellenleistung, Verlustleistung und Temperatur bei der Betriebsart S1 /VDE 0530.1/

Die in den Datenblättern angegebenen Nenngrößen beziehen sich ausschließlich auf die Betriebsart S1. Für die Motorauswahl ist nicht allein die Nennleistung P_N an der Welle, sondern auch das Nennmoment M_N und die Nenndrehzahl n_N entscheidend. Die Nennleistung P_N errechnet sich analog zu Gleichung 2-1 wie folgt:

$$P_N = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_N \cdot M_N}{60} \quad [\text{W}]$$

2.2.2 Betriebsarten S2, S3 und S6

Die Betriebsart S2 kennzeichnet einen Kurzzeitbetrieb bei konstantem Belastungszustand, dessen Dauer nicht ausreicht, um den thermischen Beharrungszustand zu erreichen. Es folgt eine Pause, die so lange besteht, bis die wieder abgesunkene Maschinentemperatur nicht mehr als 2 K von der Kühlmitteltemperatur abweicht. Die Nennleistung P_N der Maschine kann daher abhängig von der Belastungszeit t_B abgeändert werden.

Die Betriebsart S3 kennzeichnet einen Aussetzbetrieb, der sich aus einer Folge gleichartiger Zyklen bzw. Spiele zusammensetzt, wobei jedes dieser Spiele eine Zeit mit konstanter Belastung und nachfolgendem Stillstand umfaßt. Da der Anlaufstrom bei dieser Betriebsart keinen merklichen Einfluß auf die Maschinentemperatur hat, ist es auch in diesem Fall zulässig, der Maschine eine höhere Wellenleistung P als die Nennleistung P_N abzuverlangen, ohne sie dadurch thermisch zu überlasten.

Gleiches gilt für die Betriebsart S6, wobei im Gegensatz zu der Betriebsart S3 der Antrieb zwischen den Belastungszeiten im Leerlauf betrieben wird (\rightarrow Leerlaufverluste).

Die zeitlichen Verläufe von Wellenleistung P , Verlustleistung P_V und Motortemperatur ϑ sind für die Betriebsarten S2, S3 und S6 in *Bild 2-5* dargestellt.

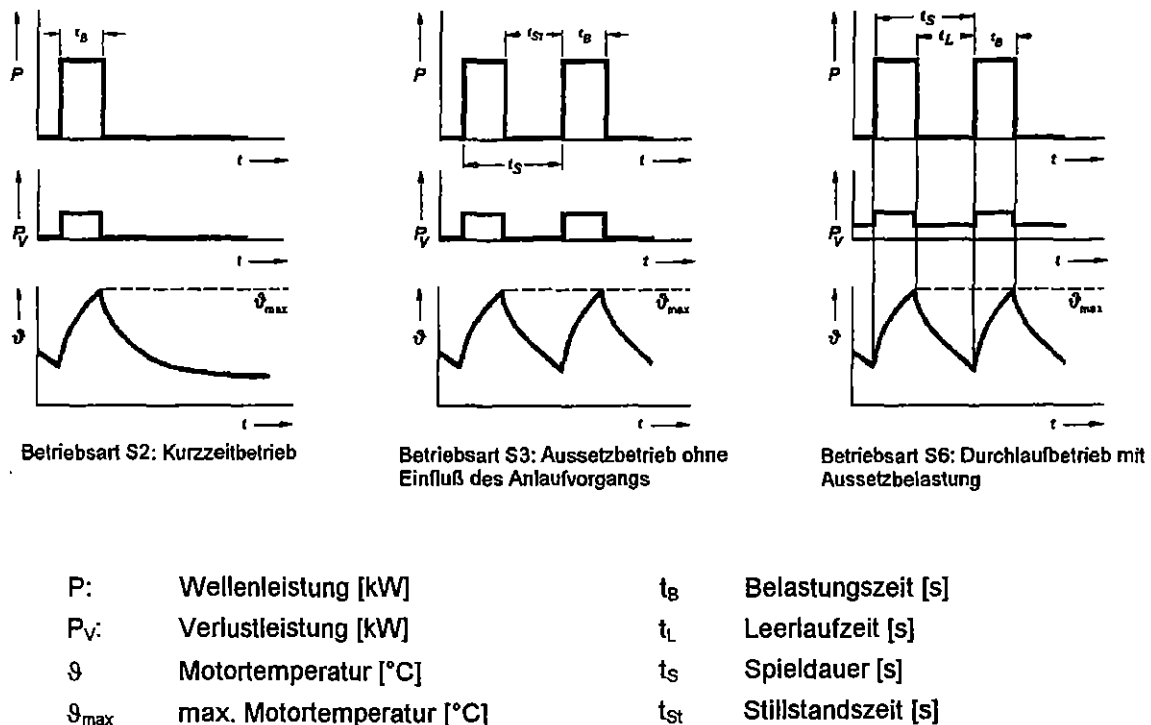


Bild 2-5: Verlauf von Wellenleistung, Verlustleistung und Temperatur bei den Betriebsarten S2, S3 und S6 /VDE 0530.1/

2.2.3 Betriebsarten S4, S5, S7, S8 und S9

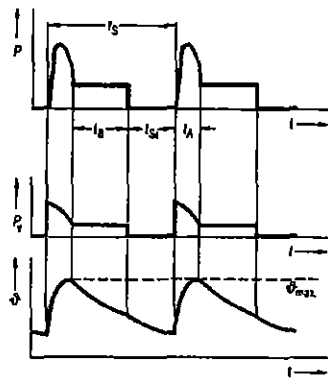
Die Betriebsart S4 kennzeichnet einen Aussetzbetrieb, der sich aus einer Folge gleichartiger Spiele zusammensetzt, wobei jedes dieser Spiele eine Zeit mit konstanter Belastung und nachfolgendem Stillstand umfaßt. Im Gegensatz zu der Betriebsart S3 hat der Anlaufstrom bei dieser Betriebsart jedoch einen merklichen Einfluß auf die Maschinentemperatur.

Gleiches gilt für die Betriebsart S5, die zusätzlich eine schnelle elektrische Bremsung beinhaltet. Bei der Betriebsart S7 tritt im Gegensatz zu der Betriebsart S5 keine Pause auf.

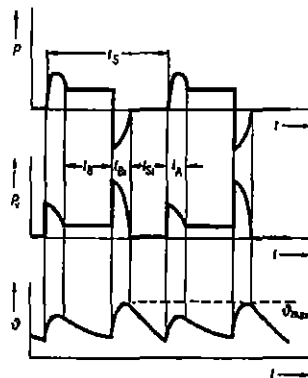
Die Betriebsart S8 kennzeichnet einen Betrieb, der sich aus einer Folge gleichartiger Spiele zusammensetzt, wobei jedes dieser Spiele eine Zeit mit konstanter Belastung bei einer bestimmten Drehzahl umfaßt. Danach folgen ein oder mehrere Zeitintervalle mit anderer Belastung, denen unterschiedliche Drehzahlen entsprechen. Hierbei tritt keine Pause auf.

Die Betriebsart S9 kennzeichnet einen Betrieb, bei dem sich im allgemeinen Belastung und Drehzahl innerhalb des zulässigen Betriebsbereichs nichtperiodisch ändern. Hierbei treten häufig Belastungsspitzen auf, die weit über der Nennleistung liegen können.

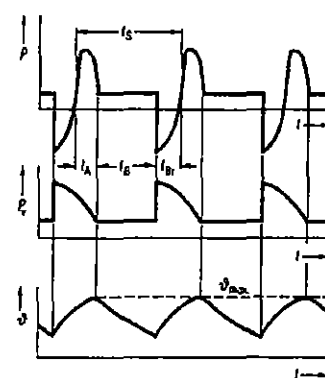
Die Verläufe von Wellenleistung P , Verlustleistung P_V und Motortemperatur ϑ sind für die Betriebsarten S4, S5, S7, S8 und S9 in **Bild 2-6** dargestellt. Bei den Betriebsarten S8 und S9 ist zusätzlich der Drehzahlverlauf aufgetragen.



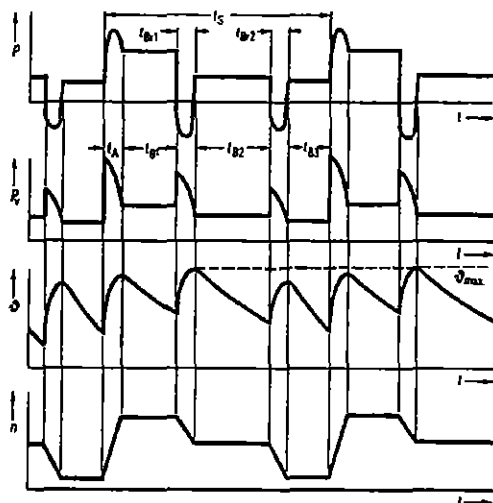
Betriebsart S4: Aussetzbetrieb mit Einfluß des Anlaufvorgangs



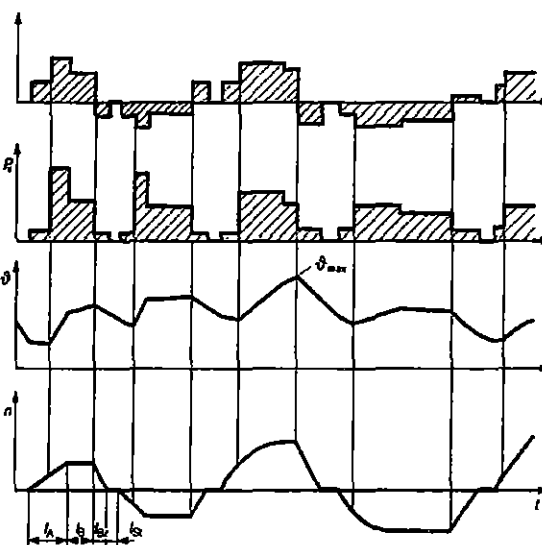
Betriebsart S5: Aussetzbetrieb mit Einfluß des Anlaufvorgangs und der elektrischen Bremsung



Betriebsart S7: Ununterbrochener Betrieb mit Anlauf und elektrischer Bremsung



Betriebsart S8: Ununterbrochener Betrieb mit periodischer Drehzahländerung



Betriebsart S9: Ununterbrochener Betrieb mit nichtperiodischer Last- und Drehzahländerung

P :	Wellenleistung [kW]	t_A	Anlaufzeit [s]
P_V :	Verlustleistung [kW]	t_B	Belastungszeit [s]
ϑ	Motortemperatur [°C]	t_{Br}	Bremszeit [s]
ϑ_{max}	max. Motortemperatur [°C]	t_S	Spieldauer [s]
n	Motordrehzahl [min ⁻¹]	t_{St}	Stillstandszeit [s]

Bild 2-6: Verlauf von Wellenleistung, Verlustleistung, Temperatur und ggf. Drehzahl bei den Betriebsarten S4, S5, S7, S8 und S9 /VDE 0530.1/

Die Erwärmung einer Maschine, insbesondere im Läufer, wird bei den o.g. Schaltbetrieben hauptsächlich durch Anlauf, Bremsung oder Umschaltung bestimmt. Bei großen Anlagen sind beim Anlauf häufig hohe Massenträgheitsmomente und Haftreibungswiderstände zu überwinden. Um den Motor aufgrund der damit verbundenen, lange anstehenden hohen Anlaufströme nicht zu überlasten, muß er entweder entsprechend größer dimensioniert oder aber die Schalthäufigkeit muß begrenzt werden. Die zulässige Schalthäufigkeit z läßt sich mit Hilfe von bestimmten Reduktionsfaktoren berechnen. Äußere Trägheitsmomente werden durch den sogenannten Trägheitsfaktor FI (factor of inertia) berücksichtigt, der sich wie folgt errechnet:

$$FI = \frac{J_{\text{Mot}} + J_{\text{Zus}}}{J_{\text{Mot}}} \quad [-] \quad (2-5)$$

J_{Mot} : Motorträgheitsmoment [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]

J_{Zus} : Summe der äußeren Trägheitsmomente [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]

Der Gegenmomentfaktor k_g berücksichtigt ein während des Hochlaufs vorhandenes Lastmoment M_L und errechnet sich wie folgt:

$$k_g = \frac{\bar{M}_L}{\bar{M}_{\text{Mot}}} \quad [-] \quad (2-6)$$

\bar{M}_L : Mittleres Lasthochlaufmoment [Nm]

\bar{M}_{Mot} : Mittleres Motorhochlaufmoment [Nm]

Die Belastung während der Betriebszeit wird durch den Lastfaktor k_L wie folgt berücksichtigt:

$$k_L = 1 - \left(\frac{P}{P_N}\right)^2 \cdot \frac{(1-k_0) \cdot t_r}{(1-k_0) \cdot t_r + (1-t_r) \cdot h} \quad [-] \quad (2-7)$$

P : Bedarfsleistung [kW]

P_N : Nennleistung [kW]

t_r : relative Einschaltdauer [s]

k_0 : Verhältnis der Äquivalentverluste Leerlauf / Last (Herstellerangabe) [-]

h : Verhältnis der Wärmeabgabe belüftet / unbelüftet (Herstellerangabe) [-]

In **Tabelle 2-1** ist eine allgemeine Übersicht über die einzelnen Betriebsarten S1 bis S9 dargestellt, die u.a. die Berechnungsformeln der maximal zulässigen thermischen Leistung P_{th} für die Betriebsarten S2, S3 und S6 sowie der zulässigen Schalthäufigkeit z für die Betriebsarten S4, S5, S7, S8 und S9 mittels der Reduktionsfaktoren (vgl. Gleichung 2-5 bis 2-7) beinhaltet. Wird der Motor im Leerlauf mit dem Eigenträgheitsmoment ohne Zusatzschwingmasse im Durchlaufbetrieb auf unterschiedliche Drehzahlen umgeschaltet, so bezeichnet man diejenige Schalthäufigkeit, bei der die zulässige Erwärmung des Motors im Beharrungszustand erreicht wird, als Leerumschaltheufigkeit z_0 .

Tabelle 2-1: Betriebsarten S1 bis S9 im Vergleich /SAG/

Betriebsart	S1	S2	S3
Beschreibung	Dauerbetrieb	Kurzzeitbetrieb	Aussetzbetrieb ohne Einfluß des Anlaufvorgangs
Leistung im Vergleich zu S1	Nennleistung	Leistungserhöhung	Leistungserhöhung
P_{th}	P_N	$P_{th} \leq P_N \cdot \sqrt{\frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{t_B}{T_E}\right)\right]^{-1} - k_0}{1 - k_0}}$	$P_{th} \leq P_N \cdot \sqrt{1 + \frac{(1 - t_r) \cdot h}{(1 - k_0) \cdot t_r}}$

Betriebsart	S6	S4	S5
Beschreibung	Durchlaufbetrieb mit Aussetzbelastung	Aussetzbetrieb mit Einfluß des Anlaufvorgangs	Aussetzbetrieb mit Einfluß des Anlaufvorgangs und elektrischer Bremsung
Leistung im Vergleich zu S1	Leistungserhöhung	Leistungsreduktion	Leistungsreduktion
P_{th}	$P_{th} \leq P_N \cdot \sqrt{\frac{1}{t_r}}$	-	-
Zulässige Schalthäufigkeit	-	$z = \frac{k_g \cdot k_L}{f_I} \cdot z_A$	$z = \frac{k_L}{f_I} \cdot f^* \cdot z_0$
Kommentar	-	$z_A = k^{**} \cdot z_0$	

Betriebsart	S7	S8 und S9
Beschreibung	Ununterbrochener Betrieb mit Anlauf und elektrischer Bremsung	Ununterbrochener Betrieb mit periodischer bzw. nichtperiodischer Drehzahländerung
Leistung im Vergleich zu S1	Leistungsreduktion	Leistungsreduktion
Zulässige Schalthäufigkeit	$z = \frac{k_L}{f_I} \cdot f^* \cdot z_0$	wird vom Hersteller auf Anfrage berechnet
Kommentar	$t_r = 1 \Rightarrow k_L = 1 - \left(\frac{P}{P_N}\right)^2$	-

z zulässige Schalthäufigkeit pro h

 z_0

Leerumschalthäufigkeit pro h

 z_A Leeranlaufhäufigkeit pro h T_E

Erwärmungszeitkonstante

*) Gegenstrombremsung: $f = 1$ (Gleichstrombremsung: f aus Herstellerangaben)

**) abhängig vom Motortyp (Herstellerangabe)

Die Betriebsarten S1 bis S9 lassen sich in zwei Gruppen aufteilen:

- I) Die Betriebsarten S2, S3 und S6, die gegenüber dem Dauerbetrieb S1 eine Leistungserhöhung zulassen.
- II) Die Betriebsarten S4, S5, S7, S8 und S9, die gegenüber dem Dauerbetrieb S1 eine Leistungsreduktion erfordern.

Mit der maximal zulässigen thermischen Leistung P_{th} für die Betriebsarten S2, S3 und S6 werden bei vorgegebenen Leerlauf-, Stillstands- und Belastungszeiten die thermischen Grenzen des Motors bei einer Wellenleistung P entsprechend P_{th} gerade nicht überschritten. Der Grad der Leistungsreduktion bei den Betriebsarten S4, S5, S7, S8 und S9 ist mit dem Hersteller abzuklären. Die relative Einschaltdauer t_r errechnet sich generell aus dem Quotienten der Betriebszeit (Summe aus Belastungs- sowie ggf. Anlaufs- und Bremszeit) und der Spieldauer (Summe aus Betriebs- und ggf. Stillstandszeit). Die Spieldauer muß nach /VDE 0530.1/ für den Bemessungsbetrieb bei periodisch veränderlicher Belastung, falls nicht anders angegeben, bei einer relativen Einschaltdauer t_r von 15, 25, 40 oder 60% zehn Minuten betragen.

2.3 Schutzarten

Systemanforderungen sind immer mit den Umgebungsbedingungen am Einsatzort eines elektrischen Antriebssystems verbunden. Besondere Bestimmungen hinsichtlich der Motorenausführung sind beispielsweise einzuhalten, wenn elektrische Maschinen in schlagwetter- oder explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden. Die Anforderung und Kennzeichnung solcher Motoren ist in /VDE 0170/0171/ spezifiziert. Die Schutzart von elektrischen Maschinen bestimmt den Schutz von Personen vor Berührung unter Spannung stehender oder rotierender Teile innerhalb des Gehäuses und den Schutz vor dem Eindringen von festen Fremdkörpern und Wasser. Die Schutzart schlägt sich in der äußeren Ausführung und Bauform eines Motors nieder.

Die Schutzarten elektrischer Maschinen werden nach /VDE 0530.5/ allgemein durch das Kurzzeichen IP gekennzeichnet. Die Spezifikation der Schutzart wurde hierbei wie folgt festgelegt:

IP	X	Y
----	---	---

- IP: Code-Kennbuchstaben (International Protection)
 X: Grad des Berührungs- und Fremdkörperschutzes
 Y: Grad des Wasserschutzes

In **Tabelle 2-2** sind die einzelnen Schutzarten für elektrische Maschinen aufgeführt. Die gebräuchlichsten Schutzarten elektrischer Maschinen sind in **Tabelle 2-3** zusammengefaßt.

Tabelle 2-2: Spezifikationen der Schutzarten elektrischer Maschinen /VDE 0530.5/

X	Berührungs- und Fremdkörperschutz Schutzumfang	Y	Wasserschutz Schutzumfang
0	Kein Berührungsschutz hinsichtlich spannungsführender oder rotierender Teile.	0	Kein Wasserschutz.
1	Schutz gegen zufällige großflächige Berührung mit der Hand; Schutz gegen feste große Fremdkörper ($\varnothing > 50$ mm).	1	Schutz gegen senkrecht fallendes Tropfwasser.
2	Schutz gegen Berührung mit den Fingern; Schutz gegen mittelgroße Fremdkörper ($\varnothing > 12$ mm).	2	Schutz gegen Tropfwasser aus senkrechter oder schräger Richtung bis 15° zur Senkrechten.
3	Schutz gegen Berührung mit Werkzeugen, Draht o.ä. (Dicke $> 2,5$ mm); Schutz gegen Fremdkörper ($\varnothing > 2,5$ mm).	3	Schutz gegen Sprühwasser aus beliebiger Richtung bis 60° zur Senkrechten.
4	Schutz gegen Berührung mit Werkzeugen Draht o.ä. (Dicke > 1 mm); Schutz gegen kornförmige Fremdkörper ($\varnothing > 1$ mm), ausgenommen Öffnungen für Kühlluft und Kondenswasserabfluß geschlossener Maschinen.	4	Schutz gegen Spritzwasser aus allen Richtungen.
5	Vollständiger Schutz gegen Berührung jeglicher Art; Schutz gegen schädliche Staubablagerungen im Inneren.	5	Schutz gegen Strahlwasser aus allen Richtungen.
-	-	6	Schutz gegen Überflutung.
-	-	7	Schutz gegen das Eindringen schädlicher Mengen beim Eintauchen unter begrenzten Druck- und Zeitbedingungen.
-	-	8	Schutz gegen das Eindringen schädlicher Mengen beim Untertauchen unter vereinbarten Druck- und Zeitbedingungen.

Tabelle 2-3: Schutzarten elektrischer Maschinen (fett vorzugsweise)

	0	1	2	3	4	5	6
0	IP 00		IP 02				
1		IP 11	IP 12	IP 13			
2		IP 21	IP 22	IP 23			
4					IP 44		
5					IP 54	IP 55	IP 56

2.4 Kühlarten

Die zulässige Erwärmung elektrischer Maschinen wird durch die Wärmebeständigkeit der Isolierstoffe begrenzt. Die maximal erlaubte Erwärmung ist somit abhängig vom eingesetzten Isoliermaterial. Nach /VDE 0530/ werden mehrere Isolierstoffklassen unterschieden und diesen jeweils höchstzulässige Dauertemperaturen zugeordnet. Mit Rücksicht auf die Lebensdauer der Maschine ist die Einhaltung dieser Temperaturen von großer Bedeutung.

Die Kühlarten elektrischer Maschinen werden nach /VDE 0530.6/ allgemein durch das Kurzzeichen *IC* gekennzeichnet. Die Spezifikation einer Kühlart wurde hierbei wie folgt festgelegt:

IC	X	K _{prim.}	Y _{prim.}	K _{sek.}	Y _{sek.}
----	---	--------------------	--------------------	-------------------	-------------------

- IC: Code-Kennbuchstaben (International Cooling)
 X: Kühlkreisordnung
 K_{prim.}: primäres Kühlmittel (entfällt bei "A" für Luft als Kühlmittel)
 Y_{prim.}: Bewegungsart des primären Kühlmittels
 K_{sek.}: sekundäres Kühlmittel (entfällt bei "A" für Luft als Kühlmittel)
 Y_{sek.}: Bewegungsart des sekundären Kühlmittels
 (entfällt bei "W" für Wasser als Kühlmittel und Bewegungsart "7")

Hierbei sind auch verkürzte Schreibformen, z.B. bei nicht vorhandenem Sekundärkühlkreislauf, möglich. Beispielsweise wird eine Eigenkühlung mit freiem primärem Kühlkreislauf und Luft als Kühlmittel mit *IC01* spezifiziert.

In *Tabelle 2-4* sind die unterschiedlichen Kühlkreisordnungen aufgeführt.

Tabelle 2-4: Spezifikationen der Kühlkreisordnungen bei elektrischen Maschinen /VDE 0530.6/

X	Kühlkreisordnung	Detailerklärung
0	Freier Kühlkreis	Kühlmittel wird frei dem umgebenden Medium entnommen, kühlt die Maschine und wird direkt an das umgebende Medium zurückgeführt (<i>offener Kühlkreis</i>).
1	Kühlkreis mit Zuführung über Rohr oder Kanal	Kühlmittel wird einem nichtumgebenden Medium entnommen, der Maschine über Rohre oder Kanäle zugeführt, durchströmt die Maschine und wird direkt an das umgebende Medium abgeführt (<i>offener Kühlkreis</i>).
2	Kühlkreis mit Abführung über Rohr oder Kanal	Kühlmittel wird frei dem umgebenden Medium entnommen, durchströmt die Maschine und wird von der Maschine aus über Rohre oder Kanäle an ein nicht umgebendes Medium abgeführt. (<i>offener Kühlkreis</i>).

X	Kühlkreisordnung	Detailerklärung
3	Kühlkreis mit Zu- und Abführung über Rohr oder Kanal	Kühlmittel wird einem nichtumgebenden Medium entnommen, der Maschine über Rohre oder Kanäle zugeführt, durchströmt die Maschine und wird über Rohre oder Kanäle an ein nichtumgebendes Medium abgeführt (<i>offener Kühlkreis</i>).
4	Oberflächenkühlung	Primäres Kühlmittel wird in einem geschlossenen Kreislauf in der Maschine bewegt und gibt seine Wärme (zusätzlich zu dem Wärmefluß, der über das Ständerpaket und andere Teile erfolgt) über die Maschinenoberfläche an das umgebende Medium ab, das das letzte Kühlmittel ist. Die Oberfläche kann zur Verbesserung der Wärmeübertragung glatt oder gerippt, mit oder ohne einen äußeren Mantel ausgeführt sein.
5	Eingebauter Wärmetauscher (umgebendes Kühlmittel)	Primäres Kühlmittel wird in einem geschlossenen Kreislauf in der Maschine bewegt und gibt seine Wärme über einen Wärmetauscher, der integrierter Teil der Maschine ist, an das umgebende Medium ab, das das letzte Kühlmittel ist.
6	Angebauter Wärmetauscher (umgebendes Kühlmittel)	Primäres Kühlmittel wird in einem geschlossenen Kreislauf in der Maschine bewegt und gibt seine Wärme über einen Wärmetauscher, der an der Maschine angebaut ist, an das umgebende Medium ab, das das letzte Kühlmittel ist.
7	Eingebauter Wärmetauscher (zugeführtes Kühlmittel)	Primäres Kühlmittel wird in einem geschlossenen Kreislauf in der Maschine bewegt und gibt seine Wärme über einen Wärmetauscher, der integrierter Teil der Maschine ist, an das sekundäre Kühlmittel ab, das ein zugeführtes (nichtumgebendes) Medium ist.
8	Angebauter Wärmetauscher (zugeführtes Kühlmittel)	Primäres Kühlmittel wird in einem geschlossenen Kreislauf in der Maschine bewegt und gibt seine Wärme über einen Wärmetauscher, der an der Maschine angebaut ist, an das sekundäre Kühlmittel ab, das ein zugeführtes (nichtumgebendes) Medium ist.
9	Getrennt angeordneter Wärmetauscher (umgebendes oder nichtumgebendes Kühlmittel)	Primäres Kühlmittel wird in einem geschlossenen Kreislauf in der Maschine bewegt und gibt seine Wärme über einen Wärmetauscher, der von der Maschine getrennt angeordnet ist, an das sekundäre Kühlmittel ab, das entweder ein die Maschine umgebendes oder nichtumgebendes Medium ist.

Die Kühlung ist von entscheidender Bedeutung für die Auslastung bzw. Lebensdauer einer elektrischen Maschine. Bei fest vorgegebenen Verlusten läßt sich die Endtemperatur einer Maschine nur durch eine verbesserte Kühlung absenken. Je größer die Leistung eines Elektromotors ist, desto ungünstiger ist nach den Wachstumsgesetzen auch die Wärmeabfuhr. Aus diesem Grund müssen für größere Maschinen immer effektivere Kühlmethoden zum Einsatz kommen.

In *Tabelle 2-5* sind die unterschiedlichen Bewegungsarten des Kühlmittels aufgeführt.

Tabelle 2-5: Spezifikationen der Bewegungsarten des primären bzw. sekundären Kühlmittels bei elektrischer Maschinen /VDE 0530.6/

Y	Bewegungsart	Detailerklärung
0	Freie Kühlung	Kühlmittel wird infolge der Temperaturdifferenz bewegt. Die Förderwirkung des Läufers ist vernachlässigbar.
1	Eigenkühlung	Kühlmittel wird abhängig von der Drehzahl der Hauptmaschine bewegt und zwar entweder allein durch die Förderwirkung des Läufers, durch eine zu diesem Zweck direkt auf dem Läufer der Hauptmaschine angeordnete Baugruppe oder durch ein eingebautes und von der Hauptmaschine direkt angetriebenes Lüfter- oder Pumpenaggregat.
2, 3, 4	frei für zukünftige Verwendung	
5	Fremdkühlung (eingebaute, unabhängige Baugruppe)	Kühlmittel wird durch eine eingebaute Baugruppe bewegt, deren Antrieb unabhängig vom Betrieb der Hauptmaschine ist, z.B. durch ein eingebautes Lüfter- oder Pumpenaggregat mit eigenem elektrischen Antrieb.
6	Fremdkühlung (angebaute, unabhängige Baugruppe)	Kühlmittel wird durch eine angebaute Baugruppe bewegt, deren Antrieb unabhängig vom Betrieb der Hauptmaschine ist, z.B. durch ein angebautes Lüfter- oder Pumpenaggregat mit eigenem elektrischen Antrieb.
7	Fremdkühlung (getrennte, unabhängige Baugruppe oder Betriebsdruck der Kühlmittelversorgung)	Kühlmittel wird entweder durch eine getrennt von der Hauptmaschine aufgestellte Baugruppe mit unabhängigem elektrischem oder mechanischem Antrieb oder durch den systemeigenen Betriebsdruck der Kühlmittelversorgung bewegt, z.B. innerhalb eines Druckwasser- oder Druckgassystems.
8	Fremdkühlung (Antrieb durch relative Bewegung)	Bewegung des Kühlmittels ergibt sich durch relative Bewegung der Maschine gegenüber dem Kühlmittel, entweder durch Bewegung der Maschine innerhalb des Kühlmittels oder durch die Strömung des umgebenden Kühlmittels (Luft oder Flüssigkeit).
9	Antrieb durch sonstige Bewegungsarten	Bewegung des Kühlmittels ist durch eine andere als die oben genannten Arten erreicht und muß im Klartext beschrieben werden.

Bei *Selbstkühlung* (freie Kühlung) wird die Wärme der Maschine ohne Verwendung eines Lüfters über Konvektion und Strahlung (Kühlrippen) an die Luft abgeführt.

Wird die Kühlluft von einem mit dem Läufer rotierenden Lüfter angesaugt und am Motor vorbeigeführt, so spricht man von *Eigenkühlung*.

Bei *Fremdkühlung* wird die Maschine entweder durch einen nicht von der Welle des Motors angetriebenen Lüfter oder durch ein anderes fremdbewegtes Kühlmittel gekühlt.

3 Technikbeschreibung

Für den Betrieb am Gleichstrom-, Wechselstrom- und Drehstromnetz wurde eine Vielzahl von Motorbauarten entwickelt, die in *Tabelle 3-1* zusammengefaßt sind.

Tabelle 3-1: Gliederung und Einsatz von Elektromotoren für stationäre Antriebe /FIS/

Stromart	Motorenart	Ausführung, Bauform	Haupteinsatzgebiete	Leistungsbereich
Gleichstrom	Gleichstrommotor (GSM)	permanenterregte GSM	Feinwerktechnik, Hilfsantriebe im Kfz, Servoantriebe	< 1 W - 30 kW
		fremd- oder selbst-erregte GSM	Hauptantriebe für Werkzeugmaschinen, Hebezeuge, Walzwerke, Förderanlagen	10 kW - 10 MW
Wechselstrom	Universalmotor	Einphasen-Kommutatormotor	E-Werkzeuge, Haushaltsgeräte	50 W - 2 kW
	Einphasen-Asynchronmotor	Spaltpolmotor	Lüfter, Pumpen, Gebläse, Haushaltsgeräte	5 W - 150 W
		Kondensatormotor	Pumpen, Gebläse, Haushaltsgeräte, Werkzeuge	50 W - 2 kW
	Einphasen-Synchronmotor	Reluktanzmotor	Gruppenantriebe in der Textilindustrie, Extruder	100 W - 10 kW
Drehstrom	Drehstrom-Nebenschlußmotor	Dreiphasen-Kommutatormotor	Druck- und Papiermaschinen, Textilindustrie	1 kW - 150 kW
	Asynchronmotor (ASM)	Käfigläufermotor	Standardindustrieantriebe (z.B. Pumpen, Gebläse, Bearbeitungsmaschinen, Fördertechnik)	100 W - 50 MW
		Schleifringläufermotor	Hebezeuge, Pumpen und Verdichter	10 kW - 10 MW
		Linearmotor	Fördertechnik	100 W - 100 kW
	Synchronmotor (SM)	permanenterregte SM	Servoantriebe, Gruppenantriebe	100 W - 10 kW
		fremd- oder selbst-erregte Schenkel-polmaschine	langsam laufende Industrieantriebe	5 kW - ≥ 1 MW
		fremd- oder selbst-erregte Vollpolmaschine	Verdichter-, Mühlenantriebe	100 kW - ≥ 1 MW

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Motorkonzepte haben sich im Laufe der Zeit bestimmte Einsatzbereiche für Elektromotoren herauskristallisiert. Wechselstrommotoren in der Ausführung als Einphasen-Reihenschlußmotor finden hauptsächlich in Elektrowerkzeugen und Haushaltsgeräten Verwendung (z.B. Bohrmaschine). Kleine ASM bis ca. 1 kW kommen hauptsächlich im Haushalt und Gewerbe als Einphasen-ASM in großer Stückzahl zum Einsatz (z.B. Waschmaschine). Aufgrund der konstanten Drehzahl von Einphasen-SM wird dieser Maschinentyp in erster Linie in Tonbandgeräten oder Plattenspielern sowie Kleinstmotoren für Programmschaltwerke eingesetzt. Für die industrielle Anwendung sind Wechselstrommotoren nur von untergeordneter Bedeutung. Aus diesem Grund erfolgt im Rahmen dieses Projekts eine Beschränkung auf Gleich- und Drehstrommotoren.

Die Hauptbedeutung kommt in der elektrischen Antriebstechnik der *Drehstrom-Käfigläufer-ASM* und der *fremderregten GSM* zu. Die Technikgruppe der *Drehstrom-SM* unterteilt sich in permanenterregte und fremderregte SM, von denen letztere vor allem für große, langsam laufende Antriebe eingesetzt werden. Diese Motorarten werden mit den verschiedenartigen Umrichtertypen nachfolgend betrachtet.

3.1 Motoren

Trotz einer Vielzahl von unterschiedlichen Ausführungen bei den elektrischen Antrieben lassen sich allgemeine Konstruktionsprinzipien ableiten, die für die meisten Ausführungen Gültigkeit haben. So besteht jede rotierende elektrische Maschine aus einem feststehenden Teil (Ständer) und einem rotierenden Teil (Läufer). Die Maschine ist i.allg. beidseitig durch zwei Lagerschilde abgeschlossen, die den Läufer konzentrisch in der Bohrung des Ständers halten.

3.1.1 Asynchronmaschine

Die große Verbreitung der Asynchronmaschine (ASM) unter den stationären elektrischen Antrieben, besonders in der Ausführung als Käfigläufer- bzw. Kurzschlußläufermotor, ist durch den einfachen und robusten Aufbau begründet. Die Maschine ist relativ kostengünstig, betriebssicher und kann nahezu wartungsfrei betrieben werden. Daneben sind hohe Drehzahlen, ein vergleichsweise geringes Gewicht sowie kleine Trägheitsmomente erreichbar.

Untersuchungen des *Zentralverbandes der Elektrotechnischen Industrie* zufolge sind ca. 70% der in Deutschland produzierten Elektromotoren Drehstrom-ASM mit Käfigläufer. In der Industrie werden bei einer Netzspannung von 230/400 V in großem Maß Käfigläufer-ASM mittlerer Leistung eingesetzt. Große Einheiten bis ca. 30 MW finden beispielsweise in der Industrie für Turboverdichter oder Kesselspeisepumpen Verwendung. Die Spannungsniveaus liegen hier bei 3 kV, 6 kV und 10 kV.

In *Bild 3-1* ist beispielhaft der Ständer und der Käfigläufer einer speziellen Drehstrom-ASM dargestellt. Der Ständer (Stator) der ASM ist aus geschichtetem und genutetem Dynamoblech aufgebaut. Nach Einbringen der symmetrischen, dreisträngigen Zweischichtwicklung in die Nuten des Stators wird das Blechpaket in ein Gußgehäuse eingepreßt.

Der Läufer (Rotor) ist ebenfalls aus geschichtetem und genutetem Dynamoblech ausgeführt. Er trägt bei *Schleifringläufermaschinen* eine meist im Stern geschaltete Drehstromwicklung, die die gleiche Polzahl wie der Ständer aufweist. Die Stromzuführung der Wicklungen erfolgt über drei Schleifringe und Kohlebürsten. An die Läuferwicklungen kann zusätzlich ein dreiphasiger Widerstand zur Drehzahlstellung bzw. als Anlasser angeschlossen werden. Bei *Käfigläufer-* bzw. *Kurzschlußläufermaschinen* entfallen dagegen die Schleifringe und Kohlebürsten, da die Läuferwicklung permanent kurzgeschlossen ist. Die Käfigwicklung besteht aus Stäben in gleichmäßigem Abstand, die in den Rotornuten liegen und an beiden Enden jeweils durch einen Kurzschlußring miteinander verbunden sind. Die Rotor- und Statornutenzahl darf hierbei in keinem Fall gleich sein, da ansonsten Betriebsstörungen im Anlaufbereich auftreten können ("synchrone Sättel"). Die notwendige Gleichheit der Polpaarzahlen von Stator und Rotor stellt sich im Betrieb automatisch durch die Richtung der im Käfigläufer induzierten Ströme ein.

Die Käfigläuferwicklung ist unisoliert und daher thermisch wesentlich höher belastbar als die Schleifringläuferwicklung. Auf eine Durchzugsbelüftung der Maschine zur Kühlung des Läufers kann daher in den unteren Leistungsklassen verzichtet werden. In den meisten Fällen genügt eine Oberflächenkühlung des Ständers. Dieser Vorteil erlaubt die Einhaltung einer hohen Schutzklasse durch gekapselte Bauweise mit relativ einfachen konstruktiven Mitteln.

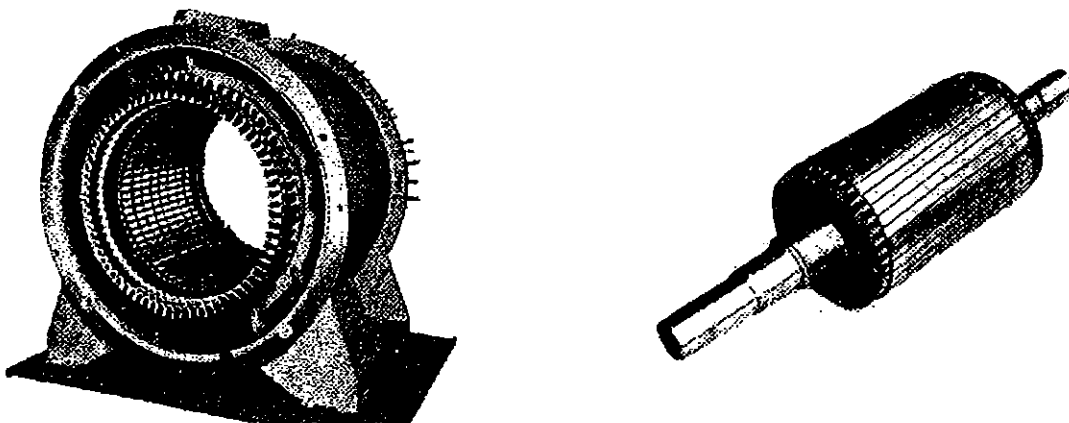


Bild 3-1: Ständer mit Zweischicht-Formspulen und Doppelstab-Käfigläufer einer ASM /FIS/

In *Bild 3-2* ist schematisch der Querschnitt einer Drehstrom-ASM dargestellt, der den Aufbau der Stator- und Rotornuten verdeutlicht.

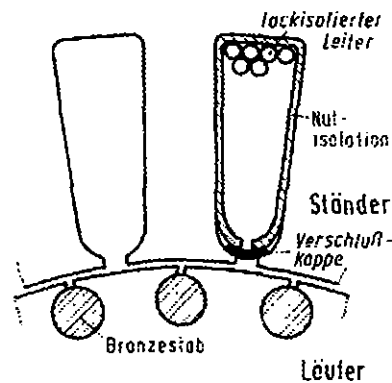


Bild 3-2: Schematischer Querschnitt einer Drehstrom-Asynchronmaschine /FIS/

Da außer der Wirkleistung auch die Magnetisierungsblindleistung über den Ständer zugeführt werden muß (Strom und Spannung sind im Betrieb immer phasenverschoben), treten in der Ständerwicklung je nach Belastung entsprechende Stromwärmeverluste auf. Außerdem entstehen im Ständerblechpaket durch periodische Ummagnetisierung und induzierte Wirbelströme lastunabhängige Verluste. Neben den Stromwärmeverlusten in der Läuferwicklung werden durch Wirbelströme auf der Läuferoberfläche und in der Käfigwicklung Zusatzverluste hervorgerufen, die den Wirkungsgrad mindern. Nachteilig erweist sich bei der ASM die feste Kopplung der Betriebsdrehzahl an die Netzfrequenz. Die Einschränkung der Drehzahlregelbarkeit ist bei vielen Anwendungen allerdings nur zweitrangig. Mit der Entwicklung leistungsfähiger Frequenzumrichter stehen heutzutage ausreichende Verfahren zur verlustarmen Drehzahlregelung der ASM zur Verfügung.

Der an das Drehstromnetz angeschlossene Stator baut ein Magnetfeld auf, das mit der Netzfrequenz umläuft. Durch das Ständerdrehfeld werden im Käfigläufer Kurzschlußströme induziert, die ebenfalls ein Drehstromsystem bilden. Die induzierten Läuferströme bilden mit dem resultierenden Ständerdrehfeld ein Drehmoment, welches in Umlaufrichtung des Drehfeldes wirkt. Bei Stillstand des Motors bewirkt dieses Drehmoment den Anlauf des Läufers. Mit steigender Drehzahl sinkt die Relativbewegung zwischen Ständerdrehfeld und Läuferwicklung. Aufgrund der dadurch abnehmenden induzierten Kurzschlußströme reduziert sich folglich auch das auf den Läufer wirkende Drehmoment. Erreicht der Läufer im Idealfall die Drehzahl des umlaufenden Ständerdrehfeldes, so ist die Relativbewegung zwischen beiden Null. Es werden keine Ströme mehr induziert, so daß kein Drehmoment auf den Läufer wirkt. Der Motor dreht mit synchroner Drehzahl. In der Praxis kann der Läufer einer ASM allerdings nie die Drehzahl des Ständerdrehfeldes erreichen, da auch im Leerlauf ein geringes Moment zur Überwindung der Reibungsverluste benötigt wird. Es besteht somit immer eine Relativbewegung zwischen Ständerdrehfeld und Läuferwicklung. Die ASM läuft daher nie ganz synchron, d.h. im Gleichlauf mit dem Ständerdrehfeld, sondern stets asynchron.

Die Drehzahl des Ständerdrehfeldes bzw. die synchrone Drehzahl n_0 errechnet sich aus dem Quotienten der Netzfrequenz f_{Netz} und der Polpaarzahl p der Maschine wie folgt:

$$n_0 = \frac{f_{\text{Netz}} \cdot 60}{p} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (3-1)$$

Die relative Abweichung zwischen der synchronen Drehzahl n_0 des Drehfeldes und der Läuferdrehzahl n des Motors wird als Schlupf s bezeichnet:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = 1 - \frac{n}{n_0} \quad [-] \quad (3-2)$$

In **Bild 3-3** ist die Drehmomentenkennlinie der ASM in Abhängigkeit von der Drehzahl n bzw. dem Schlupf s dargestellt. Beim Schlupf $s = 0$ (ideeller Leerlauf) entwickelt die Maschine kein Drehmoment, ebenso wie beim Schlupf $s \rightarrow \pm \infty$ (ideeller Kurzschluß). Dazwischen weist der Drehmomentenverlauf im Motorbetrieb ($0 < s < 1$) und im Generatorbetrieb ($-\infty < s < 0$) je einen Extremwert auf, der als Kippunkt bezeichnet wird. Aus dem im Motorbetrieb am Kippunkt auftretenden Kippmoment M_K und dem Kippschlupf s_K resultiert bei Vernachlässigung des Ständerwiderstandes eine einfache Beziehung für das Drehmoment M (Kloss'sche Formel):

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \quad [\text{Nm}] \quad (3-3)$$

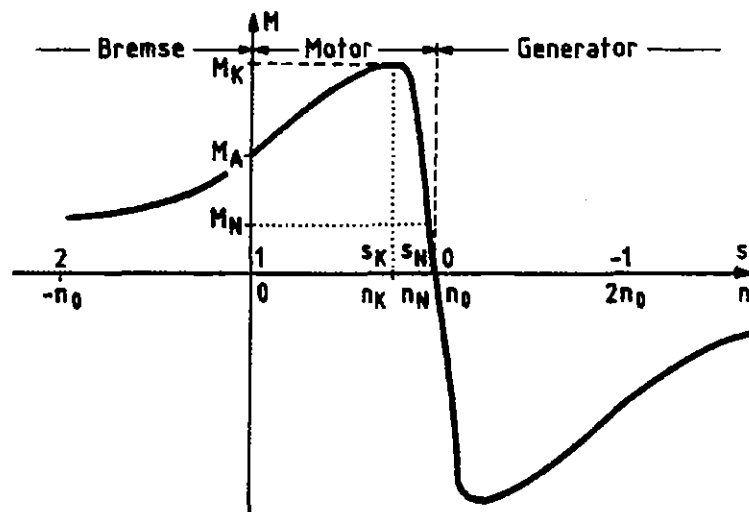


Bild 3-3: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie einer Drehstrom-Asynchronmaschine

Beim Einschalten ($n = 0$ bzw. $s = 1$) liefert die ASM ausgehend vom Anlaufmoment M_A ein bis zum Kippschlupf s_K ansteigendes Drehmoment. Nach Erreichen des Kippmomentes M_K fällt die Momentenkennlinie annähernd linear ab („Nebenschluß“-Charakteristik). Im Nennbetrieb wird

der Motor in diesem Kennlinienbereich betrieben. Wegen des steilen Kennlinienverlaufes sinkt die Drehzahl bei Belastung nur gering gegenüber der Leerlaufdrehzahl ab. Da im Leerlauf nur das Reibmoment überwunden werden muß, ist auch der Schlupf sehr klein, d.h. daß die Leerlaufdrehzahl n_0' nur wenig von der synchronen Drehzahl n_0 abweicht. Das Nennmoment M_N ist durch die thermische Belastbarkeit der Maschine vorgegeben und liegt im Bereich von ca. 20 bis 50% des Kippmomentes.

Drehstrom-ASM lassen sich durch Kenngrößen wie Kippmoment, Kippschlupf, Nennmoment, Nennschlupf, Überlastbarkeit, Anlaufmoment, Anlaufstrom, Leerlaufstrom etc. genau charakterisieren. Der Kippschlupf von Motoren über 1 kW liegt in der Regel zwischen 0,01 und 0,06, wobei für größere Motoren die unteren Grenzen gelten. Der Nennschlupf beträgt in etwa 15 bis 25% des Kippschlupfes /ZAE 2/. Eine zwei- bis dreifache Überlastbarkeit des Motors, die sich aus dem Verhältnis von Kipp- zu Nennmoment ergibt, ist als normal anzusehen. Der Ständerstrom ist im Leerlauf am geringsten und steigt mit zunehmendem Schlupf stetig an. Im Anlaufpunkt erreicht der Ständerstrom Werte, die ungefähr beim vier- bis siebenfachen des Nennstromes liegen.

Bei der ASM ist ein deutlicher Wirkungsgradabfall im Teillastbereich ab Belastungen unter 40% zu erkennen. Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ des Motors fällt im Teillastbereich noch früher ab, wodurch der Blindleistungsanteil stark ansteigt. Beim gleichzeitigen Teillastbetrieb mehrerer ASM führt dies zu einer ungünstigen Netzauslastung, erhöhtem Spannungsabfall, zusätzlichen Verlusten und u.U. zu zusätzlichen Betriebskosten für die benötigte Blindleistung. Durch Kompensationskondensatoren läßt sich der Leistungsfaktor jedoch verbessern.

Möglichkeiten der Drehzahlsteuerung bei der ASM

Der Nennbetrieb der Drehstrom-ASM liegt immer bei Drehzahlen knapp unterhalb der Synchrondrehzahl. Die Möglichkeiten der Drehzahländerung sind auf die Größen Netzfrequenz f_{Netz} , Polpaarzahl p und Schlupf s beschränkt. Ihr Einfluß auf die Läuferdrehzahl n ist aus den Gleichungen 3-1 und 3-2 wie folgt abzuleiten:

$$n = \frac{f_{\text{Netz}} \cdot 60}{p} \cdot (1 - s) \quad [\text{min}^{-1}] \quad (3-4)$$

Um bei konstantem Drehmoment die Drehzahl zu ändern, kommen folgende Verfahren zum Einsatz:

1. Änderung der Polpaarzahl p durch

- polumschaltbare Wicklungen (Dahlanderschaltung) oder
- getrennte Ständerwicklungen mit unterschiedlicher Polpaarzahl.

Mit diesem Verfahren ist die Drehzahl allerdings nur stufenweise verstellbar. Durch die aufwendigere Ständerwicklung wird die Maschine teurer.

2. Speisung mit einem in Frequenz und Amplitude verstellbaren Drehspannungssystem durch Umrichterschaltungen.
3. Vergrößern des Schlupfes s durch:

- Läuferwiderstände (nur bei Schleifringläufermaschinen möglich!).

$$s^* = s \cdot \left(1 + \frac{R_{2v}}{R_2}\right) \quad [-] \quad (3-5)$$

s^* : neuer Schlupf [-]

s : alter Schlupf [-]

R_{2v} : Läuferwiderstand [Ω]

R_2 : ursprünglicher Läuferwiderstand [Ω]

Der Kippschlupf s_K der Maschine steigt nach der gleichen Gesetzmäßigkeit an. Diese Methode der Drehzahlstellung ist jedoch mit hohen Stromwärmeverlusten in den Läuferwiderständen verbunden und daher für Dauerbetrieb wenig geeignet.

- Energierückspeisung aus dem Läufer in das Netz (nur bei Schleifringläufermaschinen möglich!).

Anstatt die Schlupfenergie in den Läuferwiderständen zu vernichten, wird sie mittels eines Umrichters in das speisende Netz zurückgeführt (untersynchrone Stromrichter-kaskade). Diese energiesparende Schaltung eignet sich besonders für große Leistungen (ca. 0,5 bis 25 MW) im niedrigen Drehzahlbereich.

- Absenken der Klemmenspannung durch Drehstromsteller.

Durch Variation des Zündwinkels bei Drehstromstellern kann die am Motor anliegende Spannung zwischen Null und dem vollen Wert der Netzspannung verändert werden. Bei Verringerung der Klemmenspannung nimmt M_K proportional zum Quadrat der Klemmenspannung ab, während s_K und n_N annähernd konstant bleiben. Bei normaler Läuferauslegung ergibt sich damit nur ein sehr eingeschränkter Drehzahlstellbereich.

Für diese Art der Drehzahlstellung kommen deshalb spezielle Maschinen mit einem sog. Widerstandsläufer zum Einsatz. Durch den höheren Widerstand des Käfigs tritt das Kippmoment erst bei Schlupfwerten um 1 auf, wodurch der gesamte Drehzahlbereich motorisch genutzt werden kann. Die Methode der Spannungsabsenkung bei konstanter Frequenz ist immer verlustbehaftet und eignet sich daher nur zur Drehzahlstellung bei kleinen Lüfter- und Pumpenantrieben.

Möglichkeiten des Anfahrens mit der ASM

Das Anlassen von Kurzschlußläufermaschinen kann durch folgende Verfahren erfolgen:

- Direktes Einschalten
- Anlauf über Stern-Dreieck-Umschaltung der Ständerwicklung
- Einschalten über Anlaßtrafo
- Einschalten über Ständervorwiderstand
- Einschalten über elektronischen Anlasser

Die Auswahl des Verfahrens wird durch die Belastbarkeit des Netzes, die motortechnischen Gegebenheiten, Vorgaben von Seiten der Arbeitsmaschine und die damit verbundenen Kosten beeinflusst.

Das direkte Einschalten des Motors ist nur dann möglich, wenn die hohen Anlaufströme vom Netz zur Verfügung gestellt werden können. Die Motorschutzschalter sprechen i.allg. nicht an, da diese so ausgelegt sind, daß sie den Motor vor länger dauernden Überlastungen schützen sollen, also auf die nur kurzzeitig auftretenden, hohen Anlaufströme nicht reagieren. Bei großen Motoren darf die Zahl der vom Hersteller angegebenen, maximal zulässigen Anläufe nicht überschritten werden. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist das hohe Anlaufmoment, das einen Lastanlauf z.T. erst ermöglicht und die Anlaufzeiten erheblich verkürzt.

Bei kleinen bis mittleren Leistungsklassen und schwachen Netzen sowie immer dann, wenn die anzutreibende Anlage empfindlich gegen Drehmomentenstöße reagiert, empfiehlt sich das Anlassen der ASM über eine Stern-Dreieck-Umschaltung der Ständerwicklung mit Hilfe eines Walzenschalters oder von Schützen. Voraussetzung hierfür ist, daß die Eingangs- und Ausgangsklemmen aller drei Ständerwicklungen frei zugänglich sind.

In *Bild 3-4* ist die Ständerwicklung einer Drehstrommaschine in Stern- bzw. Dreieckschaltung mit den jeweiligen Spannungen und Strömen schematisch dargestellt.

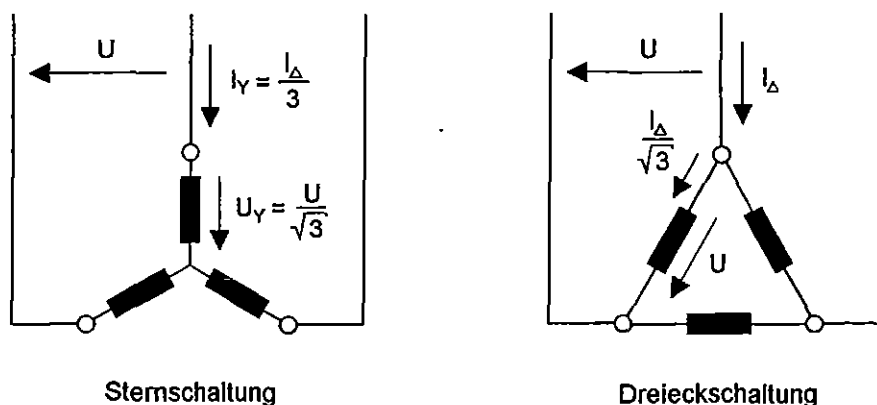


Bild 3-4: Spannungen und Ströme bei Stern-Dreieck-Anlauf

Der Motor wird in Sternschaltung angefahren und so lange beschleunigt, bis das Motormoment M_M das Widerstands- bzw. Gegenmoment M_G der Arbeitsmaschine erreicht. Dies bedeutet, daß eine Beschleunigung des Antriebssystems nur solange möglich ist, wie M_M größer als M_G ist. Im Gleichgewichtszustand ($M_M = M_G$) stellt sich eine konstante Drehzahl im Sternbetrieb ein, d.h. der Motor bleibt bei n_Y hängen und muß auf Dreieck umgeschaltet werden. Liegt dieser Umschaltpunkt zu niedrig, so führt dies zu relativ hohen Stromspitzen. Der Anlauf in Stern-Dreieck-Umschaltung erweist sich dann als nicht sehr effektiv (vgl. *Bild 3-5*).

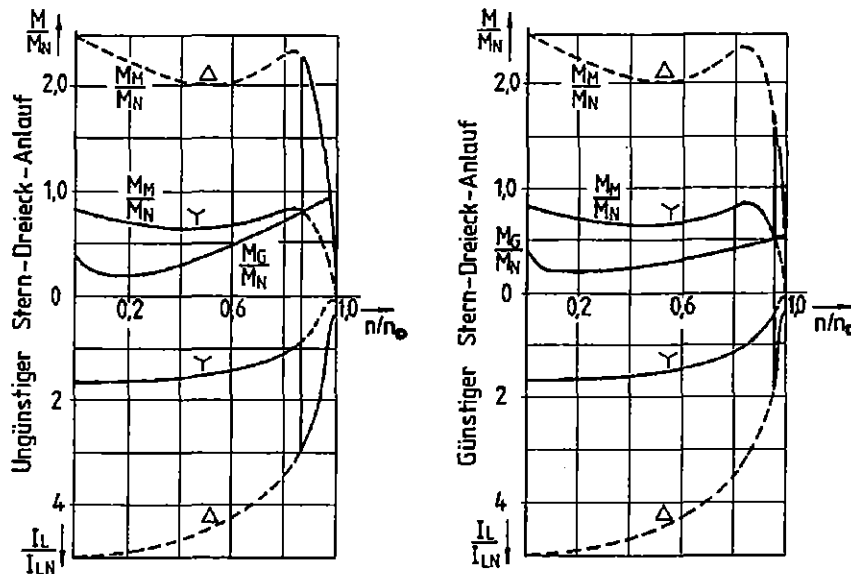


Bild 3-5: Stern-Dreieck-Umschaltung einer ASM /ZAE 2/

Gegenüber dem stationären Dreiecksbetrieb beträgt die Strangspannung U_Y nur das $1/\sqrt{3}$ -fache des Nennwertes U , wodurch sich das Anlaufmoment $M_{A,Y}$ bei Sternschaltung um den Faktor 3 reduziert. Gleichzeitig sinkt auch der Anlaufstrom $I_{A,Y}$ in der Zuleitung um den Faktor 3 gegenüber dem Normalwert $I_{A,\Delta}$ in Dreieckschaltung ab. Die elektrische Leistung $P_{el,Y}$ beträgt im Sternbetrieb folglich nur $1/3$ der Leistung $P_{el,\Delta}$ in Dreiecksbetrieb. Eine Beschleunigung des Antriebs im Sternbetrieb ist bis zum Erreichen des Gegenmomentes M_G möglich. Dies bedeutet also, daß die Sternschaltung bei einem geringen Lastmoment u.U. auch als Betriebsschaltung verwendet werden kann. Das verhältnismäßig einfach und billig zu realisierende Verfahren der Stern-Dreieck-Umschaltung ist mit einer entscheidenden Energieeinsparung verbunden, wenn ein überdimensioniertes System, das üblicherweise im Dreiecksbetrieb eingesetzt wird, im Sternbetrieb stationär arbeiten kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Einschaltströme ist der dreisträngige Anlaßtrafo, der nach dem Anlauf wieder vom Netz getrennt wird. Die Anlaufströme im Motor können um das Übersetzungsverhältnis, die Netzbelastung um das Quadrat des Übersetzungsverhältnisses des Trafos verringert werden.

Dreisträngige Ständervorwiderstände bewirken ebenfalls eine Reduzierung des Anlaufstromes I_A . Die Investitionen für diese Lösung sind relativ gering, allerdings werden durch die Vorwiderstände zusätzliche Verluste verursacht. Ist ein sanfter Anlauf des Kurzschlußläufers erforderlich, so kann auch ein veränderlicher einsträngiger Ständervorwiderstand zwischengeschaltet werden (Kusa-Schaltung). Dies führt jedoch nur zu einer Reduzierung von I_A in einem Strang und folglich auch zu keiner bedeutenden Entlastung des Netzes.

Beim Anlassen des Motors über elektronische Anlasser (Drehstromsteller) wird die Ständerspannung ausgehend von einem wählbaren Anfangswert über eine Rampe mit einstellbarer Zeit auf die Nennspannung hochgefahren. Durch geeignete Wahl der Anlaufspannung in Verbindung mit einem unterlagerten Stromregelkreis wird erreicht, daß auch bei Anlauf mit hohem Lastmoment der zulässige Stromgrenzwert nicht überschritten wird. Der elektronische Anlasser kann darüber hinaus auch zur Reduzierung von Verlusten im längeren Leerlaufbetrieb eingesetzt werden.

Bremsschaltungen bei der ASM

Bei den Bremsschaltungen von ASM läßt sich zwischen Verlust- und Nutzbremmung unterscheiden, je nachdem ob die mechanische Energie in Form von Wärme an Widerstände abgegeben oder als elektrische Energie ins Netz zurückgespeist wird. Eine Nutzbremmung ist hierbei nur bei polumschaltbaren ASM oder ASM mit Schleifringläufern über einen Stromrichter (untersynchrone Stromrichter-kaskade) möglich, wenn die Netzspannung in Frequenz und Amplitude festliegt. Bei Umrichterspeisung mit einem in Frequenz und Amplitude verstellbarem Drehspannungssystem kann Nutzbremmung sehr einfach auch bei ASM mit Käfigläufer realisiert werden.

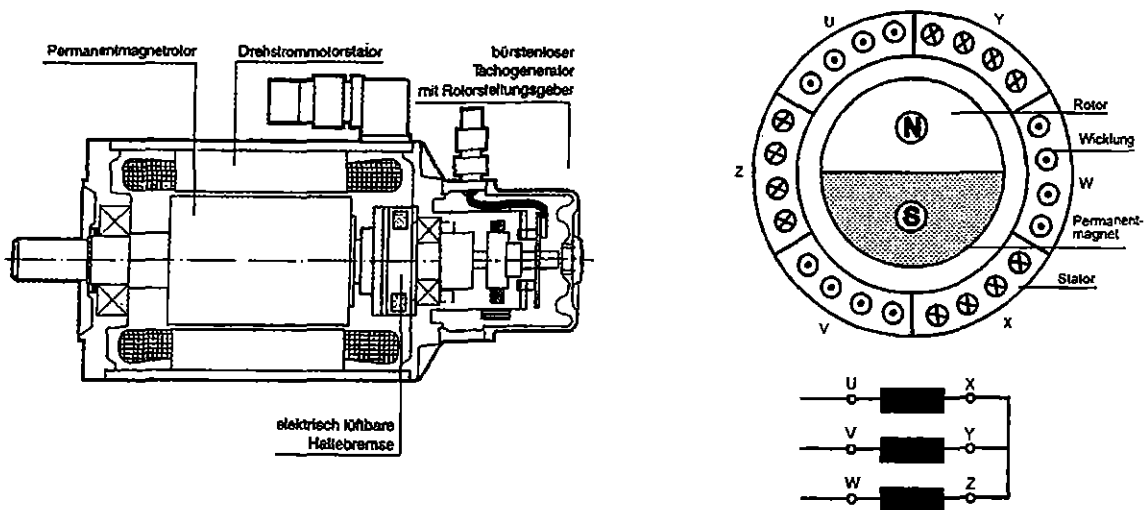
Bei der verlustbehafteten *Gleichstrombremsung* wird die ASM vom Netz getrennt und durch Anlegen einer Gleichspannung an die Ständerklemmen ein Bremsmoment erzeugt, das einen ähnlichen Verlauf wie die M/n -Kennlinie im motorischen Betrieb aufweist. Durch Läuferwiderstände kann das einer bestimmten Drehzahl zugeordnete Bremsmoment beeinflußt werden. Bei der ebenfalls verlustbehafteten *Gegenstrombremsung* erfolgt durch Umpolen zweier Strangzuleitungen während des Motorbetriebs eine Drehrichtungsumkehr des Drehfeldes. Die zuvor belastete Maschine bremst nun mit einem Bremsmoment ab. Bei Erreichen des Stillstandes muß der Motor abgeschaltet werden, da er sonst in entgegengesetzter Richtung wieder anläuft. Für die direkt nach dem Umschalten auftretenden Schlupfwerte von ca. 2 liegt der Ständerstrom über dem Kurzschlußstrom. Bei ständigem Einsatz der Gegenstrombremsung muß der Ständerstrom durch Absenken der Ständerspannung oder durch einen Läuferwiderstand verringert werden. Zum Einsatz kommt die Gegenstrombremsung beispielsweise bei Hebezeugen zum Absenken einer Last mit konstanter Geschwindigkeit /ZAE 2/.

3.1.2 Synchronmaschine

Die Synchronmaschine (SM) im Generatorbetrieb ist heutzutage die wichtigste elektrische Maschine zur Erzeugung elektrischer Energie. Bei den stationären elektrischen Antrieben hatte sie dagegen in der Vergangenheit aufgrund ihrer eingeschränkten Drehzahlregelbarkeit nur eine untergeordnete Bedeutung. Der Synchronmotor kam vor allem dort zum Einsatz, wo eine konstante Drehzahl gefordert war, z.B. bei kontinuierlich betriebenen Großantrieben. Eine Begrenzung auf diese Einsatzbereiche lag auch im relativ schwierigen Anlaufverhalten dieses Motorenkonzepts begründet. Mit fortschreitender Entwicklung der Umrichtertechnik erschlossen sich der Drehstrom-SM jedoch mehr und mehr neue Einsatzpotentiale bei der industriellen Kraftbedarfsdeckung.

Bei den Synchronmaschinen wird zwischen Außenpol- und Innenpolmaschinen unterschieden. Die Außenpolmaschine entspricht vom Aufbau her der Gleichstrommaschine. Die elektrisch oder permanent erregten Magnetpole befinden sich am Ständer. Der Läufer trägt jedoch statt einer Gleichstrom- eine Drehstromwicklung. Die Stromzufuhr zur Läuferwicklung erfolgt über Schleifringe, was jedoch bei Maschinen mit großen Leistungen Schwierigkeiten bereitet.

In **Bild 3-6** ist schematisch der Längs- und Querschnitt einer permanent erregten Innenpol-Synchronmaschine dargestellt.



IM003A96 DOC

Bild 3-6: Längs- und Querschnitt einer permanent erregten Innenpol-SM /ZAE 4/

Die überwiegende Anzahl der SM wird als Innenpolmaschinen ausgeführt. Der Läuferwicklung wird über Schleifringe ein Gleichstrom zugeführt, der das Erregerfeld aufbaut. Das Drehfeld wird im Ständer über eine Drehstromwicklung erzeugt und kann daher problemlos auch mit hohen Strömen versorgt werden, wodurch eine hohe Maschinenleistung ermöglicht wird. Eine

Sonderform der Innenpolmaschinen stellen StromrichterMotoren dar, die über einen im Läufer integrierten, mitrotierenden Gleichrichtersatz zur Erregerstromversorgung verfügen. Die Erregung kann auch mittels Permanentmagnete im Läufer erfolgen, wobei die Erregerstromversorgung, die Schleifringe und die Läuferwicklung entfallen. Diese Methode schränkt zwar die Möglichkeiten im Feldschwächbetrieb ein, ist jedoch mit erheblich besseren Wirkungsgraden verbunden.

Im unteren Leistungsbereich (bis 35 kW) werden i.allg. durch Pulswechselrichter gesteuerte, dauermagneterregte SM für Positionieraufgaben sowie Gruppenantriebe in der Kunstfaser- und Textilindustrie verwendet. Zur Drehzahlstellung dienen jeweils Frequenzumrichter mit Spannungszwischenkreis. Für mittlere bis große Leistungen kommt die Technik des StromrichterMotors zum Einsatz, bei der Frequenzumrichter mit Stromzwischenkreis verwendet werden. Synchronmotoren mit Direktumrichter für Frequenzen zwischen 0 und 25 Hz werden für Großantriebe bei Verdichtern, Zementmühlen, Brechern etc. eingesetzt.

Der Rotor, auch Polrad genannt, läuft bei der SM synchron mit dem Drehfeld der Ständerwicklung um. Daher ist die Drehzahl n einer SM analog zu Gleichung 3-1 über die Polpaarzahl p fest mit der Netzfrequenz f_{Netz} verknüpft:

$$n = n_0 = \frac{f_{Netz} \cdot 60}{p} \quad [\text{min}^{-1}]$$

Für eine ausgeführte SM ist die Drehzahl entsprechend der Netzfrequenz fest vorgegeben und kann, falls dies konstruktionstechnisch vorgesehen ist, durch Umschalten der Polzahl in zwei oder drei Stufen verändert werden. Eine stufenlose Drehzahlsteuerung der SM ist bei konstanter Polpaarzahl nur über die Frequenz der Anschlußspannung möglich. Mit der Frequenz muß jedoch auch die Spannung verändert werden, um für eine optimale Maschinenausnutzung den magnetischen Fluß über das Verhältnis U/f konstant zu halten. Während es in der Vergangenheit nur mit relativ großem Aufwand mittels rotierender Umformer möglich war, aus dem 50-Hz-Netz eine Versorgungsspannung variabler Frequenz und Amplitude zu wandeln, bietet die heutige Umrichtertechnik eine relativ einfache Möglichkeit zur Drehzahlstellung. Die weitere Verbreitung des Synchronmotors für drehzahlvariable Antriebe hängt somit in erster Linie von den Kosten und der Baugröße der Frequenzumrichter ab.

Die Einsatzmöglichkeiten der SM werden durch das maximale Moment (Kippmoment) bzw. die Überlastbarkeit entscheidend mitbestimmt. Die SM hält unabhängig von der Belastung die sogenannte Synchrondrehzahl. Bei Belastung des Läufers wird das Feld des Polrades gegenüber dem Ständerfeld verdreht. Der sich dadurch einstellende Lastwinkel ϑ ist im motorischen Betrieb negativ und im generatorischen Betrieb positiv.

Unter Vernachlässigung der Verluste, wie dies für größere Maschinen in erster Näherung zulässig ist, läßt sich das Drehmoment M wie folgt darstellen /TUM/:

$$M = -\frac{3 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot U_1 \cdot I_K \cdot \sin \vartheta = -M_K \cdot \sin \vartheta \quad [\text{Nm}] \quad \text{mit } R_1 = 0 \quad (3-6)$$

- p : Polpaarzahl [-]
 f : Frequenz [Hz]
 U_1 : Strangspannung [V]
 I_K : Strom bei dreisträngigem Kurzschluß [A]
 ϑ : Lastwinkel [deg]
 M_K : Kippmoment [Nm]

Das Drehmoment der Synchronmaschine verläuft als Funktion des Polradwinkels sinusförmig. Ist der Lastwinkel ϑ kleiner als Null, eilt das Polrad nach (Motorbetrieb). Das maximale Moment (Kippmoment) wird im Motorbetrieb bei einem Lastwinkel von -90° erreicht. Eine weitere Verkleinerung von ϑ führt zu einer Störung des Gleichgewichts zwischen mechanischem und elektrischem Drehmoment, d.h. zu einer instabilen Betriebsweise. Im generatorischen Betrieb wird die SM durch die zugeführte mechanische Leistung beschleunigt, im motorischen Betrieb durch die abgegebene mechanische Leistung verzögert. Die dabei auftretenden Ströme können ein Mehrfaches der Werte der Nennströme betragen. Zur Gewährleistung einer sicheren Betriebsweise muß in der Praxis eine 1,5- bis 2-fache Überlastbarkeit eingehalten werden, d.h. daß das Kippmoment ca. 1,5- bis 2-mal größer sein muß als das Nennmoment. Dies entspricht einem Lastwinkelbereich von etwa -30° bis -40° im Motorbetrieb. In **Bild 3-7** ist die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie einer Drehstrom-Synchronmaschine dargestellt.

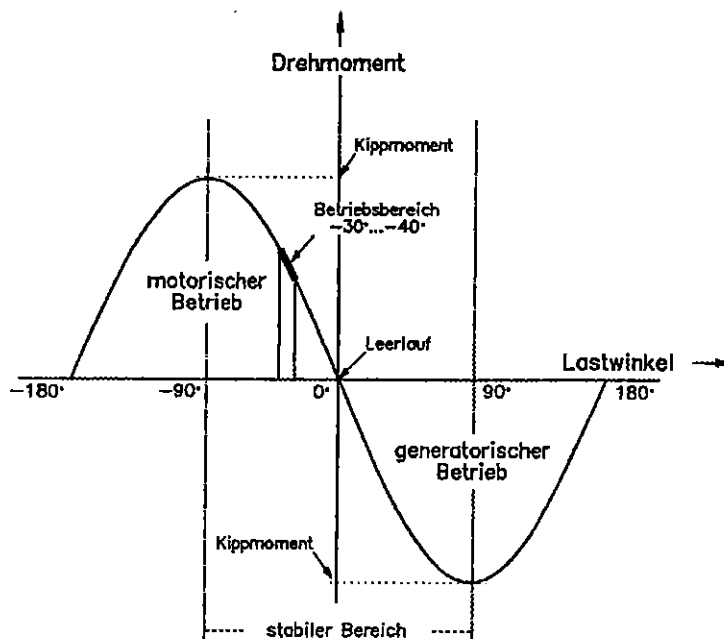


Bild 3-7: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie einer Drehstrom-Synchronmaschine /ZAE 2/

Möglichkeiten des Anfahrens mit der SM

Der Anlauf des Synchronmotors gestaltet sich im Gegensatz zu anderen Motorvarianten als sehr problematisch. Ein Selbstanlauf der SM bei konstanter Netzfrequenz ist wegen des instabilen Betriebs für $\vartheta < -90^\circ$ nicht möglich.

Eine Möglichkeit für den Anlauf des Synchronmotors besteht darin, diesen mit einem eigenen *Anwurfmotor* anzutreiben, bis die synchrone Drehzahl näherungsweise erreicht ist. Die elektrische Kopplung der SM an das Netz erfolgt dann in gleicher Weise wie bei Generatoren unter Einhaltung der Synchronisierungsbedingungen. Dieses aufwendige Verfahren läßt sich nur dort anwenden, wo die SM ohne Last angefahren werden kann. Ansonsten müßte der Anwurfmotor eine Dimensionierung der gleichen Größenklasse wie die SM aufweisen.

Das in den meisten Fällen angewendete Verfahren ist der *asynchrone Selbstanlauf* mittels einer bei Vollpolmaschinen zusätzlich in den Läufernuten kurzgeschlossenen Stabwicklung (Kurzschlußkäfig). Bei Schenkelpolmaschinen liegt diese Käfigwicklung in den Polschuhen. Die SM läuft hierbei analog zur Käfigläufer-ASM hoch, wobei die Erregerwicklung zunächst über einen Widerstand kurzgeschlossen ist, um sie vor zu hohen induzierten Spannungen zu schützen. Bei Erreichen der maximalen Drehzahl ($\approx n_0$) wird dann auf Gleichstromerregung umgeschaltet, wodurch der Läufer unter mehr oder weniger starken Pendelungen in den Synchronismus gezogen wird. Der zum asynchronen Anlauf verwendete Kurzschlußkäfig dient bei synchronem Betrieb auch dazu, Drehschwingungen, die bei Belastungsstößen auftreten können, zu dämpfen.

Der asynchrone Anlauf ist nur dann problemlos möglich, wenn die synchrone Drehzahl einen Schlupf kleiner als 5 % erreicht und die zu beschleunigenden Massen (Schwungmomente) nicht zu groß sind. Das Lastmoment darf ebenfalls nicht zu groß sein, damit das Motordrehmoment ausreicht, die Maschine in den synchronen Lauf zu ziehen. Wie bei Käfigankermotoren sind die Anlaufströme sehr groß und die Anzugsmomente klein. Durch den Einbau von Käfigen mit einem hohen elektrischen Widerstand kann der Anlaufstrom erheblich reduziert und das Anzugsmoment vergrößert werden. Dies hat jedoch seine Grenzen, da durch Erhöhung des Käfigwiderstandes der Schlupf im asynchronen Betrieb anwächst und sich daraus Schwierigkeiten ergeben, den Motor in den Synchronismus zu ziehen.

Wenn die Anlaufströme zu groß werden, geht man zum *Teilspannungs- oder Teilwicklungsanlauf* über. Der Motor wird hierbei über einen Stufentransformator oder nur mit einem Teil der Wicklungen angelassen. Der Teilwicklungsanlauf ist gegenüber dem Teilspannungsanlauf wegen des nicht benötigten Anlaßtransformators die einfachere und billigere Lösung, führt aber zu höheren Anlaufströmen und erfordert Ständerwicklungsanzapfungen.

3.1.3 Gleichstrommaschine

Die wesentlichen Vorteile der Gleichstrommaschine (GSM) liegen neben der robusten Ausführung in der kostengünstigen Technik im Vergleich zu anderen Systemen. GSM werden für das gesamte Leistungsspektrum angeboten. Kleinstmotoren mit Leistungen von unter 1 W finden vor allem in der Feinwerktechnik Verwendung. In der Automobilindustrie kommen dauermagneterregte Motoren in großer Anzahl z.B. als Scheibenwischer-, Gebläse- und Stellmotoren zum Einsatz. Großmaschinen mit Motorleistungen bis über 10 MW dienen in der Industrie vor allem als Antriebe von Werkzeugmaschinen, Förderanlagen und Walzstraßen.

Die Grundkonstruktion einer GSM ist relativ einfach. Zur Generierung eines Drehmoments ist nach dem Kraftwirkungsgesetz ($F = B \cdot I \cdot l$) ein Magnetfeld einer Flußdichte B mit einem drehbar darin angeordneten Leiter der Länge l , der vom Gleichstrom I durchflossen wird, notwendig. Zur Erzeugung eines kontinuierlichen Drehmomentes werden Leiteranordnungen mit mehreren räumlich versetzten Leitern und mehreren über den Umfang verteilten Polen verwendet. Durch geeignete Verschaltung wird erreicht, daß alle Leiter innerhalb eines Polbereiches gleichsinnig vom Strom durchflossen werden und so ein Drehmoment in die gleiche Richtung erzeugen.

Der feststehende Ständer (Stator) der GSM aus massivem oder geblechtem Eisen ist durch das doppelte Polsystem, bestehend aus Erreger- und Wendepolen, aufwendig konzipiert. Dies trägt gleichzeitig zu dem relativ hohen Gewicht des Motors bei. Die Wendepolwicklung ist gegensinnig in Reihe zur Ankerwicklung verschaltet. Durch die Wendepolwicklung wird einerseits die Ankerrückwirkung in der neutralen Zone (zwischen zwei Hauptpolen) kompensiert und andererseits ein Wendefeld erzeugt, um die bei der Kommutierung entstehende Stromwendenspannung auszugleichen. Die Erregerwicklung auf den Hauptpolen liefert die Durchflutung, die zum Aufbau des magnetischen Hauptfeldes notwendig ist. Um eine möglichst große Leiterzahl des Läufers zu überdecken, werden die Hauptpole am Luftspalt in Umfangsrichtung durch sogenannte Polschuhe erweitert. In den Nuten der Polschuhe befindet sich bei großen Maschinen noch eine zusätzliche Kompensationswicklung, die so ausgelegt ist, daß sie einem dem Ankerstrombelag entgegengesetzten, gleich großen Strombelag bildet. Die resultierende Querdurchflutung wird damit im Bereich der Hauptpole zu Null. Der Jochring dient dem äußeren magnetischen Schluß der Feldlinien. Kleine GSM werden mit Permanentmagneten ausgeführt, wogegen bei großen Motoren die Erregerwicklungen zur Erzeugung des Hauptflusses mit Gleichstrom gespeist werden.

Der Läufer (Anker) der GSM besteht aus einem zylindrischen Paket von aufeinander geschichteten und voneinander isolierten Blechen, die auf der Welle befestigt sind. Der Schichtaufbau verhindert, daß sich im Eisenkern des Läufers ausgeprägte Wirbelströme bilden können, die zu erheblichen Verlusten führen würden. Die Oberfläche des Läufers ist mit Nuten versehen, die in axialer Richtung verlaufen und die Läuferwicklung aufnehmen. Bei kleinen Maschinen be-

stehen die Leiter aus lackisoliertem Wicklungsdraht, bei Maschinen großer Leistung aus Rechteckprofil-Kupferbändern mit lackgetränkter Baumwoll- oder Glasseidenisolation. An den beiden Stirnseiten treten die Leiter aus den Nuten heraus, verlaufen bogenförmig weiter und treten in die nächste Nut ein. An einer Seite des Läufers sind die Enden der so gebildeten Spulen an die Lamellen eines Stromwenders angeschlossen.

Bei der GSM wird der für die Momentenbildung erforderliche Strom über ein elektromechanisches System mittels Bürsten auf den rotierenden Läufer übertragen. Der Stromwender (Kommutator bzw. Kollektor) ist ein zylindrischer Körper, an dessen Umfang die elektrischen Anschlüsse der Wicklungen in Form von Kupferlamellen isoliert nebeneinander angeordnet sind. Der Kommutator dient in Verbindung mit den Kohlebürsten, die durch Federdruck auf die Lamellen des Stromwenders gepreßt werden, der Stromzuleitung zum Läufer. Durch den Verschleiß der Bürsten entsteht der Wartungsaufwand einer GSM.

In **Bild 3-8** ist schematisch eine fremderregte, zweipolige Gleichstrommaschine im Querschnitt dargestellt. In der Praxis kommen für mittlere bis hohe Leistungen meist vier- oder mehrpolige Maschinen zum Einsatz, da diese im Vergleich zu zweipoligen Maschinen eine höhere Materialausnutzung und bessere Eigenschaften bei niedrigen Drehzahlen aufweisen.

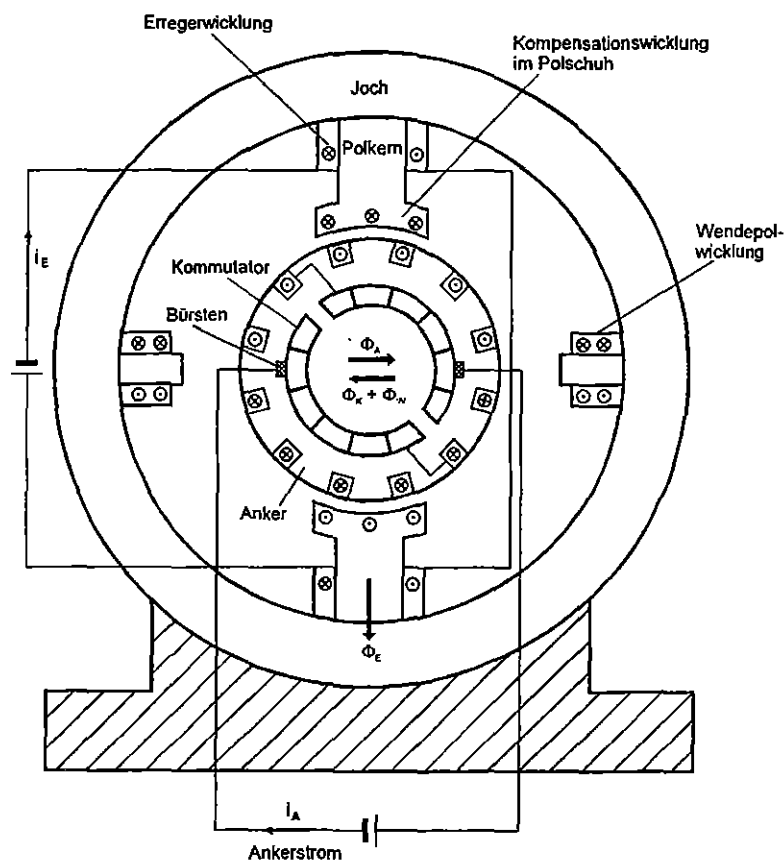


Bild 3-8: Schematischer Querschnitt einer fremderregten, zweipoligen Gleichstrommaschine

Bezüglich der elektrischen Anordnung bzw. Verschaltung der Erregerwicklung unterscheidet man zwischen Nebenschluß- und Reihenschlußmaschinen, die charakteristisch unterschiedliche Zusammenhänge zwischen Drehzahl und Drehmoment aufweisen. Bei der Nebenschlußmaschine ist die Erregerwicklung parallel zur Ankerwicklung verschaltet. Es besteht auch die Möglichkeit der sogenannten Fremderregung durch ein unabhängiges Netz. Bei der Reihenschluß- oder Hauptschlußmaschine liegt die Erregerwicklung dagegen seriell zu der Ankerwicklung.

In **Bild 3-9** ist die relative Drehzahl n/n_0 in Abhängigkeit vom relativen Maschinenmoment M/M_N für die beiden Motorarten der GSM dargestellt. Die Kennlinien weisen bei Nebenschlußmaschinen bzw. fremderregten Maschinen einen linearen, bei Reihenschlußmaschinen dagegen einen hyperbolischen Verlauf auf. Die Drehzahl n nimmt stetig mit der Größe des Vorwiderstandes R_V ab.

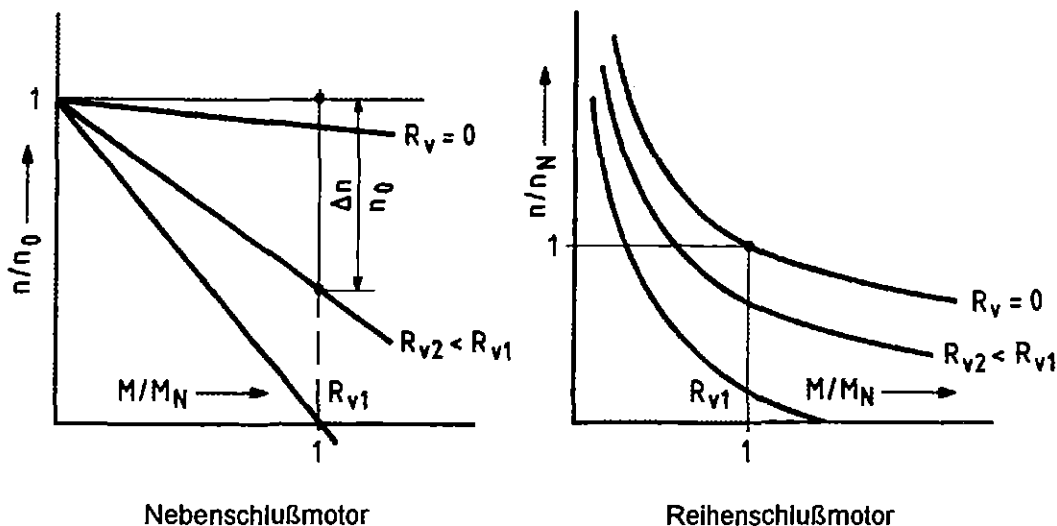


Bild 3-9: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien einer GSM bei Verschaltung als Nebenschluß- und Reihenschlußmotor bei verschiedenen Ankervorwiderständen /FIS/

Für die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien der Gleichstrommaschine gilt allgemein /TUM/:

Nebenschlußmaschine:

$$n(M) = \frac{U_A \cdot 60}{k_u \cdot \Phi_{L0}} - \frac{2 \cdot \pi \cdot (R_A + R_V) \cdot 60}{(k_u \cdot \Phi_{L0})^2} \cdot M = n_0 - \frac{2 \cdot \pi \cdot (R_A + R_V) \cdot 60}{(k_u \cdot \Phi_{L0})^2} \cdot M \quad [\text{min}^{-1}] \quad (3-7)$$

mit $\Phi_{L0} = k_\Phi \cdot I_E$

Reihenschlußmaschine:

$$n(M) = \frac{U_A \cdot 60}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot k_u \cdot k_\Phi \cdot M}} - \frac{(R_A + R_V) \cdot 60}{k_u \cdot k_\Phi} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (3-8)$$

mit $\Phi_{L0} = k_\Phi \cdot I_A$

U_A :	Ankerspannung [V]	k_u :	Maschinenkonstante [-]
R_A :	Ankerwiderstand [Ω]	k_ϕ :	Steigung der Magnetisierungskennlinie [Vs/A]
R_V :	Ankervorwiderstand [Ω]	Φ_{L0} :	Luftspaltfluß [Vs]
I_E :	Erregerstrom [A]	M :	Drehmoment [Nm]

Die Gleichstrommaschine darf generell nie ohne Erregung am Netz betrieben werden; daraus folgt speziell für die Reihenschlußmaschine, daß sie nie ohne Belastung laufen darf. Andernfalls würden die Maschinen unkontrolliert hochlaufen und die maximal zulässige Drehzahl n_{max} überschreiten. Die weite Verbreitung der Gleichstrommaschine ist in ihrer einfachen Steuerbarkeit begründet. Bei konstantem Lastmoment M läßt sich die Drehzahl n entweder über einen Ankervorwiderstand R_V oder über die Ankerspannung U_A und den magnetischen Erregerfluß Φ_{L0} abhängig vom Erregerstrom I_E stellen.

Bei der GSM kann durch Vorschaltung eines stufenlos veränderbaren Widerstandes R_V in den Ankerkreis der Maschine bei konstanter Nennerregung die Drehzahl n von Null bis zur Nenn-drehzahl n_N variiert werden. Der Motor arbeitet in dieser Betriebsweise stets bei vollem magnetischen Fluß Φ_{L0} . Dies hat zur Folge, daß das Drehmoment M unabhängig von der Drehzahl n konstant bleibt, d.h. daß die abgegebene mechanische Leistung P_{mech} linear mit der Drehzahl bis zur Nennleistung P_N ansteigt. Die aufgenommene elektrische Ankerleistung P_A ($P_A = U_A \cdot I_A$) sowie bei der Nebenschlußmaschine die Leerlaufdrehzahl n_0 bleiben bei dieser Betriebsart ebenfalls konstant. Eine Reduzierung von P_{mech} erfolgt demnach nicht durch eine Verringerung der zugeführten elektrischen Leistung, sondern ausschließlich durch die Umsetzung der nicht benötigten Leistung in Stromwärme am Vorwiderstand. Diese Art der Drehzahlstellung ist folglich extrem verlustbehaftet und deshalb für größere Motoren nicht wirtschaftlich. Für den Wirkungsgrad einer derart betriebenen GSM gilt, daß dieser proportional mit der Drehzahl abfällt.

Da Ankervorwiderstände zusätzliche Verluste nach sich ziehen, kommen für eine Drehzahlstellung der GSM heutzutage hauptsächlich Stromrichter mit hohen Wirkungsgraden zum Einsatz, über die die Ankerspannung variiert werden kann. Der Gleichstromsteller (Chopper) ist das einfachste Halbleiterstellglied. Drehmoment und Drehzahl werden im Grundstellbereich mit einem *Ankersteller* und im Feldschwächbereich mit einem zusätzlichen *Feldsteller* variiert. Im Anker- oder Grundstellbereich ($U_A \leq U_{AN}$) kann über die Ankerspannung U_A die Drehzahl bis n_N erhöht werden. Bei konstanter Erregung des Motors (Nennerregung) erhöht sich die Drehzahl proportional zu der zugeführten Spannung. Im Feldschwächbereich ($\Phi_{L0} \leq \Phi_N$) ist bei konstanter Spannung U_{AN} durch Absenkung des Erregerstromes I_E und der damit verbundenen Reduzierung des Erregerfeldes eine Drehzahlsteigerung bis n_{max} möglich. Bei der Nebenschlußmaschine ändert sich gemäß Gleichung 3-7 dadurch die Leerlaufdrehzahl n_0 .

Der Ankersteller wurde früher mit langsam taktenden Thyristoren, der Feldsteller mit Transistoren ausgeführt. Mittlerweile wird der Ankersteller aus bipolaren Transistoren oder IGBT aufgebaut und kann daher mit einer höheren Schaltfrequenz betrieben werden. Die Probleme der Drehmomentwelligkeit konnten dadurch vermindert werden /ZAE 4/.

Innerhalb des gesamten Kennlinienfeldes, das Ankerstell- und Feldschwächbereich miteinander bilden, läßt sich die Drehzahl stufenlos von Null bis n_{max} variieren, wobei die Maximaldrehzahl durch die maximal zulässige Fliehkraftbeanspruchung und durch die bei hohen Drehzahlen auftretenden Probleme bei der Stromwendung vorgegeben wird. Die Maximaldrehzahl liegt i.allg. beim 2- bis 4-fachen Wert von n_N . Falls über Stromrichter eine variable Gleichspannung zur Verfügung steht, erfolgt die Drehzahlstellung im gesamten Betriebsbereich ohne zusätzliche Verluste. Im Feldschwächbereich sinkt allerdings wegen der Begrenzung des maximalen Ankerstromes auf I_{AN} das verfügbare Drehmoment unter M_N ab. Im Grundstellbereich ist ein Betrieb mit konstantem Moment, im Feldschwächbereich mit konstanter Leistung möglich (vgl. auch Kapitel 3.2).

Bei der Reihenschlußmaschine erfolgt eine Erhöhung der Drehzahl durch Feldschwächung mittels der Parallelschaltung eines Widerstandes zur Erregerwicklung.

3.2 Stellglieder

Stellglieder der modernen Antriebstechnik ermöglichen Drehzahländerungen über den gesamten Drehzahlbereich eines Motors. Dies geschieht über die verlustarme Stellung der speisenden Größen Motorstrom, -spannung und -frequenz. Gleichzeitig erfüllen moderne Stellglieder hohe Anforderungen in den Bereichen der Regelungstechnik (Drehzahl- und Drehmomentregelung), Regeldynamik, Gleichlaufgüte bei Gruppenantrieben, Sanftanlauf, Wartung, Inbetriebnahme, Verfügbarkeit, Bedienkomfort, Robustheit, Geräuschentwicklung, EMV und Wirkungsgrad.

Bei Drehstromantrieben spricht man i.allg. von *Frequenzumrichtern*, bei Gleichstromantrieben von *Stromrichtern*.

3.2.1 Frequenzumrichter für Synchron- und Asynchronmaschinen

Frequenzumrichter setzen die nach Amplitude und Frequenz konstante Netzspannung in ein dreiphasiges Spannungssystem variabler Frequenz und Amplitude um.

Generell unterscheidet man bei Frequenzumrichtern zwischen zwei Techniken:

- *Zwischenkreisumrichter mit Gleichgrößenzwischenkreis*
- *Direktumrichter*

Zwischenkreisumrichter mit Gleichgrößenzwischenkreis gliedern sich wiederum abhängig von der Art ihrer Glättungsglieder in zwei Techniken:

- *Stromzwischenkreisumrichter* (I-Umrichter) mit Stromverstellung durch netzgeführten Gleichrichter (induktive Glättung)
- *Spannungzwischenkreisumrichter* (U-Umrichter oder Pulsumrichter) mit Spannungsverstellung durch Pulsen (kapazitive Glättung)

Wegen der hohen Anforderung an Dynamik und Genauigkeit der Ausgangsgrößen kommen in erster Linie U-Umrichter mit konstanter Zwischenkreisspannung in Frage. Im Umrichterbetrieb stellt sich ein völlig verändertes Kennlinienfeld der Drehfeldmaschine gegenüber dem Betrieb am starren Netz ein. Das schematische Betriebsdiagramm einer umrichtergespeisten Synchron- oder Asynchronmaschine entspricht nun weitgehend dem einer Gleichstrommaschine und ist unterteilt in Grundstell- und Feldschwächbereich (vgl. *Bild 3-10*).

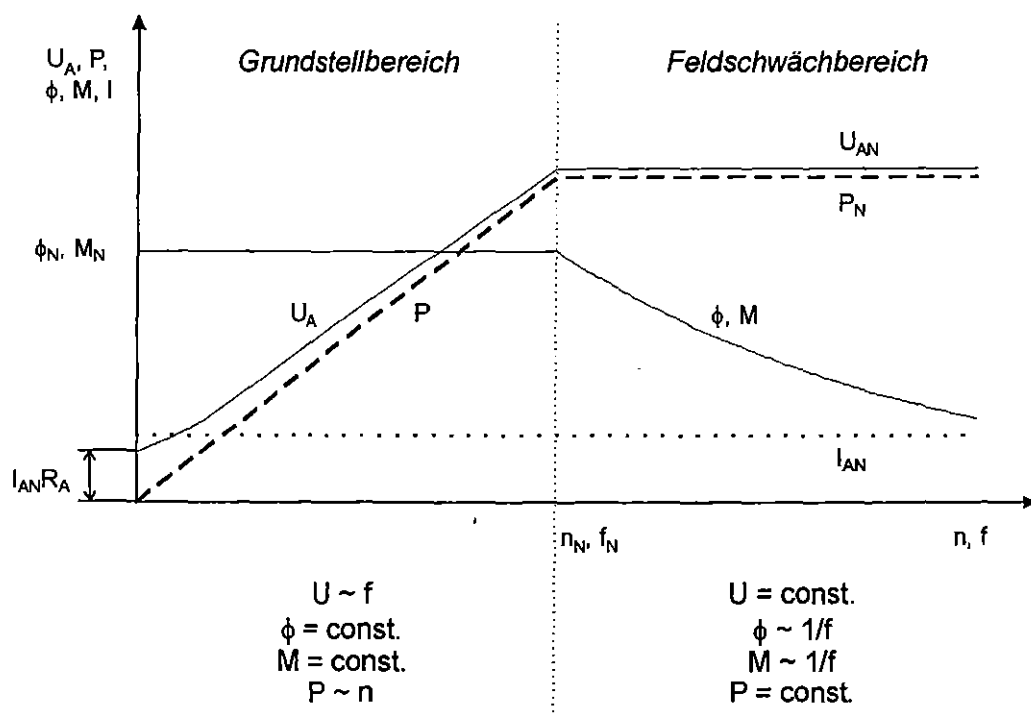


Bild 3-10: Betriebsdiagramm einer umrichtergespeisten Maschine für Ankernennstrom (ZAE 4)

Im Grundstellbereich arbeitet die Maschine mit konstantem Hauptfluß ϕ . Dies ermöglicht einen konstanten Verlauf des Drehmoments M über der Drehzahl n bei unveränderten Maschinenströmen, wobei der Schlupf s bei der ASM mit steigender Speisefrequenz reduziert wird ($s \sim 1/f$).

Zur Drehzahlerhöhung ist eine Frequenzsteigerung der Spannung nötig. Um hierbei eine optimale Maschinenausnutzung zu gewährleisten, muß allerdings das Verhältnis U/f gemäß der auf die Maschinendaten abgestimmten Steuerkennlinie der Spannung U annähernd konstant gehalten werden. Dies bedeutet wiederum, daß mit der Frequenz über eine Verstellung der Pulsbreite bei fester speisender Gleichspannung auch die Motorspannung kontinuierlich erhöht werden muß. Dagegen ist der Motorstrom bis zur Aussteuergrenze der Spannung konstant, da die benötigte Leistung bzw. das geforderte Drehmoment durch die Spannung abgedeckt wird. Bei niedrigen Frequenzen ist die Steuerkennlinie durch eine stromabhängige Spannungsanhebung zur Kompensation des Spannungsfalls am realen Ständerwiderstand R_A geprägt.

Erreicht der Umrichter mit U_{AN} seine Vollaussteuerung, so muß zum Erzielen höherer Drehzahlen in den *Feldschwächbereich* übergegangen werden ($n \sim U/\Phi$). Die Eckdrehzahl stellt sich dabei umso eher ein, je geringer die Zwischenkreisspannung oder je höher das geforderte Drehmoment ist. Die Flußreduzierung wird bei einer permanenterregten Maschine in der Regel durch eine gezielte Vektorsteuerung des Motorstromvektors vor den induzierten Motorspannungsvektor erreicht. In diesem Fall wird zusätzlich zum drehmomentbildenden Stromanteil I_q eine feldschwächende Komponente I_d zum Rotorfluß erzeugt. Das bei konstantem Maschinenstrom erreichbare Drehmoment sinkt nun im gleichen Maße wie die Ständerhauptflußverkettung (vgl. auch /ZAE 4/).

Um ein gefordertes Drehmoment konstant zu halten, müßte im Feldschwächbereich der Motorstrom kontinuierlich gesteigert werden ($M \sim \Phi_{res} \cdot I_{mot}$). Die Motorleistung steigt in diesem Fall mit der Drehzahl ebenfalls weiter linear an ($P_{mech} \sim n \cdot M$), was u.U. schnell zu einer thermischen Überlastung der Maschine führen kann. Aus diesem Grund wird in der Regel der Umrichter so gesteuert, daß die Maschinenleistung bei steigender Drehzahl konstant bleibt und das Drehmoment nach $1/f$ abfällt (vgl. Bild 3-10).

In *Bild 3-11* sind am Beispiel einer permanenterregten Synchronmaschine die stationären Kennlinien von Grundswingungsstrangspannung U_{H01} und Grundswingungsstrangstrom I_{H01} bei konstantem Drehmoment über der Drehzahl aufgetragen.

Bei Betrachtung der Verläufe von Grundswingungsstrangspannung und Grundswingungsstrangstrom sind die beiden Stellbereiche mit ihrem jeweiligen Ansteuerverfahren zu erkennen. Der Vorteil der oben erwähnten Stromvorsteuerung liegt bei einer höheren Momentenausbeute in einem größeren Betriebsbereich. Jedoch sind diesem Steuerverfahren aufgrund der begrenzten Strombelastbarkeit von Umrichter und Motor bestimmte Grenzen gesetzt. Ist der maximale Strom erreicht, kann das Drehmoment mit weiter steigender Drehzahl nicht mehr gehalten werden, da die drehmomentbildende Stromkomponente I_q absinkt.

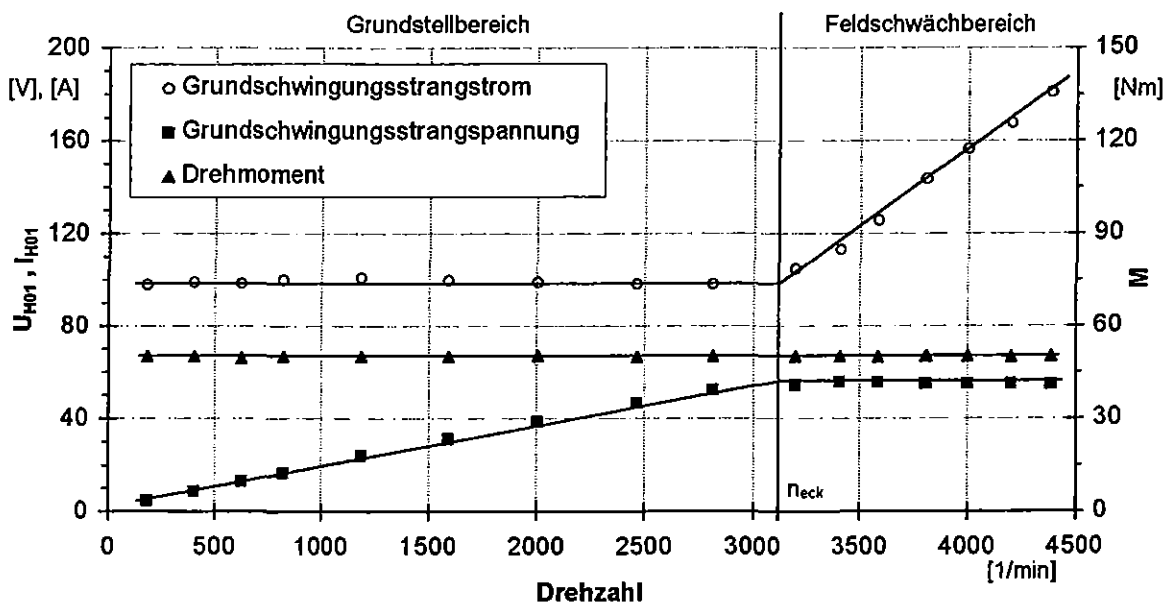


Bild 3-11: Grundschriftungsstrangspannung U_{H01} und -strom I_{H01} im Grundstell- bzw. Feldschwächbereich bei konstantem Drehmoment /ZAE 4/

In Bild 3-12 sind am Beispiel einer permanentenregten Synchronmaschine die Effektivwerte von Strangspannung U_{eff} und Strangstrom I_{eff} bei konstantem Drehmoment in Abhängigkeit von der Zwischenkreisspannung dargestellt. Im Gegensatz zum Grundschriftungsstrangstrom steigt der Stromeffektivwert bereits vor Erreichen der Vollaussteuerung aufgrund der Spannungsmodulation des Umrichters an.

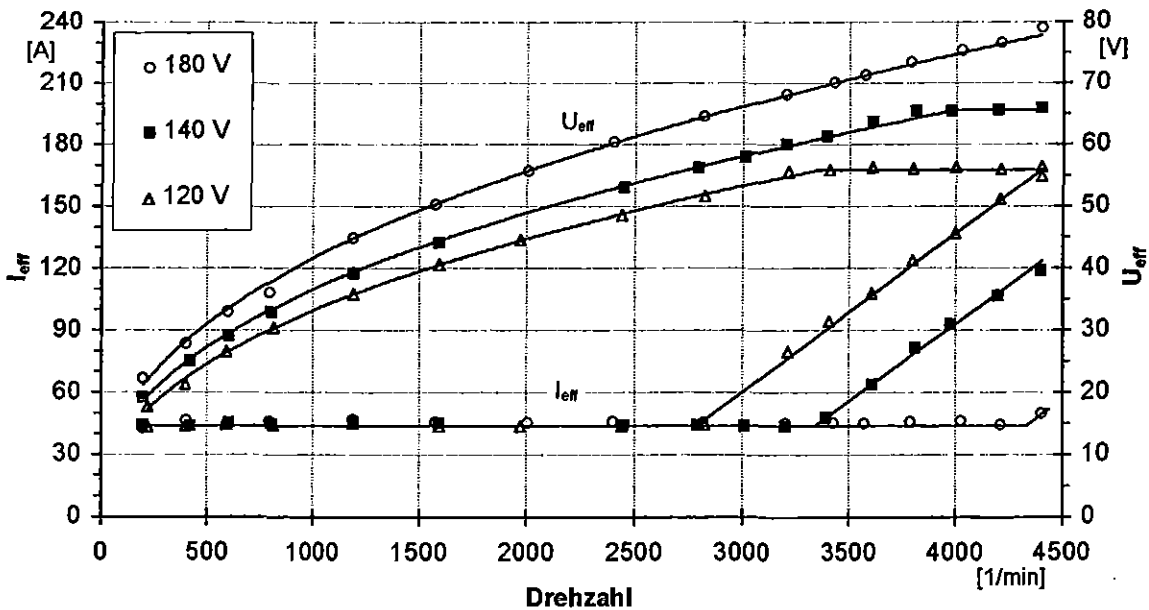


Bild 3-12: Effektivwerte von Strangspannung U_{eff} und -strom I_{eff} im Grundstell- bzw. Feldschwächbereich in Abhängigkeit von der Zwischenkreisspannung /ZAE 4/

Mit höherer Zwischenkreisspannung vergrößert sich der Grundstellbereich. Deutlich zu erkennen ist der nichtlineare Anstieg der Effektivspannung, bedingt durch den Oberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung des Umrichters. Mit zunehmender Aussteuerung des Pulswechselrichters bzw. mit steigender Drehzahl sinkt jedoch der Oberschwingungsgehalt der Spannung aufgrund der breiter werdenden Spannungspulse an den Motorklemmen. Da die Grundschwingung der Motorspannung linear mit der Drehzahl ansteigt, stellt sich ein immer stärker werdender linearer Verlauf der Effektivspannung über der Drehzahl ein. Bezüglich der Grundschwingung wäre eine möglichst hohe Zwischenkreisspannung sinnvoll, um die Maschine auch bei hohen Drehzahlen optimal ausnutzen zu können. Dies hat allerdings den Nachteil steigender Oberschwingungsverluste zur Folge.

Im folgenden werden die einzelnen Umrichterarten Direkt-, I- sowie U-Umrichter näher erläutert.

Direktumrichter

Der Direktumrichter besteht in der überwiegenden Zahl der Anwendungen aus drei netzgeführten Umkehrstromrichtern in kreisstromfreier Ausführung, deren Ausgänge zu einem Sternpunkt verschaltet werden und je einen Strang des angeschlossenen Drehstrommotors einspeisen (Spannungsstellglied). Direktumrichter werden vorzugsweise für langsam laufende Antriebe großer Leistung eingesetzt. Sie weisen einen guten Wirkungsgradverlauf auf und können heutzutage auch höhere Anforderungen an das Regelverhalten erfüllen.

Für Industrieantriebe im Leistungsbereich von 0,5 kW bis 5 MW haben sich jedoch hauptsächlich Strom- und Spannungszwischenkreisumrichter durchgesetzt, so daß im Anschluß ausschließlich diese beiden Systeme betrachtet werden.

Stromzwischenkreisumrichter (I-Umrichter)

In *Bild 3-13* ist beispielhaft der prinzipielle Aufbau eines I-Umrichters mit einer feldorientierten Regelung dargestellt. Beide Umrichtereinheiten, der *netzgeführte, vollgesteuerte Gleichrichter (GR) in Sechspuls-Brückenschaltung* und der *motorseitige, vollgesteuerte Wechselrichter (WR) mit Zwangskommutierung*, sind mit Thyristoren bestückt. Daher ist diese Schaltung auch für große Antriebsleistungen bis in den MW-Bereich technisch und wirtschaftlich hervorragend geeignet.

Das wesentliche Merkmal des I-Umrichters sind die Glättungsinduktivitäten im Zwischenkreis, die zur Einprägung des Zwischenkreisgleichstromes I_d dienen. Dadurch erhält diese Umrichter-technik die Charakteristik einer idealen Stromquelle. Die Thyristoren des motorseitigen Wechselrichters werden abschnittsweise so angesteuert, daß sich der Zwischenkreisstrom jeweils über zwei Stränge der Ständerwicklung schließt. Der Wechselrichter arbeitet dabei vorwiegend

im Blockbetrieb. Das Drehstromsystem wird durch Taktung des Stromes entsprechend der gewünschten Ständerfrequenz zyklisch von einem Motorstrang auf den anderen generiert. Über den eingangsseitigen Gleichrichter wird der Betrag des Motorstromes und über den ausgangseitigen Wechselrichter die Frequenz des eingprägten Motorstromes gestellt. In Ergänzung zu den gesteuerten Ventilen ist der Wechselrichter zusätzlich mit Dioden und Kommutierungskapazitäten bestückt. Die in Reihe zu den Thyristoren geschalteten Dioden bewirken, daß die Ladung der Kapazitäten nicht mit dem Laststrom abfließt, sondern für den nächsten Kommutierungsvorgang zur Verfügung steht. Diese Schaltungsanordnung ermöglicht die Kommutierung vom stromführenden Ventil zum nachfolgenden durch Zünden des nächsten Thyristors, wobei die Reihenfolge keine Rolle spielt /VDE/.

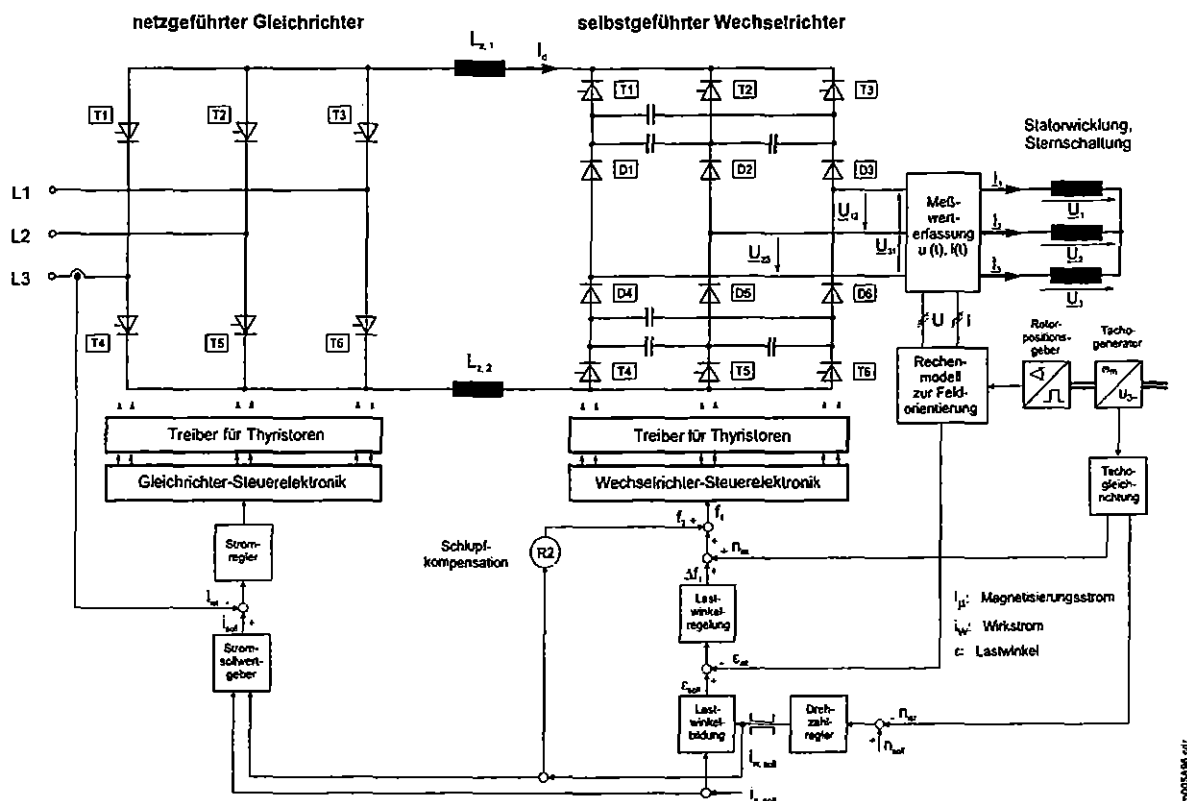


Bild 3-13: Schematische Darstellung eines Stromzwischenkreisumrichters am Beispiel einer feldorientierten Regelung

Im einfachsten und üblichen Fall wird der Stromzeiger gemäß der von einer überlagerten Regelung vorgegebenen Betriebsfrequenz zyklisch fortgeschaltet (Blockbetrieb). Durch die Blockform der Leiterströme reagiert der Motor jedoch mit Oberschwingungen im Drehmoment. Die erste Harmonische im Drehmoment entspricht hierbei der sechsfachen Speisefrequenz und erreicht im Nennpunkt des Antriebs, abhängig von den Maschinendaten, Werte zwischen 15 und 30%, bezogen auf das Nennmoment. Eine solche Steuerung verursacht Pendelungen im Be-

reich kleiner Drehzahlen, weshalb dort häufig auf Pulsbetrieb übergegangen wird. Im Pulsbetrieb werden abschnittsweise zwei benachbarte Stromzeiger getaktet und dabei das Pulsdauerverhältnis kontinuierlich variiert. Hierbei kann die zur Grundfrequenz sechsfache Harmonische weitgehend eliminiert werden. Stattdessen verlagert man die erste nennenswerte Oberwelle im Drehmoment zur gewählten Pulsfrequenz hin. Wegen der Schalteigenschaften der Thyristoren ist die Taktfrequenz in der Regel auf Werte deutlich unter 200 Hz begrenzt /VDE/.

Da der Zwischenkreisstrom fest eingepreßt ist, ist der I-Umrichter nicht leerlaufest, d.h. für den Betrieb des Umrichters muß immer ein Motor angeschlossen sein. Bei ASM muß der Wechselrichter selbst die Kommutierungsblindleistung erzeugen. Da der Kommutierungskreis auf die Last abgestimmt werden muß, ist stets eine Anpassung von Maschine und Umrichter notwendig. Der I-Umrichter eignet sich daher vornehmlich für Einzelantriebe und nur wenig zur Gruppeneinspeisung.

In Bild 3-13 ist beispielhaft eine feldorientierte Regelung in der Ausprägung einer Lastwinkelregelung dargestellt. Diese stellt eine Vorschrift dafür dar, nach welchen Kriterien der Ständerstromzeiger nach Betrag und Frequenz (Winkellage) in Abhängigkeit eines Drehmoment-Sollwertes einzustellen ist. Den Ausgang des Drehzahlreglers darf man als Maß für den Strom-Sollwert $i_{W, \text{soll}} (\sim M)$ interpretieren. Mittels $i_{W, \text{soll}}$ und der in Richtung der Flußlage wirkenden Ständerstromkomponenten $i_{\mu, \text{soll}} (\sim \Phi)$ wird in einem Komponentenrechner der Sollwert i_{soll} zur Regelung des Zwischenkreisstromes bestimmt. Der aus $i_{W, \text{soll}}$ und $i_{\mu, \text{soll}}$ ermittelte Lastwinkel $\varepsilon_{\text{soll}}$ wird mit dem Istwert des Lastwinkels ε_{ist} einer Lastwinkelregelung zugeführt, dessen Ausgang als Frequenzsignal auf den Steuersatz wirkt. Hierbei errechnet sich ε_{ist} aus den nach Betrag und Winkellage gemessenen Motorgrößen Strom und Spannung.

Spannungszwischenkreisumrichter (U-Umrichter)

Spannungszwischenkreisumrichter gewinnen zunehmend an Bedeutung und beherrschen, bezogen auf die verkauften Stückzahlen, heutzutage die Drehstromantriebstechnik /VDE/. Das wesentliche Merkmal eines U-Umrichters ist ein Zwischenkreiskondensator C_z zur Einprägung der Zwischenkreisspannung U_d . Die Kapazität bewirkt eine Entkopplung zwischen dem Eingangsgleichrichter und dem Ausgangswechselrichter. Im unbelasteten Zustand lädt sich die Zwischenkreiskapazität auf den Scheitelwert der Netzspannung auf. Die im Zwischenkreis anliegende Spannung U_d ändert sich im normalen Betriebsbereich nur geringfügig. U-Umrichter verhalten sich daher nahezu wie eine ideale Konstantspannungsquelle. Neben der Motorfrequenz wird auch die Motorstrangspannung vorgegeben, wobei sich der Strom lastabhängig ausbildet. Im Gegensatz zum I-Umrichter ist der U-Umrichter leerlaufest.

In **Bild 3-14** ist beispielhaft der prinzipielle Aufbau eines U-Umrichters (hier Pulsumrichter) mit einer Stromregelung dargestellt.

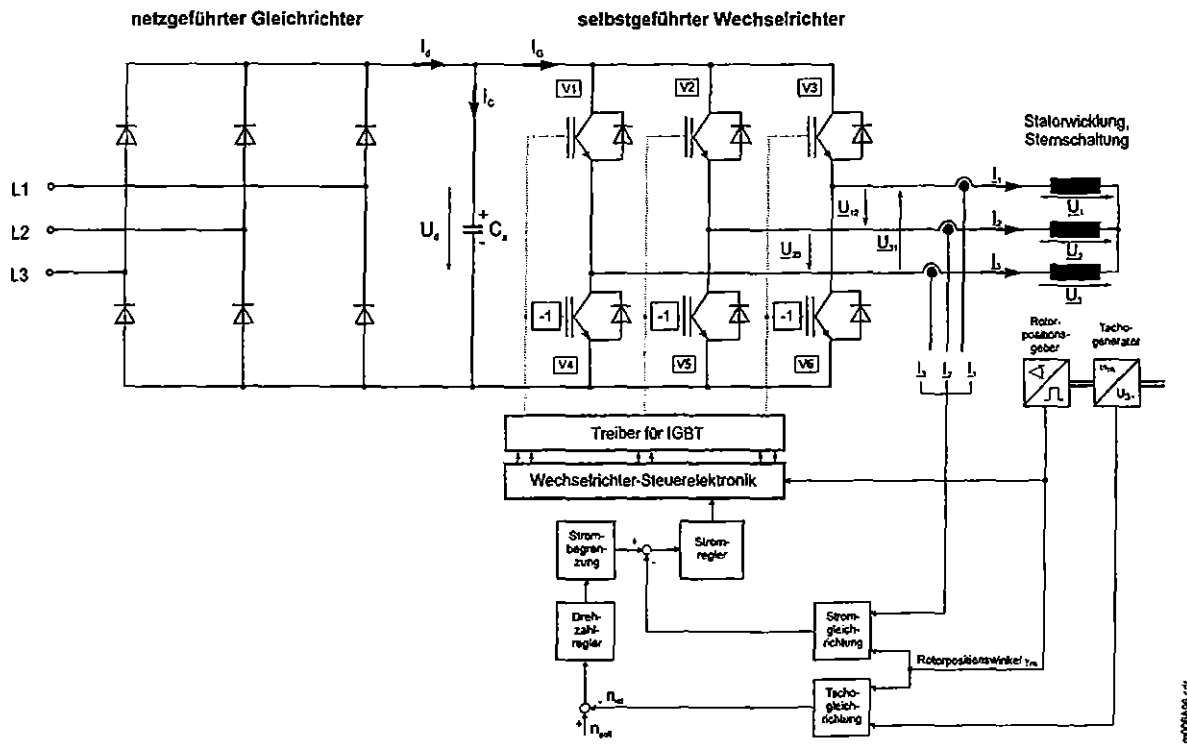


Bild 3-14: Schematische Darstellung eines Spannungszwischenkreisumrichters (Pulsrichter mit IGBT-Leistungshalbleitern) am Beispiel einer Stromregelung /ZAE 4/

Generell gliedern sich U-Umrichter in zwei prinzipiell unterschiedliche Techniken:

- U-Umrichter mit *konstanter Zwischenkreisspannung* und *Pulssteuerung des WR* (Pulsrichter)
- U-Umrichter mit *variabler Zwischenkreisspannung* und *Blocksteuerung des WR*

Die größere Bedeutung kommt hierbei den Pulsrichtern zu. Der eingangsseitige Gleichrichter besteht aus einer ungesteuerten, netzgeführten Diodenbrücke, über die eine konstante Zwischenkreisspannung erzeugt wird. Sollte Nutzbremsebetrieb erwünscht sein, muß eine zusätzliche, allerdings steuerbare Brücke antiparallel zu der Diodenbrücke geschaltet werden. Ist eine Netzurückspeisung nicht lohnenswert, kann die Bremsenergie über einen Widerstand im Zwischenkreis abgeführt werden.

Ausgangsseitig wird durch einen selbstgeführten Wechselrichter durch pulsartiges Zuschalten der Zwischenkreisspannung auf die Motorklemmen eine Wechselspannung mit variabler Frequenz und Amplitude erzeugt (*Pulsweitenmodulation*). Für die Generierung der entsprechenden Pulsmuster gibt es kein einheitliches Verfahren. Abhängig vom Hersteller, der Umrichterleistung sowie der Art und Verschaltung der Brückenbausteine (Halbleiterventile) kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Um ein zufriedenstellendes Betriebsverhalten der Ma-

schine hinsichtlich der Zusatzverluste, Pendelmomente und Geräusche zu erhalten, sollte der Wechselrichter mit einer relativ hohen Schaltfrequenz arbeiten. Dies erfordert hohe Ansprüche an die Leistungshalbleiter (IGBT oder MOSFET).

Bei der Schaltungsanordnung mit abschaltbaren Leistungshalbleitern in einer Brückenschaltung und dazu parallel liegenden Freilaufdioden kann jeweils nur eines der beiden Ventile eines Stranges des WR stromführend sein. Danach können an jedem Ausgang des WR zwei diskrete Spannungspotentiale erzeugt werden, d.h. insgesamt sind acht diskrete Spannungszustände an der Ständerwicklung des angeschlossenen Motors möglich.

Der Pulssteuersatz bildet den Idealwert der Motorspannung bestmöglichst durch Pulsen der realen Spannungszustände ab. In einem weiten Frequenz- und Spannungsbereich lassen sich mit Pulsweitenmodulation nahezu sinusförmige Maschinenströme erzeugen (während bei der Spannung unter Umständen nur unklar ein Pulsmuster erkennbar ist). Mit steigendem Aussteuergrad nimmt allerdings - vor allem bei größeren Leistungen - die Abbildungsfähigkeit des Leistungsteils durch die Mindestschaltzeiten und Schaltfrequenzbegrenzungen ab, so daß der Strom mehr und mehr von der Sinusform abweicht.

Die Motorströme bilden sich aus den im jeweiligen Betriebspunkt des Motors herrschenden Impedanz- und Spannungsverhältnissen. Eine mögliche Regelung für die Einstellung der Ströme entsprechend den gewünschten Verläufen stellt beispielsweise eine Stromregelung dar (vgl. Bild 3-14). Dazu werden die Istwerte der Motorströme erfaßt und zusammen mit den Sollwerten je einem Regler zugeführt. Bei einer Abweichung werden die Ausgangsspannungen des WR im Sinne einer Angleichung der beiden Werte verändert. Die Stromsollwertbildung erfordert Rechenoperationen, die in analoger Technik nur mit sehr hohem Aufwand realisierbar sind. Deshalb ist es vorteilhaft, die Signalverarbeitung über einen Mikroprozessor ausführen zu lassen. Der Istwert für die Drehzahlregelung wird durch zyklisches Abtasten des Rotorpositionswinkels γ_m in kurzen Abständen und sehr hoher Auflösung gebildet, so daß ein separater Drehzahlgeber überflüssig wird.

Der erforderliche Aufwand für die Stromsollwertbildung wird durch Anwendung der Blockstromtechnik maßgeblich reduziert, ohne daß funktionelle Einbußen hingenommen werden müssen. Der Grundgedanke dabei ist, den Statorstrombelag nicht wie bei der Sinusstromspeisung kontinuierlich, sondern in sechs Schritten umlaufen zu lassen. Die Umlaufgeschwindigkeit des Strombelages bestimmt dabei die Drehzahl.

Über den WR werden immer nur zwei der drei Wicklungsstränge mit Strom beaufschlagt, so daß jeweils zwei am Statorumfang benachbarte Zonen gleichsinnig durchflossen werden. Die beiden Zonen bilden am Umfang einen Winkel von 120° , während ein Magnetpol des Rotors einen Winkel von 180° überspannt. Dadurch bleibt bei einer Drehung um $\pm 30^\circ$ der physikali-

sche Zusammenhang der Kraft- bzw. Drehmomentbildung unverändert. Verläßt der Rotor diesen Winkelbereich, so wird der Strombelag sprunghaft um 60° in Drehrichtung weitergeschaltet. Dies geschieht, indem der Statorstrom auf den Wicklungsstrang der in Drehrichtung benachbarten Zone umgeschaltet wird. Auf diese Weise entsteht ein lückenloses Drehmoment, das nur noch von der Amplitude der Ströme abhängig ist. Auftretende Momentenschwankungen lassen sich durch eine optimierte Rotorauslegung begrenzen. Bei einer Drehung der Motorwelle bilden sich in den Wicklungssträngen rechteckförmige Stromblöcke von je 120° elektrischer Länge und 60° langen Pausen aus, die jeweils um 120° phasenverschoben sind.

Mit Hilfe von Polradlagegebern wird die Rotorposition und damit die Richtung des Rotorflusses ermittelt. Davon abhängig erfolgt die Steuerung der Ventile über die Treiber in dem Sinne, daß die Vektoren von Strombelag und magnetischem Fluß im Mittel einen Winkel β von 90° aufspannen. Sorgt man durch geeignete regelungstechnische Maßnahmen dafür, daß Ständerstrom I_1 und Rotorfluß Φ senkrecht aufeinander stehen ($\sin \beta = 1$), so wird der Strom optimal zur Drehmomentenbildung genutzt ($M \sim \Phi \cdot I_1 \cdot \sin \beta$). Da der Rotorfluß bei einer permanent-erregten Maschine konstant ist, kann das Drehmoment in diesem Fall nur über den Motorstrom geregelt werden /ZAE 4/.

Häufig werden an einen Zwischenkreis mit einer Einspeisebrücke mehrere Wechselrichter angeschlossen, so daß neben Einzel- auch Gruppenantriebe (Mehrmotorenantrieben) möglich sind. Durch die zusätzlich benötigte steuerbare Brücke zur Netzurückspeisung ist ein Vierquadrantenbetrieb mit hohem Aufwand verbunden. In diesen Fällen wird daher besonders bei Antrieben mit hohen Leistungen und Trägheitsmomenten der I-Umrichter bevorzugt.

U-Umrichter mit variabler Zwischenkreisspannung werden überwiegend für Anwendungen im hohen Drehzahlbereich eingesetzt (z.B. Textilindustrie, Schleifmaschinen). Allerdings muß hierbei auch der eingangsseitige Gleichrichter steuerbar ausgeführt sein. Dafür kann der Wechselrichter jedoch einfacher aufgebaut werden, da ähnlich wie beim I-Umrichter nur relativ lange Spannungsblöcke und keine kurzen Spannungspulse auf die Maschinenklemmen geschaltet werden müssen. Mittlerweile stehen allerdings kostengünstige Leistungshalbleiter zur Verfügung, so daß im wesentlichen alle U-Umrichter als Geräte mit konstanter Zwischenkreisspannung und pulsweitenmodulierendem Wechselrichter ausgeführt sind.

3.2.2 Stromrichter für Gleichstrommaschinen

Die Drehzahlstellung von Gleichstrommaschinen ist durch Variieren der Ankerspannung möglich. Früher wurde dies durch umschaltbare Vorwiderstände oder Leonardumformer erreicht, wogegen heute überwiegend Stromrichter oder Gleichstromsteller zum Einsatz kommen. Stromrichter wandeln die Drehstrom-Eingangsspannung in eine variable Gleichspannung um. In der Industrie werden GSM meist über netzgeführte Stromrichter betrieben.

Für Leistungen bis etwa 10 kW werden Zweipulsbrückenschaltungen zum Anschluß an das Wechselstromnetz angeboten. Ein Vierquadrantenbetrieb wird durch eine Antiparallelschaltung zweier Brücken realisiert.

Sechspulsbrückenschaltungen ermöglichen einen Betrieb am Drehstromnetz und kommen für Leistungen bis über 1 MW zum Einsatz. Auch hier ist ein Vierquadrantenbetrieb durch Antiparallelschaltung einer zusätzlichen Brücke möglich.

Eine weitere Methode, GSM drehzahleregelt zu betreiben, bietet die Gleichstromstellertechnik. Im Gegensatz zum netzgeführten Stromrichter wird nicht aus der Wechsel- oder Drehspannung des Netzes eine veränderliche Gleichspannung erzeugt, sondern vielmehr die Gleichspannung eines Gleichstromnetzes variiert. In den meisten Fällen steht jedoch kein Gleichstromnetz zur Verfügung, so daß Stromrichter einzusetzen sind.

Für die Auswahl des geeigneten Stromrichters muß neben den Nenndaten auch die Betriebsweise der GSM bekannt sein. Ob der Antrieb im Motorbetrieb für eine oder beide Drehrichtungen eingesetzt wird oder ob eine Möglichkeit zur Nutzbremmung vorzusehen ist, die GSM also im Ein- bzw. Zwei- oder Vierquadrantenbetrieb arbeiten soll, ist vorher abzuklären. Stromrichter verursachen kommutierungsbedingte Spannungseinbrüche, die durch Kommutierungsrosseln zwischen Stromrichter und Motor im Zusammenhang mit Motor- und Netzinduktivitäten zu beherrschen sind.

GSM selbst sind bezüglich ihrer Bauart immer für Stromrichterbetrieb ausgelegt, d.h. daß sich die Listendaten stets auch auf Stromrichterbetrieb beziehen. Aus diesem Grund entfällt im Gegensatz zu an Frequenzumrichtern betriebenen ASM eine Leistungsreduzierung. Die Steuerung der Stromrichter wird in unterschiedlichen Techniken (*Hybrid- oder Mikroprozessortechnik*) angeboten, um unterschiedlichen Anforderungen bei Regelungen gerecht werden zu können.

4 Anlagen- und Systembeschreibung

Bei der Dimensionierung einer Antriebsaufgabe sind zunächst sämtliche Systemanforderungen abzuklären. Neben der sich einstellenden Belastungskennlinie und der gewünschten Betriebsart müssen alle möglichen Betriebspunkte im M/n -Kennlinienfeld bekannt sein. Erst dann kann ein geeigneter Motor ausgewählt werden. Die wichtigsten Auswahlkriterien für einen elektrischen Antrieb sind

- Nennmoment,
- Nenndrehzahl,
- Nennleistung,
- maximales Drehmoment und
- maximale Drehzahl.

Hierbei sind in jedem Fall die direkten Einflüsse der Umrichterspeisung auf den Motor zu beachten. Die Ausgangsgrößen eines Stromrichters zur Speisung eines Gleichstrommotors enthalten neben dem Gleichanteil immer mehr oder weniger große Wechselanteile, die Wirbelströme im aktiven Eisen verursachen. Um die damit verbundenen Eisenverluste zu begrenzen, werden bei vorgesehenem Stromrichterbetrieb Gleichstrommaschinen vollständig geblecht ausgeführt. Auch die Ströme und Spannungen eines von einem I- oder U-Umrichters erzeugten Drehspannungssystems enthalten neben der Grundschiwingung noch eine Vielzahl typischer Oberschwingungen. Obwohl Drehstrommotoren geblecht ausgeführt sind, verursachen diese Oberschwingungen neben störenden Pendelmomenten zusätzlich Eisen- und Stromwärmeverluste. Durch entsprechende Pulsweitenmodulationsstrategien liefern moderne U-Umrichter allerdings nahezu sinusförmige Ausgangsströme, wodurch sich die zusätzlichen Oberschwingungsstromwärmeverluste stark reduzieren.

An den Leistungsgrenzen, d.h. im Bereich der Vollaussteuerung, sind die Möglichkeiten jedoch aufgrund halbleiterspezifischer Ursachen begrenzt. Die zusätzlichen Oberschwingungsverluste bewirken hier hohe Maschinentemperaturen, so daß im Umrichterbetrieb die zulässige Motornennleistung reduziert werden muß. Bei Konstant-Moment-Antrieben kann eine Leistungsreduktion noch aus einem zweiten Grund erforderlich sein. Viele Normmotoren besitzen eine drehzahlabhängige Kühlung. Da es bei Umrichterspeisung möglich ist, eine Maschine auch bei kleinen Drehzahlen mit Nennmoment, d.h. mit gleichen Stromwärmeverlusten, zu betreiben, können diese Verluste nicht ausreichend abgeführt werden. Bei drehzahlabhängiger Kühlung ist es daher unzulässig, die Maschine bei kleinen Drehzahlen mit vollem Nennmoment zu fahren. Abhängig vom Drehzahlbereich ist dann das zulässige Drehmoment zu begrenzen. Je nach Drehzahl-Drehmoment-Stellbereich kann die Verwendung eines I- oder U-Umrichters vorteil-

haft sein. I-Umrichter sind ohne Zusatzausrüstung für Vierquadrantenbetrieb geeignet. Sie weisen allerdings Mängel im Rundlauf bei Frequenzen unter 5 Hz auf. Hier lassen sich Verbesserungen durch Pulssteuerverfahren erzielen. Der Feldschwächbereich ist wegen der begrenzten Leerlaufestigkeit eingeschränkt.

Dieses Problem tritt beim U-Umrichter mit Pulsweitenmodulation nicht auf. Es lassen sich hohe Feldschwächbereiche erzielen. Auch bei kleinen Frequenzen sind die Motorströme fast sinusförmig, so daß Rundlauf (minimale Pendelmomente) bis zum Stillstand möglich ist. Vierquadrantenbetrieb mit NetZRückspeisung ist nur unter Mehraufwand (zusätzliche Netzbrücke) möglich. Dafür weisen U-Umrichter bei Mehrmotorenantrieben mit kleiner Scheinleistung (ca. 50 kVA) und bei Gruppenantrieben mit großer Scheinleistung (30 ... 5.000 kVA) Vorteile auf, wenn die Mehrzahl der Motoren abgeschaltet wird. Bleibt die Mehrzahl der Motoren zugeschaltet, können auch I-Umrichter eingesetzt werden. U-Umrichter erlauben einen Verbundbetrieb mehrerer Wechselrichter.

Im Umrichterbetrieb ergeben sich Einflüsse auf das Netz (*NetZRückwirkungen*). Es gibt Grenzwerte, die die Größe einzelner Oberschwingungsspannungen und kommutierungsbedingte Spannungseinbrüche begrenzen. Ebenso ist durch entsprechende Umrichterauslegung dafür zu sorgen, daß ausreichende Funkentstörgrade eingehalten werden. Aufgrund der ungesteuerten Diodenbrücke arbeiten U-Umrichter mit einem Leistungsfaktor $\cos \varphi$ von ungefähr 1. Der Leistungsfaktor ist bei I-Umrichtern wegen der gesteuerten Netzbrücke ungünstiger.

Um zu einem Motor den entsprechenden Umrichter auszuwählen, müssen Motornennleistung, Motorwirkungsgrad und sein Leistungsfaktor im Nennpunkt berücksichtigt werden. In Kapitel 7.3 wird darauf näher eingegangen. Motoren und Umrichter haben wechselseitige Rückwirkungen. Werden Motoren direkt am Drehstrom- oder Gleichstromnetz betrieben, so arbeiten sie im allgemeinen an überschwingungsfreien Spannungen. Dagegen sind Umrichter für Drehstrom- oder Gleichstrommaschinen bei vertretbarem Aufwand nicht in der Lage, Spannungen ohne Oberschwingungen zu erzeugen. Als Folge daraus treten zusätzliche Verluste in den Motoren auf, die sich entscheidend in einer Wirkungsgradverschlechterung niederschlagen und auch zur Reduzierung der zulässigen Leistung des Motors führen. Andererseits werden die Verluste des Umrichters durch den gesamten Stromverbrauch des Motors einschließlich der Motorverluste bestimmt.

Motor und Umrichter sind die Hauptkomponenten eines Antriebssystems, die in der Regel den höchsten Investitionsanteil ausmachen und wesentlich die energetischen Eigenschaften des Antriebssystems bestimmen. Daher wurden für diese beiden Hauptkomponenten im Rahmen von *IKARUS - Elektrische Antriebe* Datenblätter für verschiedene Motoren und Umrichter erarbeitet und zusammengestellt.

5 Technisch physikalische Analyse

Die energetische Effizienz elektrischer Antriebe wird durch den Wirkungsgradverlauf über der Auslastung ausgedrückt. Hierbei ist zwischen Umrichter-, Motor- und Systemwirkungsgrad wie folgt zu unterscheiden (vgl. hierzu Bild 2-1):

$$\eta_{\text{Umrichter}} = \frac{P_{\text{mot}}}{P_{\text{el}}} \cdot 100 \% \quad \eta_{\text{Motor}} = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{mot}}} \cdot 100 \% \quad \eta_{\text{Sys}} = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{el}}} \cdot 100 \% \quad (5-1)$$

Zur Beurteilung des technischen Aufwandes zur Verbesserung heute erreichbarer Wirkungsgrade von teilweise über 95 % ist es interessant sich vor Augen zu führen, daß es zur Verbesserung des Wirkungsgrades von beispielsweise 95 % um einen einzigen Prozentpunkt auf 96 % einer Minderung der Verluste um ca. 21 % bedarf.

Unter stationären Bedingungen, d.h. bei konstanter Drehzahl und festen elektrischen Werten gilt folgender Zusammenhang:

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{el}} \pm P_V \quad (5-2)$$

Das negative Vorzeichen gilt für motorischen, das positive Vorzeichen für generatorischen Betrieb.

5.1 Maschinenverluste

Die Umwandlungsverluste P_V rotierender elektrischer Maschinen werden in Form von diffuser Wärme an die Umgebung abgegeben. Nach /VDE 0530/ unterteilen sie sich generell in

- Verluste im Erregerkreis ($= f(I_E, U_E)$),
- stromunabhängige Verluste (Reibungs- und Eisenverluste),
- stromabhängige Verluste (Stromwärme- und Bürstenübergangsverluste) und
- lastabhängige Zusatzverluste.

5.1.1 Stromwärmeverluste

Die in den elektrischen Leitern der Ständer- und Läuferwicklungen entstehende Verlustwärme aufgrund des Grundschwingungsstromes I_{H01} bezeichnet man als Stromwärmeverluste. Das Drehmoment ($\sim I_{H01}$) ist der bestimmende Parameter für die Stromwärmeverlustleistung. Einen weiteren Einflußfaktor stellt die Wicklungstemperatur durch Veränderung des Wicklungswiderstandes R dar. Die Stromwärmeverlustleistung $P_{V, Cu}$ berechnet sich wie folgt:

$$P_{V, Cu} = R \cdot I_{H01}^2 \quad (5-3)$$

5.1.2 Eisenverluste

Die Eisenverluste werden entsprechend ihrer physikalischen Ursachen in Wirbelstrom- und Hystereseverluste unterteilt. Sie entstehen im aktiven Eisen des Ständer- bzw. Läuferblechpaketes und werden durch zeitliche Ummagnetisierungsvorgänge hervorgerufen.

Wirbelstromverluste entstehen durch induzierte Spannungen im aktiven Eisenmaterial. Durch die Leitfähigkeit des Eisens führen diese Spannungen zu sog. Wirbelströmen im Blechpaket, die Verluste in Form von Wärme hervorrufen. Die Wirbelstromverlustleistung $P_{V, Fe, W}$ steigt proportional zum Quadrat des Produktes aus Induktion B und Ummagnetisierungsfrequenz f .

$$P_{V, Fe, W} \sim B^2 \cdot f^2 \sim U_{H01}^2 \quad (5-4)$$

Hystereseverluste entstehen durch innere Reibung der Elementarmagnete bei Ummagnetisierung des aktiven Eisens. Das Maß für die Hystereseverlustleistung, die neben der Grundschwingungsspannung U_{H01} auch von der Grundschwingungsfrequenz f des speisenden Drehspannungssystems abhängig ist, stellt die Fläche der materialabhängigen Hystereseurve bzw. Magnetisierungskennlinie dar. Die Hystereseverlustleistung $P_{V, Fe, Hy}$ steigt proportional zum Produkt aus dem Quadrat der Induktion B und der Motorfrequenz f wie folgt:

$$P_{V, Fe, Hy} \sim B^2 \cdot f \sim \frac{U_{H01}^2}{f} \quad (5-5)$$

Die Eisenverlustleistung $P_{V, Fe}$ resultiert aus der Summe der Wirbelstrom- und Hystereseverlustleistung zu:

$$P_{V, Fe} = P_{V, Fe, W} + P_{V, Fe, Hy} \quad (5-6)$$

5.1.3 Reibungsverluste

Die Reibungsverluste beschränken sich auf Coulombsche Reibung in den Wälzlagern und Ventilationsverluste im Inneren der Maschine. Das Reibmoment M_R hängt dabei in komplizierter Weise von der Drehzahl n ab. Die Reibungsverlustleistung $P_{V, R}$ berechnet sich wie folgt:

$$P_{V, R} = M_R(n) \cdot n \quad (5-7)$$

5.1.4 Zusatzverluste

Die Zusatzverluste beruhen teilweise auf sehr komplizierten Zusammenhängen und sind daher mit einfachen Methoden nicht berechenbar. Im Umrichterbetrieb entstehen wesentlich größere überschwingungsabhängige Verluste als beim Betrieb am starren Netz, so daß den Zusatzverlusten hier eine größere Bedeutung zukommt. In der Bilanzierung werden die Zusatzverluste mit einem prozentualen Zuschlag berücksichtigt, der aus /VDE 0530/ zu entnehmen ist.

Spannungsüberschwingungen führen im Ständerblechpaket der Maschine zu zusätzlichen Umagnetisierungsvorgängen und damit zu erhöhten Eisenverlusten. Die entsprechende Verzerrungsblindleistung hat Stromüberschwingungen zur Folge, die in den Wicklungen der Maschine zusätzliche Stromwärmeverluste verursachen. Zudem führen die höherfrequenten harmonischen Stromüberschwingungen zu einer einseitigen Stromverdrängung im Leitermaterial der Ständer- und Läuferwicklungen. Dieser Effekt bewirkt ein Anwachsen des wirksamen ohmschen Widerstandes und damit eine weitere Zunahme der Stromwärmeverlustleistung.

Im Käfigläufer der ASM treten weitere Zusatzverluste auf. Durch Druckgußfertigung der Wicklung sind die einzelnen Leiterstäbe gut leitend mit dem Blechpaket verbunden. In Verbindung mit der starken Schrägung der Käfigwicklung, um die Geräusche zu reduzieren, begünstigt dieser Umstand die Entwicklung sogenannter Eisenquerströme, die wiederum Stromwärmeverluste im Eisenmaterial bewirken.

5.2 Umrichterverluste

Die Verluste von Frequenz- und Stromrichtern sind generell in drei Gruppen zu untergliedern:

- Verluste im Leistungsteil
- Eigenverbrauch der Steuerelektronik
- Eigenverbrauch der Kühlung

Im Umrichter entstehen in dessen verschiedenen Komponenten Verluste mit unerwünschter Wärmeentwicklung. Die Verluste im Leistungsteil basieren auf den Durchlaß- und Schaltverlusten der Halbleiterventile gemäß *Tabelle 5-1*. Durch Fortschritte in der Halbleitertechnik sind weitere Verbesserungen, nicht nur bezüglich der Ventilverluste, sondern auch bezüglich der Funktionsweise, Schaltung und Topologie von neuen Stromrichtern möglich. Leistungshalbleiter-Bauelemente der neuen Generation, wie z.B. *IGBT- (Insulated Gate Bipolar Transistor)* und *MOSFET-Halbleiter (Metall-Oxid Semiconductor Field Effect Transistor)*, verdrängen die konventionellen Thyristoren mehr und mehr aus vielen Anwendungsbereichen. Trotzdem bleibt diesen auch künftig ein respektable Einsatzbereich, da diese vor allem große Vorteile durch ihre erzielbaren Schaltleistungen aufweisen.

Die abschaltbaren Leistungshalbleiter der neuen Generation bieten noch eine Vielzahl weiterer Vorteile. Sie zeichnen sich besonders durch einfache und sichere Ansteuerbarkeit verbunden mit kleinen Schaltzeiten und folglich niedrigeren Schaltverlusten aus. Diese Eigenschaften beeinflussen Baugröße, Gewicht, Kosten und Wirkungsgrad der I- bzw. U-Umrichter. Mit höheren Taktfrequenzen sind auch geringere Motorverluste verbunden, so daß neben sinkenden Umrichterkosten auch eine geringe Steigerung des Wirkungsgrades des Gesamtsystems zu erwarten ist.

Der relativ geringe Energieverbrauch der Steuerelektronik und der Ventilatoren zur Kühlung des Leistungsteils wirkt sich wie die Verluste in der Zwischenkreiskapazität nur marginal auf den Umrichterwirkungsgrad aus und kann daher vernachlässigt werden /ZAE 4/.

Tabelle 5-1: Durchlaß- und Schaltverluste von Halbleiterventilen

	IGBT	MOSFET
mittl. Durchlaßverlustleistung $P_{V,D}$	$U_{CE0} \cdot I_m + R_{D, diff} \cdot I_{eff}^2$	$R_{D, diff} \cdot I_{eff}^2$
Schaltverlustleistung $P_{V,S}$	$U_{batt} \cdot I_m \cdot f_{schalt} \cdot (t_{rise} + t_{fall})$	$U_{batt} \cdot I_m \cdot f_{schalt} \cdot (t_{rise} + t_{fall})$

U_{CE0}	ideale Spannungsquelle ($\approx const.$)	U_{batt}	Batteriespannung
I_m	Strommittelwert durch das Ventil	f_{schalt}	Schaltfrequenz
I_{eff}	Stromeffektivwert durch das Ventil	t_{rise}	Stromanstiegszeit
$R_{D, diff}$	Durchlaßwiderstand (typabhängig)	t_{fall}	Stromabfallszeit ($\approx t_{rise}$)

5.3 Maßnahmen zur Steigerung der energetischen Effizienz

Wie generell bei jedem Optimierungsproblem gibt es auch bei der rationellen Kraftbedarfsdeckung einen deutlichen Zusammenhang von Aufwand und erzielbarem Ertrag in Abhängigkeit von der Spanne zwischen Istzustand und technisch Möglichem. Einsparmaßnahmen sind meist einfach, d.h. mit relativ geringem Aufwand an Investitionen sowie qualifizierten Fachkräften für Installation, Bedienung und Wartung realisierbar. Weitergehende Schritte erfordern dagegen einen bedeutend höheren Aufwand. Je komplexer die Anlagen werden, desto schwieriger ist es, sie richtig zu dimensionieren und sachgemäß einzusetzen. Schon durch eine falsche Anwendung kann durchaus einen Mehrverbrauch initiiert werden, falls grundlegende Sachverhalte nicht berücksichtigt werden.

Aussagen über die Maßnahmen zur Steigerung der energetischen Effizienz lassen sich i.allg. nur bei Betrachtung des Gesamtsystems Antrieb-Regelung-Arbeitsmaschine treffen. Bei Maßnahmen für einen rationellen Energieeinsatz sollte zur Erzielung eines möglichst hohen Nutzeffektes bei geringst möglichem Kapitaleinsatz generell die folgende Prioritätenliste eingehalten werden /ZAE 2/:

- Vermeidung von unnötigem Energieverbrauch
- Reduzierung des spezifischen Energieverbrauches
- Verbesserung der Wirkungsgrade
- Energierückgewinnung

5.3.1 Vermeidung von unnötigem Energieverbrauch

Hierunter sind Maßnahmen zu verstehen, die meist ohne großen finanziellen Aufwand zu einer Reduzierung des Energieverbrauches führen. Eine einfache Maßnahme ist beispielsweise die Anpassung der Betriebszeiten (Einschaltzeiten) der Antriebe an die tatsächliche Nutzung durch manuelles oder gesteuertes Abschalten. Durch das Vermeiden von unnötigem Leerbetriebsbedarf während der Pausenzeiten vermindert sich der Energieverbrauch.

Bei Anlagenbetreibern von elektrischen Antrieben wird häufig die Meinung vertreten, daß ein Durchlaufbetrieb von Antrieben günstiger wäre als das Abschalten der Antriebe in den Pausenzeiten. Dies ist jedoch in vielen Fällen unzutreffend und liegt in einer Überschätzung des Energieaufwandes für das Anfahren von elektrischen Antrieben begründet. Hierbei wird übersehen, daß die hohen Anlaufströme nur vergleichsweise kurze Zeiten anstehen.

In *Tabelle 5-2* ist beispielhaft für vierpolige Drehstrom-ASM unterschiedlicher Leistungsklassen die Anlaufarbeit dargestellt.

Tabelle 5-2: Anlaufarbeit und äquivalente Leerlaufzeit für vierpolige Drehstrom-ASM mit Kurzschlußläufer beim Anlauf ohne Belastung /ZAE 2/

Nennleistung [kW]	Anlaufarbeit [kWs]	Äquivalente Leerlaufzeit [s]
1,5	0,3	2,9
5,5	1,3	4,3
15	4,3	6,7
30	9,9	8,9
63	24,4	12,1
125	63,7	18,4

Die Anlaufarbeit beschreibt den Energieaufwand, der zur Beschleunigung der Maschine aus dem Stillstand bis zur Leerlaufdrehzahl notwendig ist. Hieraus läßt sich die äquivalente Leerlaufzeit ermitteln, nach der die Maschine im Leerlaufbetrieb die gleiche Energie wie für den Anlauf verbraucht hat. Kleine Motoren weisen sehr kurze äquivalente Leerlaufzeiten auf. Diese steigen zwar mit zunehmender Baugröße an, liegen jedoch selbst bei großen Antriebsleistungen noch im Sekundenbereich. Ein Abschalten des Antriebes in mehrminütigen Pausenzeiten ist daher in den meisten Fällen energetisch sinnvoll.

Für Antriebe, die unter Last anlaufen, vergrößern sich die äquivalenten Leerlaufzeiten. Ist das äußere Schwungmoment, das ein Antrieb zu beschleunigen hat, beispielsweise 10-mal so groß

wie das Motorschwungmoment, so verzehnfacht sich auch die äquivalente Leerlaufzeit aus Tabelle 5-2 für einen Anlauf unter Last. Die äquivalenten Leerlaufzeiten lassen sich relativ einfach aus der Leistungsaufnahme während des Anlaufes sowie im Leerlauf bestimmen.

Da in erster Linie bei Werkzeugmaschinen ein hoher Anteil der Leerlaufzeit an der effektiven Arbeitszeit auftritt, ist das Energieeinsparpotential durch das Abschalten teilweise erheblich. Es muß allerdings überprüft werden, ob seitens des Prozesses, in dem die Arbeitsmaschine eingebunden ist, Einschränkungen bestehen. Für Antriebe in der Präzisionsfertigung ist ein Abschalten in Pausenzeiten i.allg. nicht möglich, da infolge von thermischen Längenänderung der Arbeitsmaschine Fertigungsfehler auftreten können.

5.3.2 Reduzierung des spezifischen Energieverbrauches

Die Reduzierung des spezifischen Energieverbrauches ist generell möglich durch den

- Einsatz energiesparender Prozeßtechnologien oder die
- Optimierung des Prozeßablaufes.

Hierzu zählt beispielsweise das für das jeweilige Material des zu bearbeitenden Werkstückes passende, energetisch günstigste Fertigungsverfahren. Der spezifische Energieaufwand für eine bestimmte Aufgabe, z.B. die Zerspanung, wird darüber hinaus auch entscheidend von der Güte der eingesetzten Werkzeuge und deren Abnutzung beeinflusst. Der spezifische auf das zerspannte Volumen bezogene Energieverbrauch weist für verschiedene Fertigungsverfahren signifikante Unterschiede auf. Bei den mechanischen Fertigungsverfahren ist das Schleifen beispielsweise eines der energieaufwendigsten, das Drehen dagegen eines der energetisch günstigsten Arbeitsprozesse.

5.3.3 Verbesserung der Wirkungsgrade

Für den wirtschaftlichen Betrieb eines Elektromotors ist neben Gesichtspunkten wie Verfügbarkeit oder Wartungskosten der Wirkungsgrad des Antriebssystems von entscheidender Bedeutung. Bei energetischen Verbesserungen von technischen Anlagen stellt sich daher zwangsläufig die Frage nach konstruktiven Möglichkeiten zur Wirkungsgraderhöhung.

An der Entwicklung und Verbesserung von Drehstrommotoren wird bereits über 100 Jahre gearbeitet, Gleichstrommotoren kommen seit über 160 Jahren zum Einsatz. Folglich ist bei den elektrischen Antrieben heute schon ein relativ hoher Entwicklungsstand erreicht. Insbesondere große Motoren sind weitgehend optimiert, so daß hier keine entscheidenden Verbesserungen der Wirkungsgrade mehr zu erwarten sind. Die Wirkungsgrade liegen bei großen Antrieben bereits in einer Größenordnung von 95 bis 98 %. Bei Einbezug der Kosten für die Wirkungsgradverbesserung reduziert sich dieses Potential noch weiter, da immer ein Kompromiß zwi-

schen Energie- und Materialökonomie angestrebt werden muß bzw. die Herstellungskosten auf dem Absatzmarkt konkurrenzfähig sein müssen.

Auf folgenden Wegen ließe sich der Motorwirkungsgrad ggf. noch erhöhen:

- Optimierung der elektrischen Auslegung
- günstigste Auslegung der Ständer- und Läufernutgröße
- Wahl des günstigsten Nutenzahlverhältnisses
- Verbesserung der Blechqualität
- Erhöhung des Füllfaktors durch maschinelles Einziehen der Wicklung
- Minimierung der Wickelkopfausladung
- Optimierung des Luftspaltes
- Optimierung der Belüftung
- Verlustminimierte Magnetfelderzeugung (permanenterrregte Maschinen; $I_E = 0$)
- Einsatz neuer permanentmagnetischer Werkstoffe (seltene Erden)

Die o.g. Möglichkeiten sind jedoch bereits weitgehend ausgeschöpft. Eine weitere Wirkungsgradverbesserung ist nur zu erwarten, wenn entweder die aktiven Abmessungen vergrößert oder Bleche mit noch höherer Qualität eingesetzt werden. Beide Maßnahmen bedingen jedoch einen gegenwärtig nicht vertretbaren Aufwand. Weiterentwicklungen in der Motorentechnik durch verbesserte Lager etc. sowie eine regelmäßige Wartung führen bereits zu einer entscheidenden Reduzierung der Verluste. Eine Anpassung der Belastung auf die Wirkungsgradkennlinie des Motors bzw. Umrichters durch ein Getriebe ist ebenfalls denkbar. Mit der Entwicklung spezieller für den Umrichtereinsatz entwickelter Drehstrommaschinen werden noch geringfügig bessere Wirkungsgrade erreichbar sein.

Bei elektrischen Antrieben ist der Aufwand für eine Verbesserung des Wirkungsgrades beträchtlich. Als Beispiel sei hier die Erhöhung des Nennwirkungsgrades einer ASM mit 7,5 kW von 84 % auf 85 % genannt, die zu einem 25 % höheren Materialeinsatz und zu ca. 7 % höheren Herstellungskosten führt /ZAE 2/.

Die konstruktionstechnisch erzielten Wirkungsgradverbesserungen von Elektromotoren wurden in der Vergangenheit durch stetig steigende Anforderungen an die Antriebe wieder aufgehoben. In *Bild 5-1* ist beispielhaft der Nennwirkungsgrad über der Nennleistung für 4-polige Drehstrom-ASM im zeitlichen Vergleich für die Jahre 1978, 1986 und 1992 dargestellt. Hieraus wird ersichtlich, daß keine wesentlichen Wirkungsgradveränderungen innerhalb der letzten

15 Jahre aufgetreten sind. Dementsprechend gering werden auch die Verbesserungen in der Zukunft sein, da man sich schon relativ nahe an der Grenze des technisch Realisierbaren befindet. Eine energetische Verbesserung der Antriebe ist nur noch in begrenztem Maß möglich und wird spezifisch betrachtet immer teurer.

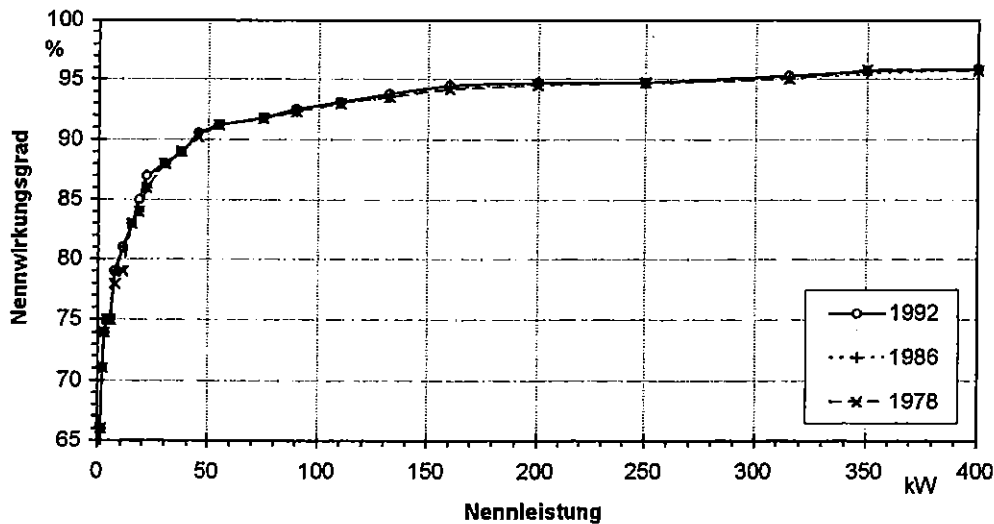


Bild 5-1: Nennwirkungsgrade von 4-poligen Drehstrom-ASM im zeitlichen Vergleich /ZAE 2/

Ein Ansatz in Richtung verbesserter Motorwirkungsgrade ist die Entwicklung von sog. Energiesparmotoren, die durch einen größeren Einsatz an Aktivmaterial einen deutlich besseren Wirkungsgrad als Normmotoren erreichen. Vor allem bei kleinen Leistungen im 100 Watt-Bereich lassen sich Wirkungsgradverbesserungen bis zu 10% erzielen. Bei Motoren mit Leistungen größer als 10 kW sind es dagegen nur noch 2 bis 3%. Nachteilig ist bei den Energiesparmotoren neben dem höheren Preis auch das höhere Gewicht und die größeren Abmessungen, wodurch sie nicht universell gegen die entsprechenden Normmotoren austauschbar sind. Daher werden Energiesparmotoren nie annähernd die Verbreitung von Normmotoren erreichen. Sie stellen daher auch keine Querschnittstechnik dar /ZAE 2/.

Der Systemwirkungsgrad einer technischen Anlage setzt sich aus den einzelnen Komponenteneffizienzen zusammen. Optimierungen an beliebiger Stelle der Wirkungsgradkette führen zu einer Verbesserung der Energieausnutzung des Gesamtsystems, also zu einem höheren Systemwirkungsgrad. Dieser kann jedoch maximal nur den Wert des schlechtesten Einzelwirkungsgrades erreichen. Aus diesem Grund und vor allem auch aus Kostengesichtspunkten ist es daher sinnvoll, zuerst die Anlagenteile mit den niedrigsten Wirkungsgraden hinsichtlich möglicher energetischer Verbesserungen zu analysieren. Zusätzliche Maßnahmen ermöglichen eine Steigerung des Motor- und Umrichterwirkungsgrades und somit eine Senkung des Energiebedarfs für eine Antriebsaufgabe. Viele dieser Maßnahmen lassen sich ohne oder mit nur geringen Kosten realisieren.

Optimierung des Gesamtsystems

In der Praxis sollte neben der Optimierung der Einzelkomponenten vor allem eine Optimierung des Gesamtsystems durchgeführt werden. Zur energetisch effizienten Durchführung einer Antriebsaufgabe ist eine optimale Anpassung von Arbeits- sowie Antriebsmaschine und ggf. der Regelung unter Berücksichtigung der wechselseitigen Beeinflussung, der speziellen Betriebs-eigenschaften sowie der Charakteristik der Antriebsaufgabe erforderlich. Vor einer Anpassung und Abstimmung der Einzelkomponenten sollten jedoch in der Regel Maßnahmen stehen, die einen optimalen Betrieb dieser Komponenten ermöglichen. Darunter fallen beispielsweise regelmäßige Wartungsarbeiten am Antriebssystem und vor allem an der Arbeitsmaschine.

Optimale Dimensionierung des Antriebssystems

Einen wesentlichen Einfluß auf den im praktischen Einsatz erzielbaren Wirkungsgrad hat die Dimensionierung des Antriebssystems. Untersuchungen haben gezeigt, daß eine Vielzahl der in Industriebetrieben eingesetzten elektrischen Antriebe überdimensioniert ist. Die Ursachen hierfür liegen zum einen in der Unkenntnis des genauen Lastspiels, zum anderen in einem übertriebenen Sicherheitsdenken hinsichtlich der Motorlebensdauer sowie Zuwachsüberlegungen begründet. Die Tendenz der Betreiber zur Überdimensionierung von Antrieben wird durch die Verkaufspolitik der Hersteller zusätzlich verstärkt.

Die energetischen Auswirkungen der optimalen Dimensionierung von elektrischen Antrieben sind aus dem Nenn- und Teillastwirkungsgradverlauf über der Auslastung elektrischer Antriebe ersichtlich. Da der Nennwirkungsgrad mit der Baugröße bzw. Leistungsklasse ansteigt, könnte dies zur Auswahl eines möglichst großen Antriebssystems verleiten. Die damit verbundene Überdimensionierung führt i.allg. wegen der ungünstigen Teillastwirkungsgrade zu einem Energiemehrverbrauch. Eine Motordimensionierung ist deshalb sowohl unter Berücksichtigung der maximal erforderlichen Motorleistung als auch unter Einbezug der zu erwartenden Auslastung durchzuführen.

Die richtige Dimensionierung von Antrieben birgt demnach ein großes Energieeinsparpotential. Bei einer Motorenauswahl spielen jedoch im wesentlichen Aspekte wie Anschaffungs-, Wartungskosten, Verfügbarkeit, Regeleigenschaften, Service des Herstellers etc. eine Rolle. Dagegen sind die Energiekosten bei der Entscheidung eher von untergeordneter Bedeutung. Ein Austausch überdimensionierter, technisch funktionsfähiger Antriebe, mit dem Ziel eines rationalen Energieeinsatzes, wird auch in den seltensten Fällen wirtschaftlich sein. Aus diesem Grund sollten für überdimensionierte Antriebe und für solche mit stark schwankender Last geeignete Regelverfahren zum Einsatz kommen. Aufgrund des relativ geringen Energiekostenanteils eines Produkts und des hohen Investitionsaufwands werden solche Regelverfahren im wesentlichen nur eingesetzt, wenn gleichzeitig Verfahrensvorteile damit verbunden sind.

Einsatz drehzahlregelbarer Antriebe

Eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades für eine bestimmte Antriebsaufgabe kann u.U. durch den Einsatz drehzahlregelbarer Antriebe vor allem im Teillastbereich erzielt werden. Dies gilt für Antriebe von Arbeitsmaschinen, die eine variabel abzugebende Leistung liefern müssen. Einsatzbereiche von drehzahlgeregelten Antrieben sind beispielsweise Pumpen mit unterschiedlichem Mengendurchsatz oder Werkzeugmaschinen, die ein konstantes Drehmoment bei unterschiedlichen Drehzahlen liefern sollen. Durch die Drehzahlregelung wird dem Antrieb abgesehen von den betriebsbedingten Verlusten nur die Energiemenge zugeführt, die für die entsprechende Aufgabe in der Arbeitsmaschine tatsächlich benötigt wird. Die Regelung erfolgt relativ verlustarm auf der elektrischen Seite und nicht wie bei vielen anderen Regelverfahren durch Abregeln von mechanischer bzw. hydraulischer Energie an der Arbeitsmaschine. Bei etwa 75 % aller industriellen Antriebsaufgaben mit Antrieben größer als 10 kW wäre nach /ZAE 2/ eine variable abzugebende Leistung erforderlich.

Falls der Antrieb überwiegend im Bereich der Nennlast betrieben wird, kann dies gegenüber unregulierten Antrieben aufgrund der Verluste der Stellglieder jedoch zu einem Mehrverbrauch an elektrischer Energie führen. Während z.B. durch Umstellung einer Pumpenanlage von Drossel- auf Drehzahlregelung mittels eines Umrichters bis zu 50 % an elektrischer Energie eingespart werden kann /ZAE 2/, ist das gesamte Potential bei industriellen Drehstromantrieben wesentlich geringer einzuschätzen. Eine Umrüstung vorhandener Antriebe aus Gründen der Energieeinsparung wird im wesentlichen nur bei Antriebsleistungen größer als 10 kW realisiert werden. Ausschlaggebend hierfür sind vor allem Kosteneinsparungen und zusätzliche Verfahrensvorteile. Bei Neuanlagen sollte der Anwender, wo sinnvoll und erforderlich, den drehzahlgeregelten Antrieb bevorzugen.

Rund 95 % aller Gleichstromantriebe wurden bereits 1985 über Stromrichter drehzahlregelt /ZAE 2/. Daher haben sich sowohl Anschaffungskosten als auch Bauvolumen heutiger Stromrichter schon entscheidend vermindert. Der Einsatz von Frequenzumrichtern zur Drehzahlregelung von Drehfeldantrieben ist dagegen noch mit einem erheblichen, nicht ausgeschöpften Energieeinsparpotential verbunden. Ein wichtiges Entscheidungskriterium ist hierbei der Anschaffungspreis, der sich in der Zukunft noch deutlich reduzieren dürfte. Drehzahlgeregelte Antriebe kommen heute überwiegend aufgrund der Verfahrenstechnik zum Einsatz, d.h. daß energetische Überlegungen hierbei eher zweitrangig sind. Eine Beurteilung des energetischen Betriebsverhaltens von geregelten und ungeregelten Antrieben erfordert immer die Kenntnis des Lastspiels und eine detaillierte Analyse des aus Antrieb, Regelung und Arbeitsmaschine bestehenden Gesamtsystems.

Die Drehzahlregelung von GSM ist durch Verstellen der Ankerspannung möglich. Wurde dies früher durch variable Vorwiderstände oder Leonardumformer erreicht, so werden hierfür heut-

zutage überwiegend Stromrichter oder Gleichstromsteller eingesetzt. In der Industrie werden GSM meist durch *netzgeführte Stromrichter* geregelt, die unmittelbar aus der Netzspannung eine variable Gleichspannung liefern. Für Leistungen bis etwa 10 kW werden Zweipulsbrückenschaltungen zum Anschluß an das Wechselstromnetz angeboten. Ein Vierquadrantenbetrieb wird durch Antiparallelschalten zweier Brücken realisiert. Sechspulsbrückenschaltungen ermöglichen einen Betrieb am Drehstromnetz und kommen für Leistungen bis über 1 MW zum Einsatz. Auch hier ist ein Vierquadrantenbetrieb durch Antiparallelschaltung möglich.

Eine weitere Methode, eine GSM drehzahlregelt zu fahren, bietet die *Gleichstromstellertechnik*. Hierbei wird nicht wie beim netzgeführten Stromrichter aus der Wechsel- oder Drehspannung des Netzes eine veränderliche Gleichspannung erzeugt, sondern die Gleichspannung eines vorhandenen Gleichstromnetzes variiert. Da in den meisten Fällen kein Gleichstromnetz zur Verfügung steht, wird im folgenden die universell einsetzbare Technik des netzgeführten Stromrichters näher erläutert.

Der Betrieb mit einer Stromrichterregelung ist wegen der auftretenden Oberschwingungen nicht ganz unproblematisch. Die Auslegung und der Betrieb einer GSM werden dadurch ganz entscheidend mitbestimmt. Die Ausgangsspannung eines Stromrichters enthält Wechselanteile, die dem Gleichspannungsmittelwert überlagert sind. Die Ordnungszahlen und Frequenzen der Oberschwingungen sind von der Pulszahl der Stromrichterschaltung abhängig, die Amplituden der Oberschwingungen zusätzlich auch von der Aussteuerung und der Belastung. Die Oberschwingungen der Gleichspannung führen dazu, daß auch dem Mittelwert des Ankerstromes, der maßgebend für das Drehmoment ist, ein Wechselanteil überlagert wird. Die Höhe dieser Wechselanteile sind durch die Induktivität des Ankers und eventueller Glättungsdröseln vorgegeben. Der Ankerstrom kann bei geringer Belastung oder fehlender Glättungsinduktivität sogar kurzzeitig Null werden.

Durch die Wechselanteile des Ankerstromes wird der für das Drehmoment ausschlaggebende Mittelwert des Ankerstromes nicht verändert. Es erhöhen sich aber der Effektivwert des Ankerstromes und damit die Stromwärmeverluste. Diese dürfen jedoch wegen der maximal zulässigen Erwärmung der Maschine einen bestimmten Wert nicht übersteigen.

Dem aus dem Mittelwert des Ankerstromes berechneten Drehmoment überlagern sich noch sog. Pendelmomente. Die durch die Oberschwingungen des Ankerstromes erzeugten Wechselmomente pendeln um den Momentenmittelwert und leisten keinen Beitrag zum nutzbaren Moment. Sie können jedoch Anlaß zu beachtlichen mechanischen Schwingungen, d.h. einer entsprechenden Laufunruhe sein. Bei der Auslegung eines Antriebs muß darauf geachtet werden, daß die Resonanzfrequenzen von Antrieb und Arbeitsmaschine nicht im Bereich von auftretenden Oberschwingungen der Maschine liegen.

In der klassischen Bauweise ist der Jochring von GSM aus massivem Eisen gefertigt. Falls der Ankerstrom einen Wechselanteil besitzt, werden dadurch im Jochring Wirbelströme induziert, die zusätzliche Verluste verursachen und negative Rückwirkungen auf den Feldverlauf haben. Darüber hinaus können Probleme bei der Stromwendung entstehen. Abhilfe bietet hier ein vollständig geblechter Motor. Bei Motoren mit massivem Jochring kann durch das Vorschalten von Glättungsdrosseln der Oberschwingungsgehalt auf einen zulässigen Wert reduziert werden, wobei sich die Stromwärmeverluste verringern /ZAE 2/.

Wachsende Bedeutung in der Antriebstechnik kommt vor allem der drehzahlregelbaren Asynchronmaschine zu. Gerade der Käfigläufermotor verdrängt in Kombination mit Frequenzumrichtern zunehmend die stromrichtergespeiste GSM und stellt daher eine klassische Lösung für drehzahlregelbare Antriebe dar. Statische Umrichter weisen gegenüber rotierenden Umformer erhebliche Vorteile auf, wie z.B. höhere Wirkungsgrade, geringerer Platzbedarf, wartungs- und geräuscharmer Betrieb sowie hohe Regeldynamik. Daher wurden rotierende Umformer nahezu gänzlich verdrängt. Ein Umrichterbetrieb von Drehstrommotoren ist i.allg. ohne Veränderungen am Antrieb möglich. Wegen der Stromwelligkeit ist jedoch mit zusätzlichen Verlusten zu rechnen, die eine Reduzierung der maximal zulässigen Dauerleistung erfordern.

Die Ausgangsspannungen und -ströme von Frequenzrichtern sind, abhängig vom physikalischen Grundprinzip, mehr oder weniger stark Oberschwingungsbehaftet. Die Oberschwingungen haben negative Rückwirkungen auf den Antrieb und führen zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades. Bei der Beurteilung des energetischen Verhaltens eines drehzahlgeregelten Antriebes genügt es deshalb nicht, die Wirkungsgrade der Einzelkomponenten zu multiplizieren. Vielmehr muß das Gesamtsystem Antrieb-Frequenzumrichter analysiert werden, wobei auch die Charakteristik der Arbeitsmaschine einen entscheidenden Einfluß auf den Wirkungsgradverlauf hat. Bei U-Umrichtern mit variabler Zwischenkreisspannung tritt eine starke Abweichung des Spannungs- und Stromverlaufs von der Sinusform auf. Daher müssen erhöhte Stromwärmeverluste, Geräuschbildung und mechanische Schwingungen in Kauf genommen werden. Aufgrund des hohen Oberschwingungsanteils darf der Motor nicht mit seiner Nennleistung belastet werden. Die Hersteller geben eine Leistungsreduzierung des Motors von bis zu 20 % an. I-Umrichter weisen geringere Oberschwingungsanteile auf, so daß hier i.allg. eine Reduktion der Motornennleistung um 10 % ausreicht. U-Umrichter mit konstanter Zwischenkreisspannung (Pulsumrichter) liefern am ehesten sinusförmige Stromverläufe.

Während ein Betrieb mit Pulsumrichtern in den meisten Fällen unproblematisch ist, sollte beim Einsatz anderer Umrichtertypen wegen der auftretenden Oberschwingungen u.U. eine spezielle Motorenauslegung zur Reduzierung mechanischer Schwingungen, Geräusche und Zusatzverluste erfolgen. Aufgrund der erhöhten Verluste wird bei Kurzschlußläufer-Normmotoren entweder die Abgabeleistung reduziert oder ein Motor der nächst höheren Baugröße eingesetzt.

Einsatz einer Stern-Dreieck-Umschaltung

Die Stern-Dreieck-Umschaltung (vgl. Kapitel 3.1) kommt überwiegend bei Drehstrom-ASM kleiner Leistungen zur Anwendung und bietet neben der Verbesserung des Anlaufverhaltens die Möglichkeit, überdimensionierte Antriebe besser an die gewünschte Antriebsaufgabe anzupassen, d.h. eine Verbesserung der Teillastwirkungsgrade zu erzielen. Diese Maßnahme ist in erster Linie für solche Antriebe interessant, die zeitweise unter 30% der Nennleistung ausgelastet sind.

Für überdimensionierte Antriebe und bei Arbeitsmaschinen mit großen Lastsprüngen bietet die Umschaltung von Dreieck- auf Sternbetrieb eine Möglichkeit zur Energieeinsparung, die nahezu ohne finanziellen Aufwand durchführbar ist. Nachteilhaft ist die nur zweistufige Leistungsstellung mit einem sehr großen Leistungssprung von 100 auf 30%. Eine Umschaltung zwischen den beiden Betriebsarten ist nur unter der Voraussetzung möglich, daß die Ständerwicklung bezüglich ihrer Isolation für die verkettete Spannung ausgelegt ist, die Wicklungsenden frei zugänglich sind und der Arbeitsprozeß Momentensprünge zuläßt.

In *Bild 5-3* sind beispielhaft die energetischen Vorteile der Sternschaltung im Bereich kleiner Wellenleistungen im Vergleich zur Dreieckschaltung aufgezeigt. Unter Ansatz eines Lastspiels können daraus die energetischen Einsparungen abgeleitet werden.

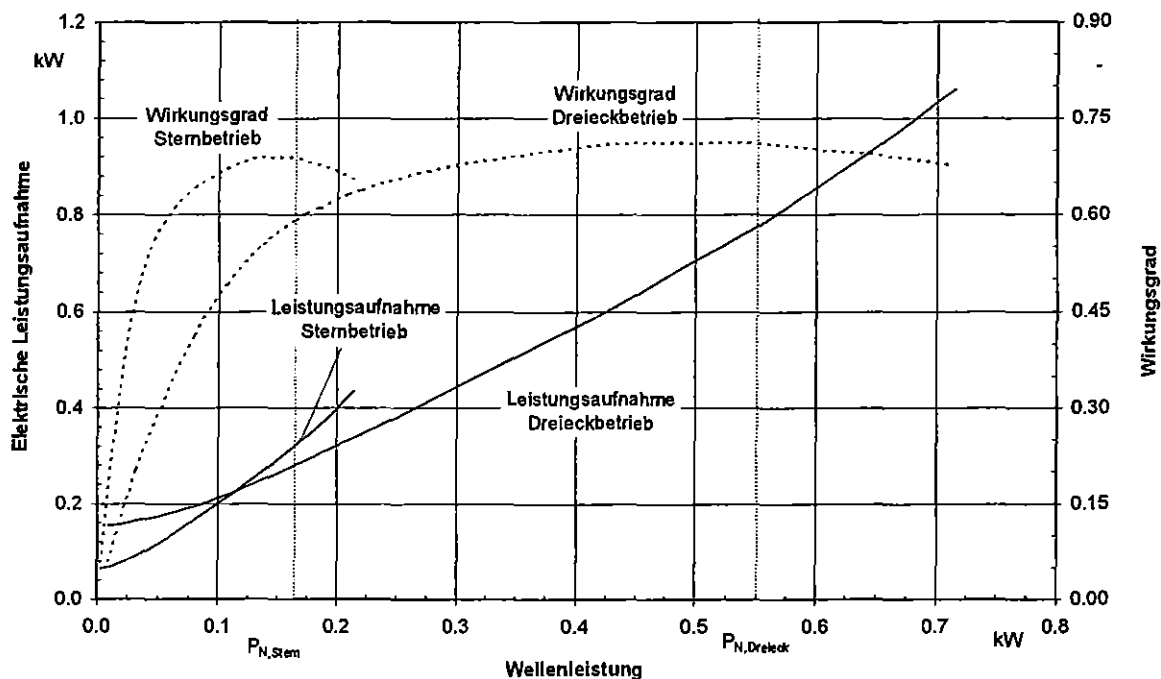


Bild 5-3: Energetischer Vergleich von Stern- und Dreieckschaltung einer vierpoligen ASM
/ZAE 2/

Da die vom Motor aufgenommene Leistung proportional zum Quadrat der Klemmenspannung ist, wird der Motor elektrisch auf ein Drittel seiner ursprünglichen Leistung verkleinert. Die mechanische Nennleistung verringert sich im Sternbetrieb nach Herstellerangaben auf 30 % der Nennleistung im Dreiecksbetrieb. Leistungsfaktor und Wirkungsgrad müßten daher theoretisch einen um den Faktor 3 gestauchten Verlauf über der abgegebenen Leistung aufweisen. Da jedoch Ventilations- und Reibungsverluste ungefähr konstant bleiben und somit bei dieser Betriebsweise stärker ins Gewicht fallen, liegen die gemessenen Verläufe etwas niedriger /ZAE 2/.

5.3.4 Energierückgewinnung

Vor der Möglichkeit, nicht benötigte mechanische oder hydraulische bzw. als Verlustwärme anfallende thermische Energie nutzbar zu verwerten, sollten soweit als möglich die oben genannten Mittel eines rationellen Energieeinsatzes ausgeschöpft werden. Erst dann erscheint die im Gegensatz zur Einsparung von elektrischer Energie verlustbehaftete Energierückgewinnung sinnvoll. Heute realisierte Verfahren der Energierückgewinnung bei elektrischen Antrieben sind im wesentlichen die Nutstrombremsung (Rekuperation) und wesentlich seltener auch die Läuferückspeisung bei Drehstrom-ASM mit Schleifringläufer.

Weitere Möglichkeiten zur Reduzierung des Energieverbrauches liegen in der Entwicklung neuer Wirkprinzipien bei elektrischen Antrieben. Während bei den Grundprinzipien keine neuen Entwicklungen zu erwarten sind, lassen sich bei der technischen Realisierung immer noch Fortschritte feststellen /ZAE 2/:

- Kombination verschiedener Wirkprinzipien (z.B. Reluktanzmaschine).
- Besondere Wicklungsauslegung und Anordnung (z.B. Magnetmotor).
- Besondere Ausführung des magnetischen Kreises bzw. der Pole (z.B. Schrittmotor).
- Zusätzliche äußere Beschaltung mit passiven oder aktiven Elementen.
- Verringerung des Oberschwingungsgehaltes von Strom und Spannung durch entsprechende Umrichterschaltungen.
- Spezielle Auslegung der elektrischen Maschinen in Richtung hohes Drehmoment, langsamlaufend oder geringes Moment, schnelllaufend.

Zur Erzielung der gewünschten Drehmoment-Drehzahl-Verhältnisse ist bei vielen Antriebsaufgaben der Einsatz von Getrieben unerlässlich. Für diese Anwendungen kann durch Berücksichtigung der Getriebeverluste bei der Getriebeauswahl der Energieverbrauch z.T. deutlich reduziert werden.

Getriebe dienen zum Übertragen und Wandeln von Drehmomenten und Drehzahlen. Durch die Auswahl energetisch günstiger Getriebe kann u.U. der vorangeschaltete Antrieb und ggf. auch der Frequenzumrichter kleiner dimensioniert werden, so daß zusätzlich deutlich niedrigere Investitionskosten für das Gesamtsystem anfallen.

Bei Arbeitsmaschinen mit niedrigen Drehzahlen und hohen Betriebsmomenten kommen häufig Getriebemotoren zum Einsatz. Getriebemotoren werden beispielsweise als Antriebseinheit von Förderschnecken, Transportbändern, Preß-, Stanzmaschinen und langsam drehenden Kolbenmaschinen eingesetzt. Bei Getriebemotoren bis 50 kW wird der Motor häufig direkt an das Getriebe angeflanscht, wogegen bei größeren Einheiten meist eine getrennte Aufstellung erfolgt. Getriebemotoren werden vor allem bei Transportbändern und Förderanlagen meist von 0,4 bis 4 kW in großer Stückzahl eingesetzt. Für Getriebeübersetzungen größer als 10 werden trotz der schlechteren energetischen Effizienz häufig Schneckenradgetriebe eingesetzt.

Die energetische Effizienz von Getriebemotoren ist entscheidend vom Wirkungsgrad des eingesetzten Getriebes abhängig. Der Betriebswirkungsgrad des Stirnradgetriebes liegt bei ca. 95 %, der des Schneckenradgetriebes bei ca. 73 %. Durch den günstigeren Wirkungsgrad von Stirnradgetrieben gegenüber Schneckenradgetrieben können häufig kleinere und daher kostengünstigere Normmotoren für die Kombination mit Stirnradgetrieben eingesetzt werden. Daraus ergibt sich auch, daß bei drehzahleregelten Antrieben von Stirnradgetriebemotoren im allgemeinen kleinere Umrichter als bei Schneckenradgetriebemotoren eingesetzt werden können, wodurch sich die Investitionen zusätzlich verringern können.

6 Datenblatt

Anhand einer Markt- und Herstelleranalyse wurden für die unterschiedlichen Antriebskonzepte die wichtigsten technischen Kenngrößen, wie beispielsweise Wirkungsgrad, Leistungsfaktor oder Investitionen ermittelt und in Datenblättern zusammengestellt. Diese Kenndaten bilden die Basis für eine Quantifizierung von Energie- und Kosteneinsparmöglichkeiten und liefern darüber hinaus Anhaltswerte für eine energetisch optimale Dimensionierung, geeignete Einsatzbereiche und eine günstige Betriebsweise. Wegen der großen Verbreitung der Asynchronmaschine stellt dieser Maschinentyp in den Datenblättern einen deutlichen Schwerpunkt dar. Neben den Nennbetriebsdaten konnten auch Aussagen zum Teillastverhalten getroffen werden.

In den Datenblättern sind die für den Anwender relevanten Daten in übersichtlicher Form zusammengestellt. Die Datenblätter sind für alle betrachteten Motoren bzw. Umrichter identisch aufgebaut, um einen Vergleich zwischen verschiedenen technischen Realisierungsmöglichkeiten für eine gegebene Antriebsaufgabe zu ermöglichen.

Die Datenblätter der Motoren sind nach ihrer Bauart untergliedert in:

- Asynchronmaschinen mit Käfigläufer
- Gleichstrommaschinen
- Synchronmaschinen

Innerhalb einer Motorenbauart wird nach Leistungs- und Drehzahlbereich unterschieden.

Bei den Umrichtern wurde zwischen Spannungswischenkreisumrichtern (in Transistor- und GTO-Pulstechnik) und Stromwischenkreisumrichter für ASM und SM sowie Stromrichter für GSM (in Hybridtechnik und mit Mikroprozessor) unterschieden. Hierbei wurde eine Einteilung nach verschiedenen Anschlußspannungen vorgenommen.

Zwischen dem Motor- und dem Umrichterdatenblatt bestehen auch Querverbindungen, z.B. zur Bestimmung des Wirkungsgrades des Gesamtsystems Motor/Umrichter (vgl. Kapitel 6.3).

Auf jedem Datenblatt sind die Werte für drei verschiedene Motoren- bzw. Umrichterbaugrößen angegeben. Während die Spalte *gewählt* einen Motor aus der Mitte des betrachteten Leistungsspektrums repräsentiert, grenzen die Daten in den Spalten *minimal* bzw. *maximal* den Leistungsbereich nach unten bzw. oben ab. Die Daten einer im Datenblatt nicht explizit aufgeführten Maschine liegen innerhalb dieser Grenzen. Falls eine Interpolation möglich und sinnvoll ist, wird an der betreffenden Stelle darauf hingewiesen (vgl. Kapitel 8).

Die *Güte* beschreibt die Datenqualität und wird in folgende drei Güteklassen eingegliedert:

- Güteklasse 1: Meßwerte
- Güteklasse 2: Literaturwerte und Herstellerangaben
- Güteklasse 3: geschätzte Werte

Sind zu bestimmten Punkten des Datenblattes ergänzende Informationen nötig oder hilfreich, so sind diese in der Kommentarspalte angegeben.

Mit Hilfe der Datenblätter hat der Anwender die Möglichkeit, sich einen schnellen Überblick über die vorhandenen Techniken zu verschaffen und eine vergleichende Wertung verschiedener Technikvarianten vorzunehmen. Der Aufbau der Datenblätter sowie deren Gebrauch werden im folgenden dargestellt.

6.1 Datenblatt „Motor“

Das Datenblatt *Motor* ist folgendermaßen gegliedert:

- Allgemeine Angaben
- Motorkenndaten
- Konstruktionsdaten
- Betriebsdaten
- Ökonomische Daten
- Umrichterbetrieb

6.1.1 Allgemeine Angaben

Das deutsche Regelwerk für elektrische Maschinen und Transformatoren ist in speziellen VDE-Bestimmungen und DIN-Normen zusammengefaßt. Die wichtigsten Normen und Vorschriften für rotierende elektrische Maschinen finden sich in /VDE 0530/.

Die Bezeichnung des Maschinentyps bezieht sich lediglich auf das Funktionsprinzip des magnetisch aktiven Teils des Elektromotors. Konstruktionstechnisch bestehen jedoch eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Anordnung der Lager, Ausführung der Gehäusebefestigung, Betriebslage etc., die in der Bauform definiert werden.

Festlegungen zu Bauform und Aufstellungsart elektrischer Maschinen sind in /DIN 42950/ bzw. in der internationalen Norm /DIN IEC 34 Teil 7/ zu finden.

Elektrische Maschinen werden, von Sonderanfertigungen abgesehen, nach einer Reihe von genormten Baugrößen hergestellt. Die Kennzeichnung erfolgt gemäß /DIN 747/ in Abhängig-

keit von der Achshöhe. Für Drehstrom-ASM wurde eine IEC-Normmotorenreihe auf Basis der Achshöhe geschaffen.

In /DIN 42672/ und /DIN 42679/ sind jeder Achshöhe die Anbaumaße und abhängig von der Drehzahl auch die Nennleistung verbindlich zugeordnet. Unterschiedliche Leistungen bei gleicher Achshöhe ergeben sich durch Verändern der Blechpaketlänge, was durch den Zusatz *S* (short), *M* (medium) oder *L* (long) kenntlich gemacht wird. Durch die Normung wurde zumindest für das Gebiet der Europäischen Union die volle Austauschbarkeit von Motoren unterschiedlicher Hersteller erreicht. Darüber hinaus wird die Konstruktion von Anlagen mit elektrischen Antrieben durch die genaue Festlegung von Platzbedarf und Einbaubedingungen erheblich vereinfacht /ZAE 2/.

Die im Datenblatt aufgeführten *Allgemeinen Angaben* erlauben eine schnelle Identifikation des Motors hinsichtlich seiner Bauart sowie dem geltenden Statusjahr.

- **Motorart:**

Asynchronmaschine, Synchronmaschine oder Gleichstrommaschine mit Netzanschlußbezeichnung.

- **Standardauslegung der Ständerwicklung:**

Stern- oder Dreieckverschaltung.

- **Isolierstoffklasse:**

Die Isolierstoffklasse kennzeichnet die thermische Belastbarkeit eines Motors. Bei Ausnutzung nach Klasse B darf die Grenzüber Temperatur der isolierten Wicklungen nicht mehr als 80 K, bei Isolierstoffklasse F nicht mehr als 105 K betragen.

- **Schutzart:**

Die Schutzart wird durch das Kurzzeichen IP gekennzeichnet (vgl. Kapitel 2.3).

- **Kühlart:**

Die Kühlart wird durch das Kurzzeichen IC gekennzeichnet (vgl. Kapitel 2.4).

- **Polpaarzahl *p*:**

Anzahl der Polpaare in der Maschine.

- **Statusjahr:**

Jahr, für das die Motordaten gelten.

6.1.2 Motorkenndaten

Die *Motorkenndaten* fassen im Datenblatt die wesentlichen mechanischen und elektrischen Kenndaten des Motors zusammen.

- **Nennleistung P_N :**
Mechanische Wellenleistung, die im Nennpunkt des Motors bei Dauerbetrieb (Betriebsart S1) an der Welle abgegeben wird.
- **Nenn Drehzahl n_N :**
Drehzahl, die der Motor bei Nennmoment erreicht.
- **Anschlußspannung:**
Nennspannung, mit der der Motor betrieben werden kann. Bei GSM entspricht die Anschlußspannung der Ankernennspannung.
- **Nennstrom I_N bei Anschlußspannung:**
Strom, der im Nennpunkt bei angegebener Anschlußspannung aufgenommen wird.
- **Nennmoment M_N :**
Moment, das der Motor an der Motorwelle bei P_N und n_N liefert.
- **Anlaufmoment M_A :**
Moment, das der Motor im Stillstand liefert.
- **Maximales Moment M_{max} :**
Maximales Moment, das an der Welle abgegeben werden kann, aber nicht unbedingt einen stabilen Betrieb der Maschine gewährleistet. Bei Drehfeldmaschinen entspricht M_{max} dem Kippmoment M_K .
- **Anlaufstrom I_A :**
Strom, der sich beim Anlaufen des Motors einstellt. Bei direktem Einschalten tritt in den Ständerwicklungen des Motors ein unter Umständen sehr hoher Anlaufstrom auf, der ein Mehrfaches des Nennstromes betragen kann. Eine Strombegrenzung ist u.a. durch Stern-Dreieck-Anlauf oder durch Umrichterspeisung der Maschine möglich.
- **Überlastbarkeit:**
Die Überlastbarkeit gibt an, um wieviel Prozent der Motor bei U_N und f_N kurzzeitig mit einem höheren Drehmoment M_{max} als M_N ($\sim I_N$) belastet werden kann.
- **Maximale Überlastdauer t_{max} :**
Zeitdauer, in der noch keine Wicklungs- bzw. Halbleiterschäden bei Überlastung auftreten. Die zulässige Überlastdauer ist vom Ausgangsstrom des Umrichters abhängig.

- **Maximale Motordrehzahl n_{\max} :**

Maximal mögliche Drehzahl, die im Feldschwächbetrieb erreicht werden kann. Hierbei treten noch keine mechanischen Schäden am Rotor und in den Lagern auf.

- **Mechanische Grenzleistung P_{\max} :**

Leistung, die dem Motor maximal abzuverlangen ist (bei den Betriebsarten S2, S3, S6). Der Bereich der mechanischen Grenzleistung ist nach /SAG/ für die ASM wie folgt definiert:

$$P_{\max} \leq \frac{M_k}{M_N} \cdot \frac{P_N}{1,76} \quad (15 \text{ s bei } U_N \text{ und } f_N) \quad (6-1)$$

6.1.3 Konstruktionsdaten

Die *Konstruktionsdaten* im Datenblatt beziehen sich auf die Gestaltung der Maschine und ändern sich bis auf wenige Ausnahmen nicht mit den Lastzuständen der Maschine.

- **Masse m :**

Gewicht des Motors, das im wesentlichen vom Gehäusematerial und von der Nennleistung abhängig ist.

- **Leistungsgewicht:**

Verhältnis von Motorgewicht m zur Nennleistung P_N .

- **Trägheitsmoment J :**

Das Trägheitsmoment des Rotors wird durch dessen Masse und Geometrie bestimmt und beeinflusst mit dem Trägheitsmoment der Arbeitsmaschine die Dynamik des Systems.

- **Schalleistung:**

Die Schalleistung ist eine von der Entfernung zur Schallquelle unabhängige Größe, die es erlaubt, Maschinen unterschiedlicher Größe und Form miteinander zu vergleichen.

6.1.4 Betriebsdaten

Die *Betriebsdaten* beschreiben im Datenblatt den Betrieb der ASM und SM am Drehspannungsnetz bzw. der Gleichstrommaschine am Gleichspannungsnetz.

Bei den Betriebsdaten ist der Wirkungsgrad und der Leistungsfaktor (entfällt bei GSM) bei verschiedenen Lastzuständen P/P_N angegeben.

Ist die Standardausführung der Ständerwicklung die Dreieckschaltung, so sind für die Umschaltung von Dreieck auf Stern weitere Teillastpunkte angegeben, wobei sich die Teillastpunkte bei Umschalten *Dreieck* \rightarrow *Stern* auf die Nennleistung in Dreieckschaltung beziehen.

6.1.5 Ökonomische Daten

Die *Ökonomischen Daten* enthalten im Datenblatt die Maschinenpreise bezogen auf den Geldwert von 1989. Die Mehrwertsteuer und Rabatte sind nicht beinhaltet. Um die ökonomischen Daten bezogen auf den Geldwert von 1995 zu erhalten, müssen die in den Datenblättern angegebenen Preise mit dem Faktor 1,22 multipliziert werden.

- **Investitionen:**

Kaufpreis der Maschine gemäß Listenpreis. Hierbei ist zu beachten, daß je nach Technik teilweise erhebliche Rabatte gewährt werden (siehe Rabatte in den Datenblättern).

- **Spezifische Investitionen:**

Investitionen, bezogen auf die Nennleistung P_N .

- **Preiszuschlag für Zündschutzart *erhöhte Sicherheit*:**

Mehrkosten, bezogen auf die Investitionen, die für einen Elektromotor der Zündschutzart *erhöhte Sicherheit* im Vergleich zu einer normalen Zündschutzart anfallen.

Die Preiszuschläge dürfen nur als Richtwerte verstanden werden, da bei Ausführung in dieser Zündschutzart die Nennleistungen teilweise von denen der normalen Schutzart abweichen und somit die Motoren eine etwas größere bzw. kleinere Nennleistung aufweisen.

- **Preiszuschlag für Zündschutzart *druckfeste Kapselung*:**

Mehrkosten, bezogen auf die Investitionen, die für einen Elektromotor der Zündschutzart *druckfeste Kapselung* im Vergleich zu einer normalen Zündschutzart anfallen.

- **Montage und Inbetriebnahmekosten:**

Kosten, bezogen auf die Investitionen, die für die Motorinstallation am Betriebsort anfallen.

- **Beseitigungskosten:**

Kosten, bezogen auf die Investitionen, die bei der Demontage und Verschrottung des Motors anfallen.

- **Wartungs- und Instandhaltungskosten:**

Kosten inklusive anteilmäßig umgerechneter Lagerwechselkosten, die jährlich für routinemäßig durchzuführende Wartungsarbeiten anfallen.

- **Technische Lebensdauer:**

Durchschnittlich zu erwartende Lebensdauer des Motors bei regelmäßiger Wartung. Sie ist, abgesehen von betriebsbedingten Abnutzungen der Lager oder Bürsten, gleich der Lebensdauer der Wicklungsisolation des Motors.

- **Ökonomische Lebensdauer:**

Zeitdauer, nach dem der Motor vollständig abgeschrieben ist.

Die Listenpreise für elektrische Maschinen liegen teilweise erheblich über den tatsächlich bezahlten Preisen. Es ist in etwa mit den in *Tabelle 6-1* angegebenen Preisnachlässen zu rechnen, die jedoch entscheidend von der Stückzahl abhängen.

Tabelle 6-1: Preisnachlässe bei elektrischen Maschinen

Bauart	Rabattbereich [% des Listenpreises]
Käfigläufer-ASM (Niederspannung)	60 - 70
Käfigläufer-ASM (Hochspannung)	0
Synchronmaschine	20
Gleichstrommaschine	25

6.1.6 Umrichterbetrieb

Unter *Umrichterbetrieb* sind für zwei verschiedene Umrichterarten jeweils die entsprechend abgeänderten energetischen Motordaten angegeben. Die Unterscheidung nach zwei Umrichtertechniken war nötig, da die ggf. erforderlichen Leistungsreduktionen und der Wirkungsgrad des am Umrichter betriebenen Motors vom eingesetzten Umrichtertyp abhängen.

In den Abschnitten *Umrichterbetrieb 1* und *Umrichterbetrieb 2* wird jeweils nach den beiden Lastfällen *Strömungsmaschinen-Betrieb* und *Konstant-Moment-Betrieb* unterschieden. Da der Motor im Umrichterbetrieb im allgemeinen in seiner Leistung reduziert werden muß, ist hier die reduzierte Motorleistung im Umrichterbetrieb angegeben, die kleiner oder gleich der Nennleistung bei Netzbetrieb ist.

Da die maximal erreichbare Leistung neben dem verwendeten Umrichtertyp auch vom Drehzahlstellbereich abhängt, ist die reduzierte Leistung jeweils für den Drehzahlstellbereich 1:3 angegeben. Die reduzierte Leistung ist für andere Drehzahlstellbereiche im Datenblatt „Umrichter“ enthalten. Das Moment ist in gleicher Weise zu reduzieren; das reduzierte Nennmoment ist angegeben. Die Nenndrehzahl ändert sich nicht. Die Wirkungsgrade sind für einige ausgesuchte Drehzahlverhältnisse bezogen auf n_N angegeben. Die entsprechenden Teillastverhältnisse sind in der Kommentarspalte aufgeführt. Der Leistungsfaktor ist nur für Nenndrehzahl angegeben.

6.2 Datenblatt „Umrichter“

Das Datenblatt *Umrichter* ist folgendermaßen gegliedert:

- Allgemeine Angaben
- Umrichterkenndaten
- Konstruktionsdaten
- Geeignete Motoren
- Betriebsdaten
- Ökonomische Daten

6.2.1 Allgemeine Angaben

Die im Datenblatt aufgeführten *Allgemeinen Angaben* erlauben eine schnelle Identifikation des Umrichters hinsichtlich seiner Bauart, dessen Leistungsbereich sowie dem geltenden Statusjahr.

- **Umrichterart:**
Spannungs- oder Stromzwischenkreisumrichter für Drehstrommaschinen bzw. Stromrichter für Gleichstrommaschinen.
- **Schutzart:**
Die Schutzart wird durch das Kurzzeichen IP gekennzeichnet (vgl. Kapitel 2.3).
- **Kühlart:**
Die Kühlart wird durch das Kurzzeichen IC gekennzeichnet (vgl. Kapitel 2.4).
- **Statusjahr:**
Jahr, für das die Umrichterdaten gelten.

6.2.2 Umrichterkenndaten

Die *Umrichterkenndaten* fassen im Datenblatt die wesentlichen elektrischen Kenndaten des Umrichters zusammen.

- **Scheinleistung S_N :**
Scheinleistung, die im Nennpunkt abgegeben wird. Bei Stromrichtern für GSM steht hier die Wirkleistung.
- **Anschlußspannung:**
Netzseitige Spannung, an die der Umrichter angeschlossen werden kann.

- **Ausgangsseitige Nennspannung U_N :**
Nennausgangsspannung ist bei Frequenzumrichtern im allgemeinen gleich der Umrichtereingangsspannung.
Im Gegensatz zum Stromrichter für GSM kann der Frequenzumrichter ausgangsseitig keine höhere Spannung als die Eingangsspannung liefern.
- **Minimale Ausgangsspannung U_{\min} :**
Minimal mögliche Ausgangsspannung an Umrichterklappen.
- **Ausgangsseitiger Nennstrom I_N :**
Strom, der sich ausgangsseitig bei Nennspannung U_N und Belastung mit S_N einstellt.
- **Minimaler Ausgangsstrom I_{\min} :**
Minimal möglicher Strom an Umrichterklappen.
- **Maximaler Ausgangsstrom I_{\max} :**
Maximaler Strom an den Umrichterklappen, der jedoch nur für eine kurze Zeit anstehen darf (vgl. maximale Überlastdauer).
- **Ausgangsseitige Nennfrequenz f_N :**
Frequenz im Nennbetrieb des Umrichters (i.allg. 50 Hz).
- **Minimale Ausgangsfrequenz f_{\min} :**
Minimal einstellbare Frequenz an den Umrichterklappen.
- **Maximale Ausgangsfrequenz f_{\max} :**
Maximal einstellbare Frequenz an Umrichterklappen. Frequenzen bis f_{\max} werden im Feldschwäcbereich bis n_{\max} des Motors genutzt. Bei Stromrichtern entfällt die Angabe.
- **Überlastbarkeit:**
Die Überlastbarkeit gibt an, um wieviel Prozent der Umrichter kurzzeitig mit einem höheren Strom als I_N belastet werden kann.
- **Maximale Überlastdauer t_{\max} :**
Zeitdauer, in dem durch I_{\max} noch keine Halbleiterschäden im Umrichter auftreten.
- **Zulässige Häufigkeit:**
Zulässige Häufigkeit an Überlastungen innerhalb einer Stunde.

6.2.3 Konstruktionsdaten

Die *Konstruktionsdaten* beziehen sich auf die Gestaltung des Umrichters.

- **Masse m:**
Gewicht des Umrichters (Schrankgeräte). Einbaugeräte sind erheblich leichter.
- **Leistungsgewicht:**
Verhältnis von Umrichtergewicht (Schrankgeräte) zur Nennscheinleistung.
- **Kühlluftbedarf:**
Luftmenge, die pro Stunde zur Kühlung des Umrichters nötig ist.
- **Hilfsenergieverbrauch für Kühlung:**
Energiebedarf für Zwangslüftung.

6.2.4 Geeignete Motoren

Im Feld *Geeignete Motoren* ist angeführt, für welche Motortypen im angegebenen Leistungsbereich der jeweilige Umrichter eingesetzt werden kann.

6.2.5 Betriebsdaten

Analog zum Motordatenblatt wird auch beim Umrichter zwischen den beiden Lastverläufen *Strömungsmaschinen-* und *Konstant-Moment-Betrieb* unterschieden.

Für einige ausgewählte Frequenzen und Drehzahlen, angegeben in Prozent von f_N (50 Hz) bzw. n_N , sind die Wirkungsgrade angegeben. Der Leistungsfaktor (Verschiebungsfaktor der Netzstrom-Grundschiwingung) gilt nur für f_N bzw. n_N .

Für *Konstant-Moment-Betrieb* ist P_{mot} je nach verwendetem Umrichtertyp bzw. je nach Drehzahlstellbereich unterschiedlich stark zu reduzieren. Im Motordatenblatt ist für zwei verschiedene Umrichterarten die reduzierte Leistung bei Speisung durch einen Umrichter mit Drehzahlstellbereich 1:3 angegeben. Um die reduzierte Motorleistung für einen anderen Drehzahlstellbereich zu erhalten, ist der auf den betrachteten Umrichter zutreffende Wert von P_{uc} des Motordatenblattes mit dem Umrechnungsfaktor k des gewünschten Drehzahlstellbereiches aus dem Umrichterdatenblatt zu multiplizieren.

6.2.6 Ökonomische Daten

Die *Ökonomischen Daten* enthalten die Umrichterpreise bezogen auf den Geldwert von 1989. Die Mehrwertsteuer ist nicht beinhaltet. Um die ökonomischen Daten bezogen auf den Geldwert von 1995 zu erhalten, müssen die in den Datenblättern angegebenen Preise mit dem Faktor 1,22 multipliziert werden.

- **Investitionen:**

Kaufpreis des Umrichters (vgl. Rabatte in den Datenblättern). Es ist mit durchschnittlichen Preisnachlässen von 25 % zu rechnen.

- **Spezifische Investitionen:**

Investitionen, bezogen auf die Scheinleistung S_N .

- **Montage- und Inbetriebnahmekosten:**

Kosten, bezogen auf die Investitionen, die für die Umrichterinstallation am Anwendungsort anfallen.

- **Beseitigungskosten:**

Kosten, bezogen auf die Investitionen, die bei der Demontage und Entsorgung des Umrichters anfallen.

- **Wartungs- und Instandhaltungskosten:**

Kosten, die jährlich für routinemäßig durchzuführende Wartungsarbeiten anfallen.

- **Technische Lebensdauer:**

Durchschnittlich zu erwartende Lebensdauer des Umrichters bei regelmäßiger Wartung.

- **Ökonomische Lebensdauer:**

Zeitdauer, nach dem der Umrichter vollständig abgeschrieben ist.

6.3 Querverbindungen

Die Angaben der Motordatenblätter korrespondieren mit den Angaben der Umrichterdatenblätter, so daß η_{Sys} aus den jeweils zuordenbaren η_{Motor} und $\eta_{Umrichter}$ durch Multiplikation ermittelt werden kann. Die Drehzahlverhältnisse im Motordatenblatt entsprechen den Frequenzverhältnissen im Umrichterdatenblatt. So ist z.B. der Motorwirkungsgrad bei $n/n_N = 50\%$ mit dem Umrichterwirkungsgrad bei $f/f_N = 50\%$ zu multiplizieren, um η_{Sys} bei dieser Drehzahl bzw. dieser Frequenz zu ermitteln (Zusatzverluste bis 5%). Der Gesamtpreis des Antriebssystems resultiert aus der Addition der beiden Einzelpreise. Die spezifischen Investitionen des Gesamtsystems sind auf die Nennleistung P_N des Motors bezogen.

7 Datensammlung

Die Datensammlung umfaßt alle Bereiche der hier behandelten Querschnittstechnologie *Elektrische Antriebe*, deren wesentliche Komponenten die Elektromotoren und Umrichter sind. Aufgrund der Fülle an Informationen (die Datensammlung umfaßt ca. 480 Seiten) befinden sich im Anhang nur ausgewählte Datenblätter, die den Aufbau und den Inhalt veranschaulichen sollen. Sämtliche Datenblätter sind im IKARUS-Bericht 8-05a *Elektrische Antriebe: Datensammlung* zusammengefaßt. Diese Datenblätter sind auch Bestandteil einer Datenbank, die über das Fachinformationszentrum in Karlsruhe bezogen werden kann. Zusätzlich wurden für jedes Datenblatt die energetischen und wirtschaftlichen Aspekte für verschiedene praxisnahe Einsatzfälle betrachtet und die Ergebnisse in der Datenbank abgelegt.

7.1 Nomenklatur der Datenblätter

Zur eindeutigen Charakterisierung der Datenblätter wurde folgende Nomenklatur eingeführt:

1	-	2	<	3	-	4	-	5	-	6	-	7	>	8
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

1) Technik	Motor-Datenblatt	EA
	Umrichter-Datenblatt	EU
2) Bauart	Asynchronmaschine	A
	Synchronmaschine	S
	Gleichstrommaschine	G
	Spannungszwischenkreisumrichter	U
	Stromzwischenkreisumrichter	I
	Stromrichter für Einquadrantenantrieb	E
	Stromrichter für Vierquadrantenantrieb	V
3) Typ	Käfigläufer	K
	Fremderregung	F
	Nebenschlußerregung	N
	Permanenterregung	P
	Vektorregelung	V
	Stromrichter mit Mikroprozessor	M
	Stromrichter in Hybridtechnik	H
	keine Besonderheit	.
4) Nenndrehzahl	bis 250 min ⁻¹	1
	251 bis 428 min ⁻¹	2
	429 bis 500 min ⁻¹	3
	501 bis 600 min ⁻¹	4
	601 bis 750 min ⁻¹	5

	751 bis 1000 min ⁻¹	6
	1001 bis 1500 min ⁻¹	7
	1501 bis 3000 min ⁻¹	8
	größer 3000 min ⁻¹	9
	Umrichter	.
5) Anschlußspannung	160 V (DC)	016
	230 V (3 AC / 1 AC)	023
	260 V (DC)	026
	400 V (3 AC / 2 AC)	040
	420 V (DC)	042
	460 V (DC)	046
	500 V (3 AC / DC)	050
	600 V (3 AC / DC)	060
	690 V (3 AC / 6 AC)	069
	720 V (DC)	072
	3000 V (3 AC)	300
	6000 V (3 AC)	600
6) Leistungsbereich	$P_N \leq 1 \text{ kW}$	1
	$1 \text{ kW} < P_N \leq 10 \text{ kW}$	2
	$10 \text{ kW} < P_N \leq 75 \text{ kW}$	3
	$75 \text{ kW} < P_N \leq 250 \text{ kW}$	4
	$P_N > 250 \text{ kW}$	5
	keine Leistungsaufteilung	.
7) Zähler	zur Unterscheidung bei gleicher Kurzbezeichnung	1..9
8) Statusjahr	Stand der Technik 1989	89
	Stand der Technik 1995	95
	zukünftige Technik 2005	05
	zukünftige Technik 2020	20

Beispielsweise erhält eine ASM mit Käfigläufer (Baujahr 1995) mit einer Nennleistung von 160 kW und einer Nenndrehzahl von 745 min⁻¹ bei einer Anschlußspannung von 400 V für das Statusjahr 1995 die Kurzbezeichnung *EA-A<K-5-040-4-X>95*. Ein für diesen Motor geeigneter Spannungszwischenkreisumrichter mit Vektorregelung führt die Kurzbezeichnung *EU-U<V.-040-4-X>95*.

Bei der Einteilung der Umrichter in die entsprechenden Leistungsklassen wurde die Nennleistung des üblicherweise eingesetzten Motors zugrunde gelegt. Dadurch wird die Zuordnung Motor zu Umrichter erheblich vereinfacht. Das "X" steht für den Zähler, der zur Unterscheidung bei gleicher Bauart dient.

Die ausgearbeiteten Datenblätter gelten für das Statusjahr 1995. Mittels Multiplikation der Investitionen bzw. des spezifischen Energieeinsatzes mit dem Zeitfaktor gemäß *Tabelle 7-1* errechnen sich die Werte für unterschiedliche Zeitstufen.

Tabelle 7-1: Zeitfaktoren für Investition und den spezifischen Energieeinsatz

Statusjahr		1989	1995	2005	2020
Investitionen	Motoren	1,00	1,00	1,01	1,02
	Umrichter	1,00	1,00	0,99	0,98
	Stromrichter	1,00	1,00	0,99	0,98
spez. Energieeinsatz	Motoren	1,00	1,00	1,00	0,99
	Umrichter	1,01	1,00	0,99	0,99
	Stromrichter	1,00	1,00	1,00	1,00

7.2 Bereichseinteilung

Im folgenden wird die Auswahl der betrachteten Elektromotoren und Umrichter begründet und die Gliederung in Leistungsbereiche dargestellt und erläutert.

7.2.1 Motoren

In der industriellen Antriebstechnik nimmt die ASM mit Käfigläufer eine dominierende Stellung ein. Die SM wird vor allem dort eingesetzt, wo eine konstante Drehzahl gefordert ist. Die fortschreitende Entwicklung in der Leistungselektronik, die zu einer Kostenreduzierung bei den Umrichtern geführt hat, ermöglicht den Einsatz von ASM für Aufgaben, die in früheren Zeiten in erster Linie der GSM vorbehalten waren. Auch für die SM erschließen sich neue Einsatzpotentiale, vor allem im Bereich der industriellen Kraftbedarfsdeckung im MW-Bereich. Aufgrund der weiten Verbreitung der GSM sowie der ASM, insbesondere der Käfigläufer-ASM an Niederspannung, wurden für diese Motortypen anteilmäßig die meisten Datenblätter erstellt. Für die SM wurde die Zahl der Datenblätter bewußt klein gehalten, da sie nur in relativ begrenztem Umfang eingesetzt werden.

Asynchronmaschine

Die ASM sind nach ihrer Anschlußspannung in Niederspannung und Hochspannung unterteilt. Die Motoren wurden nach den für den Anwender relevanten Kenngrößen Leistungs- und Drehzahlbereich untergliedert.

Die Bereichseinteilung der Käfigläufer-ASM an Niederspannung ist in *Tabelle 7-2* über 91 verschiedene Datenblätter dargestellt.

Tabelle 7-2a: Einteilung der Käfigläufer-ASM an Niederspannung

Bauart	Anschlußspannung [V]	Nennzahl	Nennleistung [kW]	Kurzbezeichnung	
ASM	230	3000 U/min	0,09 - 0,75	EA-A<K-8-023-1-1>95	
			1,1 - 7,5	EA-A<K-8-023-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-8-023-3-1>95	
		1500 U/min	0,06 - 0,75	EA-A<K-7-023-1-1>95	
			1,1 - 7,5	EA-A<K-7-023-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-7-023-3-1>95	
		1000 U/min	0,04 - 0,75	EA-A<K-6-023-1-1>95	
			1,1 - 7,5	EA-A<K-6-023-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-6-023-3-1>95	
		750 U/min	0,09 - 0,75	EA-A<K-5-023-1-1>95	
			1,1 - 7,5	EA-A<K-5-023-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-5-023-3-1>95	
		600 U/min	0,09 - 0,75	EA-A<K-4-023-1-1>95	
			1,1 - 7,5	EA-A<K-4-023-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-4-023-3-1>95	
		500 U/min	0,09 - 0,75	EA-A<K-3-023-1-1>95	
			1,1 - 7,5	EA-A<K-3-023-2-1>95	
			11 - 55	EA-A<K-3-023-3-1>95	
	400	3000 U/min	0,09 - 0,75	EA-A<K-8-040-1-1>95	
			1,1 - 7,5	EA-A<K-8-040-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-8-040-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-8-040-4-1>95	
			250 - 1000	EA-A<K-8-040-5-1>95	
			1500 U/min	0,06 - 0,75	EA-A<K-7-040-1-1>95
				1,1 - 7,5	EA-A<K-7-040-2-1>95
				11 - 75	EA-A<K-7-040-3-1>95
				75 - 250	EA-A<K-7-040-4-1>95
				250 - 1000	EA-A<K-7-040-5-1>95
			1000 U/min	0,04 - 0,75	EA-A<K-6-040-1-1>95
				1,1 - 7,5	EA-A<K-6-040-2-1>95
				11 - 75	EA-A<K-6-040-3-1>95
				75 - 250	EA-A<K-6-040-4-1>95
				250 - 1000	EA-A<K-6-040-5-1>95
		750 U/min	0,09 - 0,75	EA-A<K-5-040-1-1>95	
			1,1 - 7,5	EA-A<K-5-040-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-5-040-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-5-040-4-1>95	
			250 - 800	EA-A<K-5-040-5-1>95	
		600 U/min	0,09 - 0,75	EA-A<K-4-040-1-1>95	
			1,1 - 7,5	EA-A<K-4-040-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-4-040-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-4-040-4-1>95	
250 - 800			EA-A<K-4-040-5-1>95		
500 U/min		0,09 - 0,75	EA-A<K-3-040-1-1>95		
		1,1 - 7,5	EA-A<K-3-040-2-1>95		
		11 - 75	EA-A<K-3-040-3-1>95		
		75 - 250	EA-A<K-3-040-4-1>95		
		250 - 710	EA-A<K-3-040-5-1>95		

Tabelle 7.2b: Einteilung der Käfigläufer-ASM an Niederspannung

Bauart	Anschlußspannung [V]	Nenn Drehzahl	Nennleistung [kW]	Kurzbezeichnung	
ASM	500	3000 U/min	1,1 - 7,5	EA-A<K-8-050-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-8-050-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-8-050-4-1>95	
			250 - 1000	EA-A<K-8-050-5-1>95	
		1500 U/min	1,1 - 7,5	EA-A<K-7-050-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-7-050-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-7-050-4-1>95	
			250 - 1800	EA-A<K-7-050-5-1>95	
		1000 U/min	1,1 - 7,5	EA-A<K-6-050-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-6-050-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-6-050-4-1>95	
			250 - 1400	EA-A<K-6-050-5-1>95	
		750 U/min	1,1 - 7,5	EA-A<K-5-050-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-5-050-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-5-050-4-1>95	
			250 - 1120	EA-A<K-5-050-5-1>95	
		600 U/min	1,1 - 7,5	EA-A<K-4-050-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-4-050-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-4-050-4-1>95	
			250 - 900	EA-A<K-4-050-5-1>95	
		500 U/min	1,1 - 7,5	EA-A<K-3-050-2-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-3-050-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-3-050-4-1>95	
			250 - 710	EA-A<K-3-050-5-1>95	
	690	3000 U/min	11 - 75	EA-A<K-8-069-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-8-069-4-1>95	
			250 - 1000	EA-A<K-8-069-5-1>95	
		1500 U/min	11 - 75	EA-A<K-7-069-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-7-069-4-1>95	
			250 - 1800	EA-A<K-7-069-5-1>95	
		1000 U/min	500 - 2800	EA-A<K-7-069-5-2>95	
			11 - 75	EA-A<K-6-069-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-6-069-4-1>95	
		750 U/min	250 - 1400	EA-A<K-6-069-5-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-5-069-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-5-069-4-1>95	
		600 U/min	250 - 1120	EA-A<K-5-069-5-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-4-069-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-4-069-4-1>95	
		500 U/min	250 - 900	EA-A<K-4-069-5-1>95	
			11 - 75	EA-A<K-3-069-3-1>95	
			75 - 250	EA-A<K-3-069-4-1>95	
				250 - 710	EA-A<K-3-069-5-1>95

Die Bereichseinteilung der Käfigläufer-ASM an Hochspannung ist in *Tabelle 7-3* über 8 verschiedene Datenblätter dargestellt.

Tabelle 7-3: Einteilung der Käfigläufer-ASM an Hochspannung

Bauart	Anschlußspannung [V]	Nenn Drehzahl	Nennleistung [kW]	Kurzbezeichnung
ASM	3000	3000 U/min	160 - 1400	EA-A<K-8-300-.1>95
		1500 U/min	160 - 1400	EA-A<K-7-300-.1>95
		1000 U/min	125 - 1250	EA-A<K-6-300-.1>95
		750 U/min	125 - 1120	EA-A<K-5-300-.1>95
	6000	3000 U/min	160 - 2000	EA-A<K-8-600-.1>95
		1500 U/min	160 - 2000	EA-A<K-7-600-.1>95
		1000 U/min	150 - 1600	EA-A<K-6-600-.1>95
		750 U/min	160 - 1250	EA-A<K-5-600-.1>95

Synchronmaschine

Synchronmotoren werden mit Leistungen vom 100-W-Bereich bis zum MW-Bereich gebaut. Oberhalb 1 MW gibt es große Schenkelpolmaschinen, jedoch nur in geringer Anzahl.

Bei permanentenerregten SM ist der Läufer zusätzlich mit einem Anlaufkäfig für den asynchronen Hochlauf ausgestattet. Mit dieser Technik sind im gewählten Leistungsbereich kleiner 8 kW sehr hohe Drehzahlen mit uneingeschränktem Anlaufvermögen zulässig. Motoren dieser Bauart haben ihr Haupteinsatzgebiet in Gruppenantrieben der Chemie- und Naturfaserindustrie sowie in Druckereien.

Der Schwerpunkt der für industrielle Antriebsaufgaben relevanten SM liegt im Leistungsbe-
reich bis 3,2 kW und bei Drehzahlen bis 15.000 min^{-1} .

In **Tabelle 7-4** sind die in den Datenblättern aufgeführten fremderregten SM bis zu einem Leistungs-
bereich von 2000 kW dargestellt. Bei den permanentenerregten SM in **Tabelle 7-5** erfolgte
die Einteilung bis zu einer Leistung von 5,5 kW.

Tabelle 7-4: Einteilung der fremderregten Synchronmaschinen

Bauart	Anschlußspannung [V]	Synchrone Drehzahl	Nennleistung [kW]	Kurzbezeichnung
SM	400	3000 U/min	10 - 75	EA-S<F-8-040-3-1>95
			75 - 250	EA-S<F-8-040-4-1>95
		1500 U/min	10 - 75	EA-S<F-7-040-3-1>95
			75 - 250	EA-S<F-7-040-4-1>95
			250 - 1000	EA-S<F-7-040-5-1>95
			1000 - 2000	EA-S<F-7-040-5-2>95
		1000 U/min	75 - 250	EA-S<F-6-040-4-1>95
			250 - 1600	EA-S<F-6-040-5-1>95
		750 U/min	75 - 250	EA-S<F-5-040-4-1>95
			250 - 1480	EA-S<F-5-040-5-1>95
		600 U/min	320 - 1250	EA-S<F-4-040-5-1>95
		500 U/min	250 - 800	EA-S<F-3-040-5-1>95
		429 U/min	400 - 800	EA-S<F-2-040-5-1>95

Tabelle 7-5: Einteilung der permanentenerregten Synchronmaschinen

Bauart	Anschlußspannung* [V]	Synchrone Drehzahl	Nennleistung [kW]	Kurzbezeichnung
SM	76	15000 U/min **	0,15 - 0,75	EA-S<P-9-040-1-1>95
			1,0 - 3,2	EA-S<P-9-040-2-1>95
	125	4500 U/min ***	0,15 - 0,75	EA-S<P-9-040-1-2>95
			1,3 - 2,8	EA-S<P-9-040-2-2>95
		3000 U/min ***	0,15 - 0,80	EA-S<P-8-040-1-1>95
			1,0 - 5,5	EA-S<P-8-040-2-1>95

* bei 50 Hz; bei Nennfrequenz beträgt die Anschlußspannung 380 V

** bei $f_N = 250$ Hz

*** bei $f_N = 150$ Hz

Gleichstrommaschine

Aus dem Spektrum der angebotenen GSM wurden fremdgekühlte Motoren mit aufgebautem Lüfter für Drehzahlen bis 3.000 min^{-1} für Ein- und Vierquadrantenbetrieb ausgewählt. Die Fremdkühlung stellt sicher, daß die Motoren auf Drehzahlen bis 50 min^{-1} heruntergefahren werden können.

In *Tabelle 7-6* sind die in den Datenblättern aufgeführten GSM bis zu einem Leistungsbereich von 750 kW dargestellt.

7.2.2 Umrichter

Die in der Praxis eingesetzten GSM werden heutzutage nahezu alle aus Stromrichtern gespeist, wohingegen der Einsatz umrichtergespeister ASM noch nicht weit vorangeschritten ist. In Absolutzahlen ausgedrückt sind die Frequenzumrichter jedoch weiter verbreitet als die Stromrichter, da Drehstrommaschinen in größerer Zahl eingesetzt werden als Gleichstrommotoren. Die Unterteilung der Umrichter erfolgte nach verschiedenen Anschlußspannungen, die das energetische Verhalten beeinflussen.

Frequenzumrichter

In *Tabelle 7-7* sind die Frequenzumrichter unterteilt in Spannungszwischenkreis- sowie Stromzwischenkreisumrichter dargestellt. Für die Anschlußspannungen bis 500 V werden hauptsächlich Geräte in Transistorpulstechnik verwendet, für 690 V in erster Linie solche mit GTO-Pulstechnik.

Tabelle 7-6a: Einteilung der Gleichstrommaschinen

Bauart	Anschlußspannung [V]	Nennzahl	Nennleistung [kW]	Kurzbezeichnung
GSM	160	3000 U/min	0,25 - 5,0	EA-G<N-8-016-.1>95
			0,25 - 5,0	EA-G<N-8-016-.2>95
		1500 U/min	0,25 - 5,0	EA-G<N-7-016-.1>95
			0,25 - 5,0	EA-G<N-7-016-.2>95
		1000 U/min	0,25 - 5,0	EA-G<N-6-016-.1>95
			0,25 - 5,0	EA-G<N-6-016-.2>95
	260	3000 U/min	1,0 - 8,0	EA-G<N-8-026-2-1>95
			1,0 - 8,0	EA-G<N-8-026-2-2>95
		1500 U/min	1,0 - 8,0	EA-G<N-7-026-2-1>95
			1,0 - 8,0	EA-G<N-7-026-2-2>95
		1000 U/min	1,0 - 8,0	EA-G<N-6-026-2-1>95
			1,0 - 8,0	EA-G<N-6-026-2-2>95
	750 U/min	1,0 - 8,0	EA-G<N-5-026-2-1>95	
		1,0 - 8,0	EA-G<N-5-026-2-2>95	
	420	3000 U/min	10 - 75	EA-G<N-8-042-3-1>95
			75 - 250	EA-G<N-8-042-4-1>95
			10 - 75	EA-G<N-8-042-3-2>95
			75 - 250	EA-G<N-8-042-4-2>95
		1500 U/min	10 - 75	EA-G<N-7-042-3-1>95
			75 - 250	EA-G<N-7-042-4-1>95
			250 - 450	EA-G<N-7-042-5-1>95
			10 - 75	EA-G<N-7-042-3-2>95
		1000 U/min	75 - 250	EA-G<N-7-042-4-2>95
			250 - 450	EA-G<N-7-042-5-2>95
			10 - 75	EA-G<N-6-042-3-1>95
			75 - 250	EA-G<N-6-042-4-1>95
		750 U/min	250 - 450	EA-G<N-6-042-5-1>95
			10 - 75	EA-G<N-6-042-3-2>95
			75 - 250	EA-G<N-6-042-4-2>95
			250 - 450	EA-G<N-6-042-5-2>95
		500 U/min	10 - 75	EA-G<N-5-042-3-1>95
			75 - 250	EA-G<N-5-042-4-1>95
			10 - 75	EA-G<N-5-042-3-2>95
			75 - 250	EA-G<N-5-042-4-2>95
		250 U/min	100 - 250	EA-G<N-3-042-4-1>95
			250 - 450	EA-G<N-3-042-5-1>95
			100 - 250	EA-G<N-3-042-4-2>95
			250 - 450	EA-G<N-3-042-5-2>95
	460	3000 U/min	250 - 450	EA-G<N-1-042-5-1>95
			250 - 450	EA-G<N-1-042-5-2>95
		1500 U/min	10 - 75	EA-G<N-8-046-3-1>95
			75 - 250	EA-G<N-8-046-4-1>95
			10 - 75	EA-G<N-7-046-3-1>95
		1000 U/min	75 - 250	EA-G<N-7-046-4-1>95
			250 - 500	EA-G<N-7-046-5-1>95
			10 - 75	EA-G<N-6-046-3-1>95
		750 U/min	75 - 250	EA-G<N-6-046-4-1>95
			250 - 500	EA-G<N-6-046-5-1>95
10 - 75			EA-G<N-5-046-3-1>95	
500 U/min		75 - 250	EA-G<N-5-046-4-1>95	
	250 - 500	EA-G<N-3-046-5-1>95		

Tabelle 7.6b: Einteilung der Gleichstrommaschinen

Bauart	Anschlußspannung [V]	Nenn Drehzahl	Nennleistung [kW]	Kurzbezeichnung	
GSM	500	3000 U/min	10 - 75	EA-G<N-8-050-3-1>95	
			75 - 250	EA-G<N-8-050-4-1>95	
			10 - 75	EA-G<N-8-050-3-2>95	
			75 - 250	EA-G<N-8-050-4-2>95	
		1500 U/min	10 - 75	EA-G<N-7-050-3-1>95	
			75 - 250	EA-G<N-7-050-4-1>95	
			250 - 550	EA-G<N-7-050-5-1>95	
			10 - 75	EA-G<N-7-050-3-2>95	
			75 - 250	EA-G<N-7-050-4-2>95	
			250 - 550	EA-G<N-7-050-5-2>95	
		1000 U/min	10 - 75	EA-G<N-6-050-3-1>95	
			75 - 250	EA-G<N-6-050-4-1>95	
			250 - 550	EA-G<N-6-050-5-1>95	
			10 - 75	EA-G<N-6-050-3-2>95	
			75 - 250	EA-G<N-6-050-4-2>95	
			250 - 550	EA-G<N-6-050-5-2>95	
		750 U/min	10 - 75	EA-G<N-5-050-3-1>95	
			75 - 250	EA-G<N-5-050-4-1>95	
			250 - 550	EA-G<N-5-050-5-1>95	
			10 - 75	EA-G<N-5-050-3-2>95	
			75 - 250	EA-G<N-5-050-4-2>95	
			250 - 550	EA-G<N-5-050-5-2>95	
		500 U/min	250 - 550	EA-G<N-3-050-5-1>95	
			250 - 550	EA-G<N-3-050-5-2>95	
	250 U/min	250 - 550	EA-G<N-1-050-5-1>95		
		250 - 550	EA-G<N-1-050-5-2>95		
	600	3000 U/min	75 - 250	EA-G<N-8-060-4-1>95	
			10 - 75	EA-G<N-7-060-3-1>95	
			75 - 250	EA-G<N-7-060-4-1>95	
		1500 U/min	250 - 650	EA-G<N-7-060-5-1>95	
			75 - 250	EA-G<N-6-060-4-1>95	
			250 - 650	EA-G<N-6-060-5-1>95	
		1000 U/min	75 - 250	EA-G<N-5-060-4-1>95	
			250 - 650	EA-G<N-5-060-5-1>95	
		750 U/min	250 - 650	EA-G<N-3-060-5-1>95	
			250 - 650	EA-G<N-1-060-5-1>95	
		720	1500 U/min	250 - 750	EA-G<N-7-072-5-1>95
				250 - 750	EA-G<N-7-072-5-2>95
	1000 U/min		250 - 750	EA-G<N-6-072-5-1>95	
			250 - 750	EA-G<N-6-072-5-2>95	
	750 U/min		250 - 750	EA-G<N-5-072-5-1>95	
			250 - 750	EA-G<N-5-072-5-2>95	
500 U/min	250 - 750	EA-G<N-3-072-5-1>95			
	250 - 750	EA-G<N-3-072-5-2>95			
250 U/min	250 - 750	EA-G<N-1-072-5-1>95			
	250 - 750	EA-G<N-1-072-5-2>95			

Tabelle 7-7: Einteilung der Frequenzumrichter

Bauart	Anschlußspannung [V]	Scheinleistung [kVA]	Kurzbezeichnung
Spannungszwischenkreisumrichter	230	0,6 - 1,6	EU-U<.-.023-1-1>95
		3,9 - 12	EU-U<.-.023-2-1>95
		16 - 30	EU-U<V.-.023-3-1>95
	400	0,6 - 1,6	EU-U<.-.040-1-1>95
		3,9 - 12	EU-U<.-.040-2-1>95
		16 - 98	EU-U<V.-.040-3-1>95
		98 - 321	EU-U<V.-.040-4-1>95
	500	5 - 12	EU-U<.-.050-2-1>95
		16 - 98	EU-U<V.-.050-3-1>95
		98 - 321	EU-U<V.-.050-4-1>95
	690	16 - 98	EU-U<V.-.069-3-1>95
		98 - 321	EU-U<V.-.069-4-1>95
Stromzwischenkreisumrichter	400	27 - 104	EU-I<.-.040-3-1>95
		104 - 328	EU-I<.-.040-4-1>95
		328 - 1257	EU-I<.-.040-5-1>95
	500	27 - 103	EU-I<.-.050-3-1>95
		103 - 325	EU-I<.-.050-4-1>95
		325 - 1422	EU-I<.-.050-5-1>95
	690	67 - 105	EU-I<.-.069-3-1>95
		105 - 328	EU-I<.-.069-4-1>95
		328 - 1796	EU-I<.-.069-5-1>95
	690 (6 AC) *	538 - 3815	EU-I<.-.069-5-2>95
		503 - 3472	EU-I<.-.069-5-3>95 **

* Eingang 6-phasig, Phasenverschiebung von 60° wird mit einem Ydy-Trafo aus einem 3-phasigen Netz erzeugt

** Ausgang 6-phasig

Stromrichter

Stromrichter ermöglichen einen drehzahlgeregelten Betrieb von GSM am Drehstromnetz. Neben der Ankerspannung liefern sie i.allg. auch eine getrennt regelbare Erregerspannung. Um hohen Anforderungen an die Dynamik regelbarer Antriebe gerecht werden zu können, werden die Steuerungen der Stromrichter mit Mikroprozessoren ausgerüstet.

In den Datenblättern ist zwischen Hybridtechnik und Mikroprozessortechnik der Stromrichter unterschieden. Wegen der unterschiedlichen Ausstattung bei Stromrichtern für Ein- und Vierquadrantenbetrieb wurden getrennte Datenblätter angelegt (vgl. *Tabelle 7-8*).

Tabelle 7-8: Einteilung der Stromrichter

Bauart	Betriebsart	Anschlußspannung [V]	Ausgangsspannung [V]	Nennleistung [kW]	Kurzbezeichnung			
Stromrichter mit Mikroprozessor	1-Q-Betrieb	400 3 AC	460	18,0 - 84,0	EU-E<M-.040-3-1>95			
				84,0 - 268,0	EU-E<M-.040-4-1>95			
				268,0 - 551,0	EU-E<M-.040-5-1>95			
		500 3 AC	600	18,0 - 84,0	EU-E<M-.050-3-1>95			
				84,0 - 268,0	EU-E<M-.050-4-1>95			
				268,0 - 689,0	EU-E<M-.050-5-1>95			
	4-Q-Betrieb	400 3 AC	420	15,0 - 84,0	EU-V<M-.040-3-1>95			
				84,0 - 268,0	EU-V<M-.040-4-1>95			
				268,0 - 477,0	EU-V<M-.040-5-1>95			
		500 3 AC	520	18,0 - 84,0	EU-V<M-.050-3-1>95			
				84,0 - 268,0	EU-V<M-.050-4-1>95			
				268,0 - 614,0	EU-V<M-.050-5-1>95			
690 3 AC	720	851,0	268,0 - 851,0	EU-V<M-.066-5-1>95				
			15,0 - 84,0	EU-V<H-.023-2-1>95				
			84,0 - 268,0	EU-E<H-.040-4-1>95				
	Stromrichter in Hybridtechnik	1-Q-Betrieb	230 1 AC	180	1,4 - 7,0	EU-E<H-.023-2-1>95		
					400 2 AC	300	1,6 - 12,0	EU-E<H-.040-2-1>95
							400 3 AC	460
4-Q-Betrieb		230 1 AC	160	0,8 - 6,0	EU-V<H-.023-2-1>95			
				400 2 AC	260	1,4 - 10,0	EU-V<H-.040-2-1>95	
						400 3 AC	420	18,0 - 84,0
			84,0 - 268,0	EU-V<H-.040-4-1>95				

8 Übergreifende Analyse

Im folgenden Kapitel sind die mittels Markt- und Herstelleranalysen ermittelten, wesentlichen Merkmale, wie beispielsweise Wirkungsgrad, Leistungsfaktor oder Investitionen, für die unterschiedlichen Motorarten und Umrichter einschließlich ihrer gegenseitigen Zuordnung in Abhängigkeit von der Nennleistung P_N aufbereitet.

Einen ersten Überblick über den Verlauf von leistungsspezifischen Kenndaten elektrischer Antriebe geben die empirisch ermittelten Wachstumsgesetze. Sie liefern eine Aussage darüber, welche Änderungen der Kenndaten maschinenbaulicher Anlagen mit zunehmender Baugröße zu erwarten sind. Unter Heranziehung der Wachstumsgesetze lassen sich näherungsweise Aussagen zur Veränderung typischer Maschinenparameter (Leistung, Drehmoment, Verluste etc.) bei einer gleichmäßig linearen Vergrößerung aller geometrischen Abmessungen der Maschine um den Faktor μ_g treffen. Hierbei ist zwischen indirekt gekühlten Maschinen und direkt gekühlten Maschinen zu unterscheiden.

Bei indirekt gekühlten Maschinen nimmt bei gegebener Wärmeleitfähigkeit λ und konstanter Erwärmung bei Vergrößerung der geometrischen Abmessungen um μ_g die Stromdichte s ab und der Strombelag A zu; das Produkt aus Stromdichte und Strombelag bleibt konstant. Diese Charakteristik weisen vor allem kleinere Maschinen auf. Bei großen, direkt gekühlten Maschinen wird jedoch aus verschiedenen Gründen der Strombelag bei Vergrößerung der Abmessungen konstant gehalten.

Unter Einbezug der physikalischen Zusammenhänge zwischen den einzelnen technischen Kenngrößen ergeben sich bei einer Vergrößerung der geometrischen Abmessungen um den Faktor μ_g die in *Tabelle 8-1* zusammengestellten Abhängigkeiten. Die technischen Kenngrößen lassen sich ebenfalls in Abhängigkeit von der Maschinenleistung P angeben. Aus den Zusammenhängen in *Tabelle 8-1* kann u. a. gefolgert werden, daß bei einer hypothetischen Vergrößerung der Maschinenleistung die Verluste sinken und dadurch der Wirkungsgrad ansteigt. Die Anlaufzeit erhöht sich, so daß die Maschine träger wird.

Die Zusammenhänge in *Tabelle 8-1* gelten nur unter den folgenden Voraussetzungen:

- Werkstoffe, Konstruktionsprinzipien und Kühlart bleiben unverändert.
- Magnetische Induktion B , Stromdichte s , spezifischer Widerstand ρ , Wärmeleitfähigkeit λ und Dichte γ bleiben konstant.
- Einfluß magnetischer Oberfelder wird vernachlässigt.
- Einfluß des geometrischen Wachstums auf das Streuungsverhalten wird vernachlässigt.

Die o.g. Voraussetzungen sind in der Praxis aus folgenden Gründen nicht immer einzuhalten:

- Festigkeitsgrenzen der Werkstoffe zwingen mit zunehmender Baugröße zum Materialwechsel.
- Normbaugrößen bei Motoren verhindern ein kontinuierliches geometrisches Wachstum.
- Produktionsbedingte Grenzen, wie z.B. Mindestgrößen von Lagern, Schrauben etc.

Dennoch decken sich tendenziell die mittels der Marktanalyse detailliert untersuchten Abhängigkeiten der Kenngrößen elektrischer Maschinen von der Nennleistung mit den Wachstumsgesetzen.

Tabelle 8-1: Wachstumsgesetze elektrischer Maschinen /RAV/

	kleine Maschinen		große Maschinen	
Länge	μ_g	$P^{2/7}$	μ_g	$P^{1/3}$
Durchmesser	μ_g	$P^{2/7}$	μ_g	$P^{1/3}$
Oberfläche	μ_g^2	$P^{4/7}$	μ_g^2	$P^{2/3}$
Volumen	μ_g^3	$P^{6/7}$	μ_g^3	P
Masse	μ_g^3	$P^{6/7}$	μ_g^3	P
Leistung	$\mu_g^{7/2}$	P	μ_g^3	P
Drehmoment	$\mu_g^{7/2}$	P	μ_g^3	P
Verluste bezogen auf P_N	$\mu_g^{-3/2}$	$P^{-3/7}$	μ_g^{-1}	$P^{-1/3}$
Anlaufzeit	$\mu_g^{3/2}$	$P^{3/7}$	μ_g	$P^{1/3}$

Die auf Grundlage der Herstellerdaten ermittelten Zusammenhänge weisen unter Umständen bei einem Übergang zur nächsten Baugröße einen mehr oder weniger starken, sprunghaften Verlauf auf. In erster Linie führen unterschiedliche Materialien der Maschinengehäuse, wie dies ab einer bestimmten Baugröße der Fall ist (Aluminium anstelle von Grauguß), oder verschiedenartige Kühlungsarten zu sprungartigen Veränderungen der Kenngrößen. Unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Motorkenngrößen unterschiedlicher Hersteller ergeben sich Regressionskennlinien, die die tendenziellen Verläufe dennoch sehr gut abbilden.

Für eine erste Abschätzung von Energieeinsparungen bzw. für eine Grobdimensionierung ist diese Genauigkeit ausreichend. Als Grundlage für Wirtschaftlichkeitsberechnungen bzw. zur Ermittlung von Amortisationszeiten investiver Maßnahmen sollten in diesem Bereich jedoch neben einer detaillierten Analyse des gegenwärtigen Istzustands nur konkrete Angebote unterschiedlicher Hersteller herangezogen werden.

8.1 Asynchronmotoren

Drehstrom-Asynchronmotoren kommen in zwei unterschiedlichen Bauformen - als Käfig- oder Schleifringläufer - zum Einsatz. Durch die Entwicklung kostengünstiger, statischer Frequenzumrichter wird die ASM in ihrer Ausführung als Schleifringläufer immer mehr verdrängt, so daß an dieser Stelle eine Beschränkung auf die Käfigläufer-ASM erfolgte. Generell werden ASM in zwei- bis 12-poliger Ausführung angeboten, wobei die vierpolige Variante das größte Leistungsspektrum aufweist.

Neben der Darstellung der von der Nennleistung P_N abhängigen Kennwerte können auch die Kennwerte über der Auslastung P/P_N wiedergegeben und so das Teillastverhalten näher charakterisiert werden.

8.1.1 Wirkungsgrade

Die Wirkungsgrade von Motoren unterschiedlicher Hersteller unterscheiden sich um kaum mehr als 1%. Allerdings konnte festgestellt werden, daß preisgünstige Maschinen oft einen geringfügig schlechteren Wirkungsgrad aufweisen. In **Bild 8-1** ist der Verlauf des Nennwirkungsgrades der Käfigläufer-ASM über der Nennleistung in Abhängigkeit von der Polzahl dargestellt.

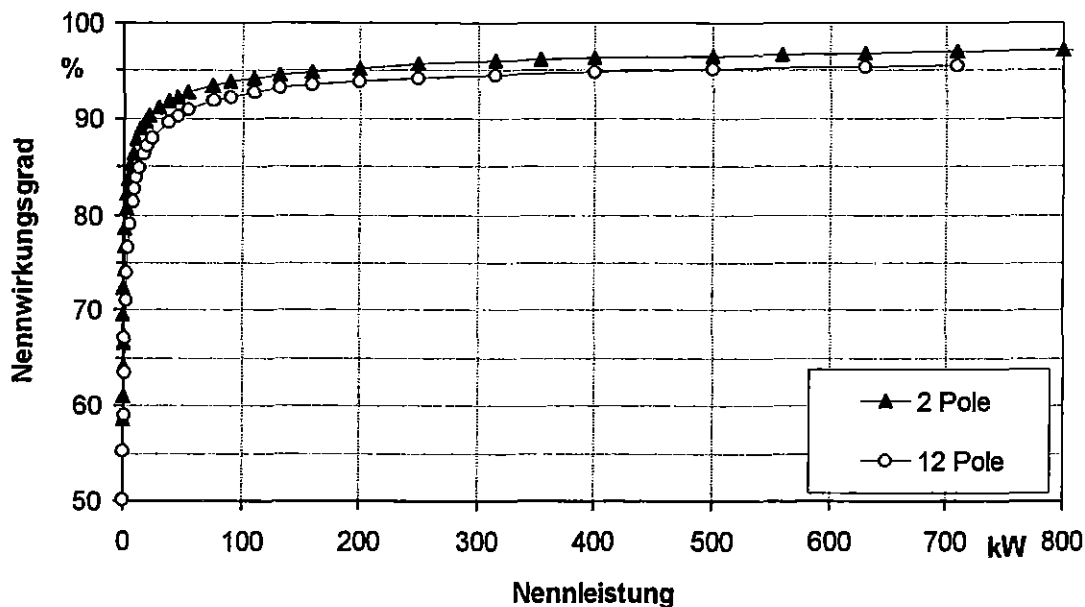


Bild 8-1: Nennwirkungsgradverlauf von Käfigläufer-ASM in Abhängigkeit von der Polzahl

Mit zunehmender Polzahl verschlechtert sich der Wirkungsgradverlauf, da mit der Polzahl das Volumen und die Masse zunimmt. Dies ist mit einer Erhöhung der Eisenverluste sowie der magnetischen Streuung verbunden. Am deutlichsten sind diese Effekte im Bereich kleiner

Nennleistung zu beobachten. Bei Nennleistungen unter 1 kW liegen die Wirkungsgrade von 12-poligen Motoren um bis zu 10% unter denen von 2-poligen Maschinen (vgl. *Bild 8-2*). Mit zunehmender Nennleistung nimmt diese Diskrepanz jedoch mehr und mehr ab. Ab einer Nennleistung von ca. 50 kW stellen sich bei 2- bis 8-poligen ASM nahezu gleiche Nennwirkungsgrade ein.

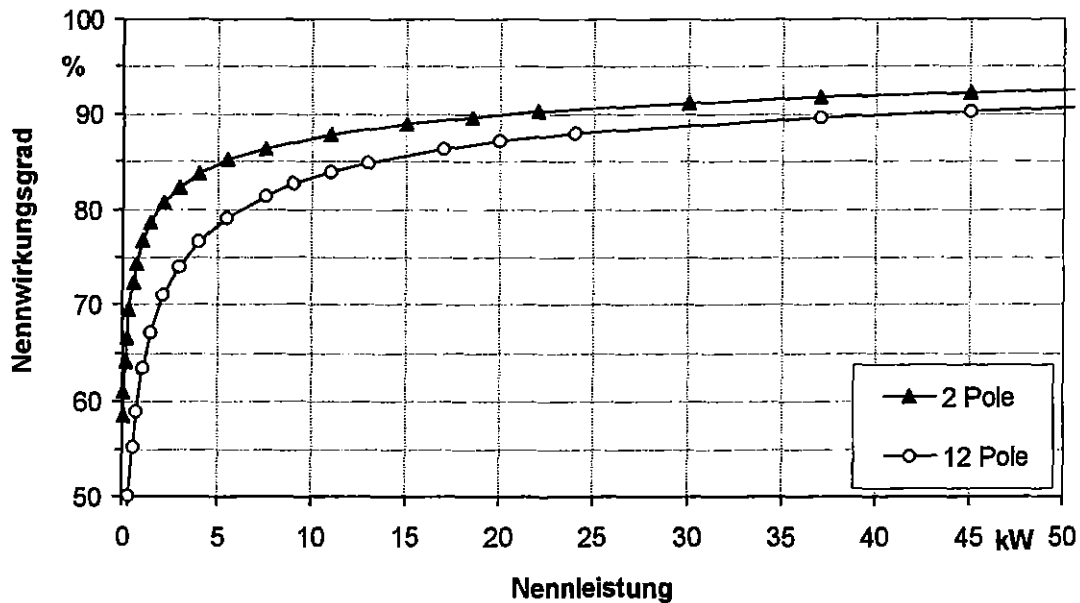


Bild 8-2: Nennwirkungsgradverlauf ($P_N < 50 \text{ kW}$) von Käfigläufer-ASM in Abhängigkeit von der Polzahl

Tendenziell erhöht sich mit zunehmender Nennleistung P_N auch der Nennwirkungsgrad η_N . Gemäß den Wachstumsgesetzen nehmen die Eisen- und Stromwärmeverluste mit der 3. Potenz und das Drehmoment ($\sim P_{mech}$) mit der 4. Potenz von μ_g zu. Dies hat zwar zur Folge, daß die Maschinenverluste mit der Nennleistung ansteigen, allerdings verringern sich die auf die Nennleistung bezogenen spezifischen Maschinenverluste über P_N .

Die kleineren spezifischen Maschinenverluste resultieren für größere Motoren in erster Linie aus dem Einsatz höherwertiger Bleche und größerer Kabelquerschnitte. Diese Maßnahmen sind notwendig, um dem bei großen Motoren auftretenden Problem einer Überhitzung zu begegnen, da die Oberfläche der Maschine zur Wärmeabgabe nur quadratisch, die Verluste jedoch mit der 3. Potenz ansteigen.

Ein weiterer Grund für den Wirkungsgradanstieg über der Nennleistung ist, daß sich mit der Motorleistung das Luftspaltvolumen im Verhältnis zum Motorvolumen reduziert. Infolge der daraus geringeren Streuung sinken die Magnetisierungsströme und die dadurch verursachten

Stromwärmeverluste ab. Ab einer Nennleistung von ca. 50 kW nähern sich die spezifischen Maschinenverluste asymptotisch einem unteren Grenzwert. Dies äußert sich in einer nur noch geringfügigen Zunahme der Nennwirkungsgrade ab diesem Leistungsbereich. Oberhalb einer Nennleistung von 350 kW werden maximale Wirkungsgrade von 97 % erreicht.

Die Umstellung der Netzspannungen von 380 auf 400 V bzw. von 660 auf 690 V hatte nach Herstellerangaben keinen merklichen Einfluß auf die Nennwirkungsgrade von elektrischen Antrieben. Signifikante Unterschiede zeigen sich jedoch bei einem Vergleich der Wirkungsgrade von Hoch- und Niederspannungsmotoren (vgl. *Bild 8-3*).

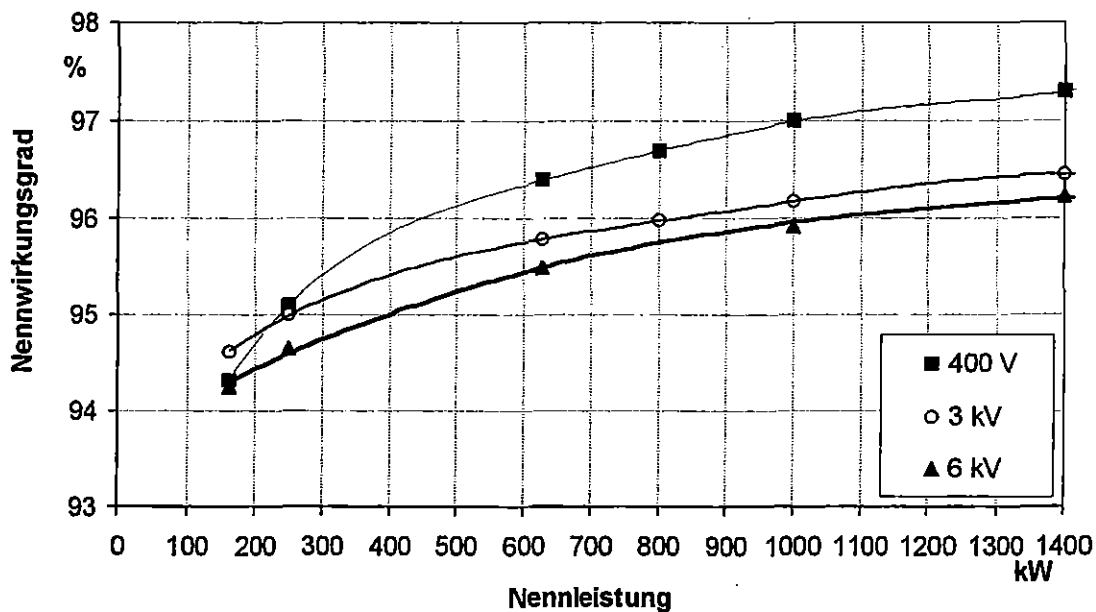


Bild 8-3: Nennwirkungsgradverlauf von 4-poligen Käfigläufer-ASM in Abhängigkeit von der Betriebsspannung

Da bei Hochspannungsmotoren ein deutlich höherer Isolationsaufwand erforderlich ist, verschlechtert sich die Wärmeabfuhr. Dies hat zur Folge, daß geringere Stromdichten realisierbar sind und sich das spezifische Volumen vergrößert. Damit nimmt die magnetische Streuung zu, so daß der Magnetisierungsstrom und infolgedessen auch die Stromwärmeverluste ansteigen. Darüber hinaus ergeben sich höhere Ventilationsverluste, da die umzuwälzenden Kühlmittelmengen aufgrund eines schlechteren Wärmeüberganges ansteigen. Hochspannungsmotoren haben bei Leistungen bis ca. 1 MW einen um bis zu 1,5 % schlechteren Wirkungsgrad. Für hohe Nennleistungen kommen jedoch fast ausschließlich Hochspannungsmotoren zum Einsatz.

Deutliche Auswirkungen auf die Wirkungsgrade hat u.U. die Kühlart eines Motors. Bei innengekühlten Motoren kleiner Leistungen überwiegt die zusätzliche Volumenvergrößerung durch Kühlkanäle und die damit verbundene o.g. Zunahme der Verluste.

Aufgrund der Tatsache, daß mit zunehmender Nennleistung die spezifischen Werte von elektrischen Maschinen günstiger werden, wird oft der Schluß gezogen, daß es aus energetischer Sicht Vorteile bringt, einen möglichst großen Antrieb für eine bestimmte Antriebsaufgabe auszuwählen. Die in Bild 8-1 bis Bild 8-3 dargestellten Kenngrößen gelten jedoch lediglich für Nennbetrieb, d.h. bei einer Auslastung P/P_N von 100%. In der Praxis treten jedoch durchschnittliche Auslastungen von ungefähr 20 bis 30% auf, so daß für eine energetische Beurteilung immer der Wirkungsgrad über der Auslastung analysiert werden muß.

In **Bild 8-4** sind Wirkungsgradverläufe für 4-polige Käfigläufer-ASM unterschiedlicher Leistungsklassen in Abhängigkeit von der Auslastung abgebildet. Die über dem Quotienten aus abgegebener mechanischer Leistung und Nennleistung aufgetragene Wirkungsgradkennlinien steigen beginnend bei Null stetig an und ändern sich ab ca. 75% der Nennleistung nur noch geringfügig. Das Wirkungsgradmaximum liegt im Bereich zwischen 75 und 110% der Nennleistung, wobei der untere Wert für Motoren kleinerer Leistung, der obere für größere Motoren gilt.

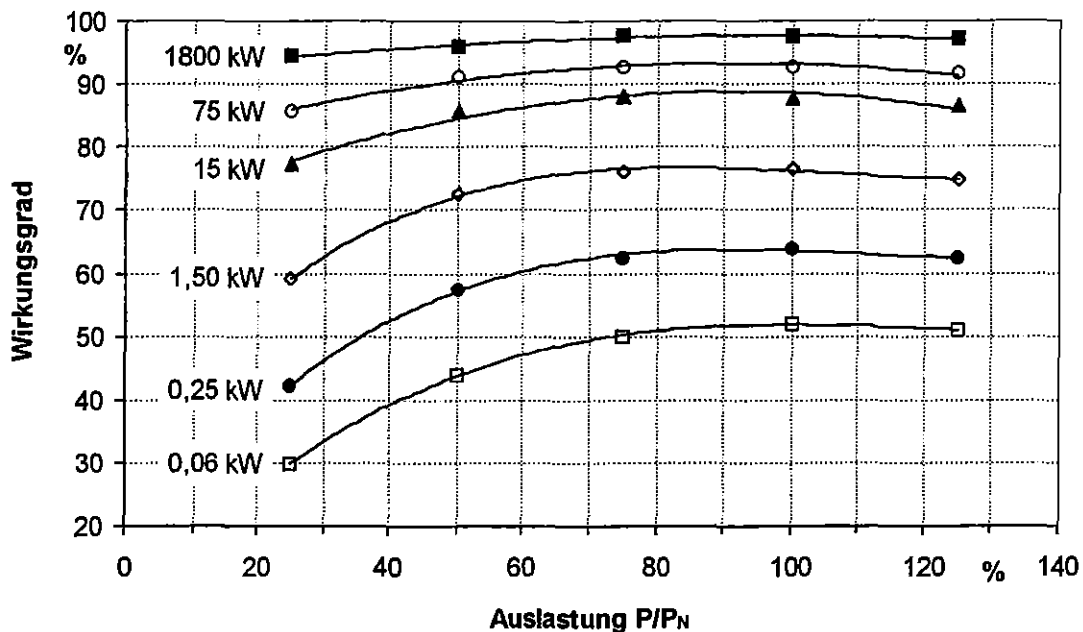


Bild 8-4: Wirkungsgradverlauf für 4-polige Käfigläufer-ASM unterschiedlicher Leistungsklassen in Abhängigkeit von der Auslastung

Die negativen energetischen Auswirkungen einer Überdimensionierung werden anhand eines in **Bild 8-5** graphisch dargestellten Vergleiches zwischen zwei Motoren mit unterschiedlicher Nennleistung deutlich. Bei einer geforderten Last von 20 kW ist der Motor 2 ($P_N = 45$ kW) nur zu ca. 45%, Motor 1 ($P_N = 30$ kW) dagegen zu ca. 65% ausgelastet. Der für diesen Anwendungsfall überdimensionierte Motor 2 weist bei dieser Betriebsweise um ca. 0,5 kW höhere

Verluste auf als Motor 1. Auch die Blindleistung, die einerseits zu höheren Stromwärmeverlusten und andererseits zu einer Erhöhung der Betriebskosten führen kann (Blindleistungskosten bzw. Kosten für Kompensationseinrichtungen), ist für den überdimensionierten Antrieb ungünstiger. Anhand dieses Beispiels wird ebenfalls deutlich, daß nicht zwangsläufig der Motor mit der Nennleistung, der der Lastanforderung entspricht, die optimale Lösung darstellt.

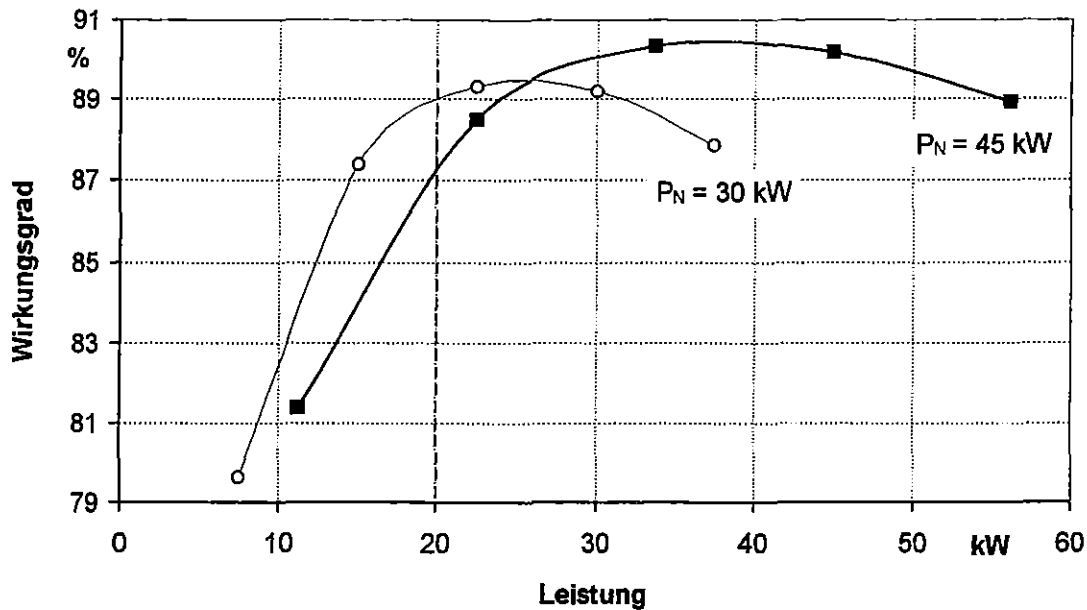


Bild 8-5: Vergleich des Teillastverhaltens zweier 4-poliger Käfigläufer-ASM

ASM können schadlos für kurze Zeit (im Minutenbereich) bis zum 1,5-fachen ihrer Nennleistung überlastet werden. Eine Motorendimensionierung muß deshalb nicht zwangsläufig gemäß der maximalen Leistungsanforderung erfolgen. Sind im Betrieb nur kurzzeitige, relativ selten auftretende Lastspitzen zu erwarten, so ist es unter Umständen sinnvoll, einen Antriebsmotor mit einer Nennleistung entsprechend der Dauerlast auszuwählen.

Prinzipiell sollte aber bei regelmäßig wiederkehrenden Überlastungen das Arbeitsspiel bekannt sein, um die Einhaltung der thermischen Maximalbelastung für den Antrieb zu gewährleisten. Die Möglichkeit der kurzzeitigen Überlastung ist insbesondere bei der Auswahl einer ASM von Interesse, da dieser Motorentyp nur in bestimmten Normbaugrößen angeboten wird und die Leistungssprünge zwischen den Baugrößen bis zu 50 % betragen.

8.1.2 Leistungsfaktoren

In **Bild 8-6** ist der Verlauf des Leistungsfaktors $\cos \varphi$ der Käfigläufer-ASM über der Nennleistung in Abhängigkeit von der Polzahl dargestellt.

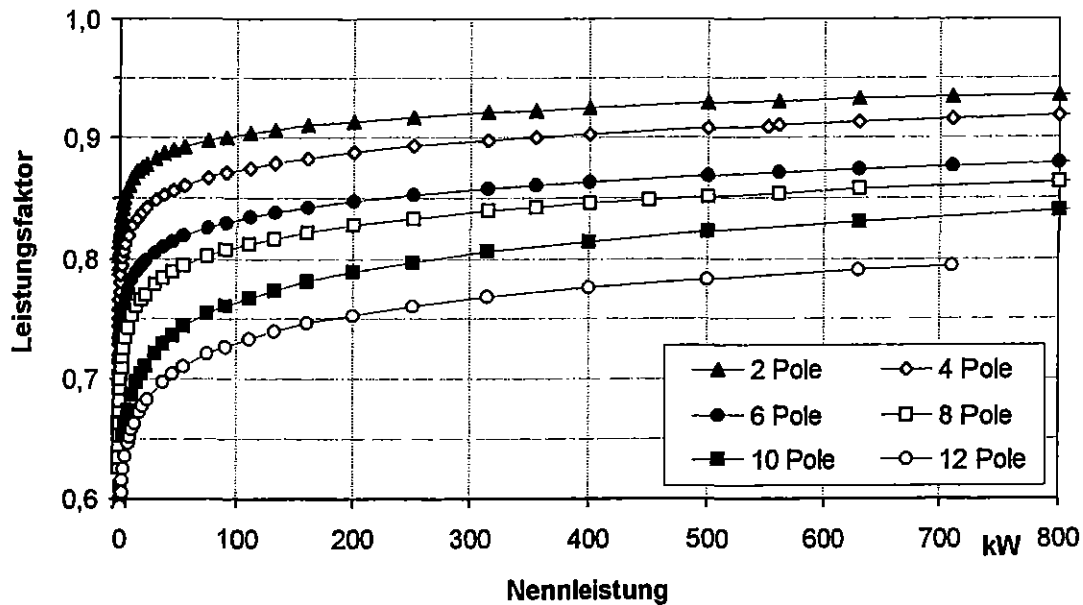


Bild 8-6: Leistungsfaktorverlauf von Käfigläufer-ASM in Abhängigkeit von der Polzahl

Die Kennlinie des Leistungsfaktors hat im Gegensatz zur Wirkungsgradkennlinie keinen Null-durchgang. Mit der Nennleistung nehmen die Leistungsfaktoren bis ca. 100 kW zunächst stark zu, danach ist nur noch ein leichter Anstieg zu erkennen. Mit steigender Polzahl verschlechtert sich der Verlauf des Leistungsfaktors erheblich.

Aus den Wachstumsgesetzen lassen sich keine Aussagen über die Abhängigkeit der Leistungsfaktoren von der Nennleistung ableiten. Die Auswertung von Herstellerdaten ergab für die Leistungsfaktoren ähnliche Verläufe wie für die Wirkungsgrade. Motoren größerer Leistung benötigen wegen des günstigeren Verhältnis von Luftspaltvolumen zu Motorvolumen einen geringeren spezifischen Magnetisierungsstrom und weisen deshalb einen besseren Leistungsfaktor auf. Im dargestellten Leistungsbereich liegen die Leistungsfaktoren bei 2-poligen Maschinen zwischen 0,79 und 0,94, bei 12-poligen Motoren zwischen 0,50 und 0,79.

In **Bild 8-7** ist der Leistungsfaktorverlauf für 4-polige Käfigläufer-ASM unterschiedlicher Leistungsklassen in Abhängigkeit von der Auslastung dargestellt. Analog zum Wirkungsgrad stellt sich eine ähnliche Charakteristik des Leistungsfaktors in Abhängigkeit von der Auslastung bei unterschiedlichen Leistungsklassen ein. Ab ca. 75 % der Nennleistung ändert sich die Kennlinie bei hohen Leistungsklassen nur noch geringfügig.

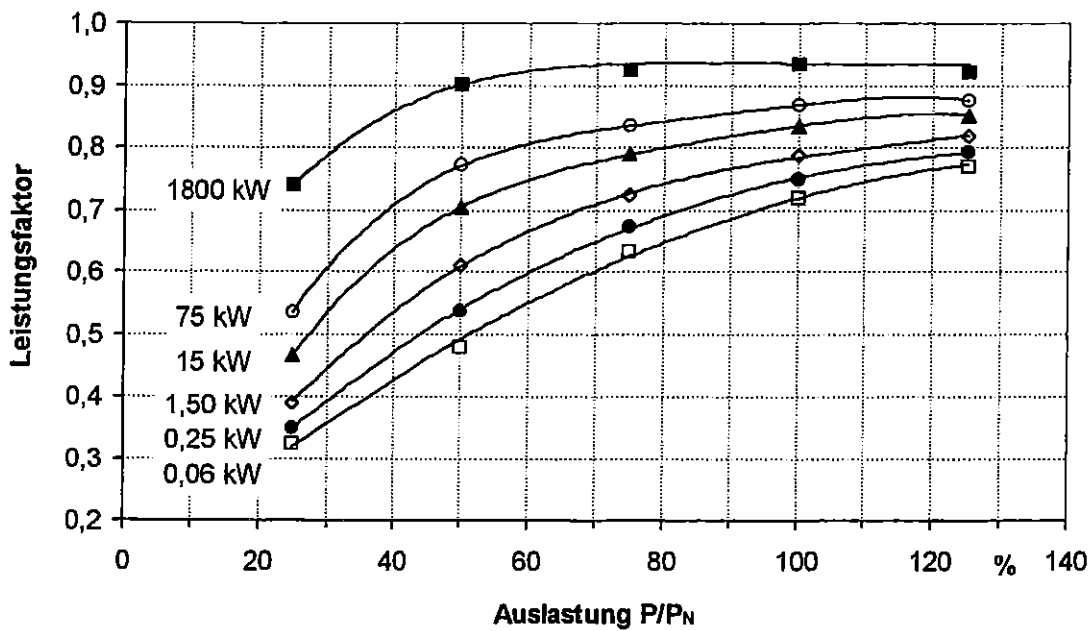


Bild 8-7: Leistungsfaktorverlauf für 4-polige Käfigläufer-ASM unterschiedlicher Leistungsklassen in Abhängigkeit von der Auslastung

In **Bild 8-8** bzw. **Bild 8-9** werden anhand des Wirkungsgrad- und Leistungsfaktorverlaufes von 4-poligen Käfigläufer-ASM unterschiedlicher Leistungsklassen die Vorteile einer Sternschaltung im Gegensatz zu einer Dreieckschaltung bei niedrigen Auslastungen erkennbar.

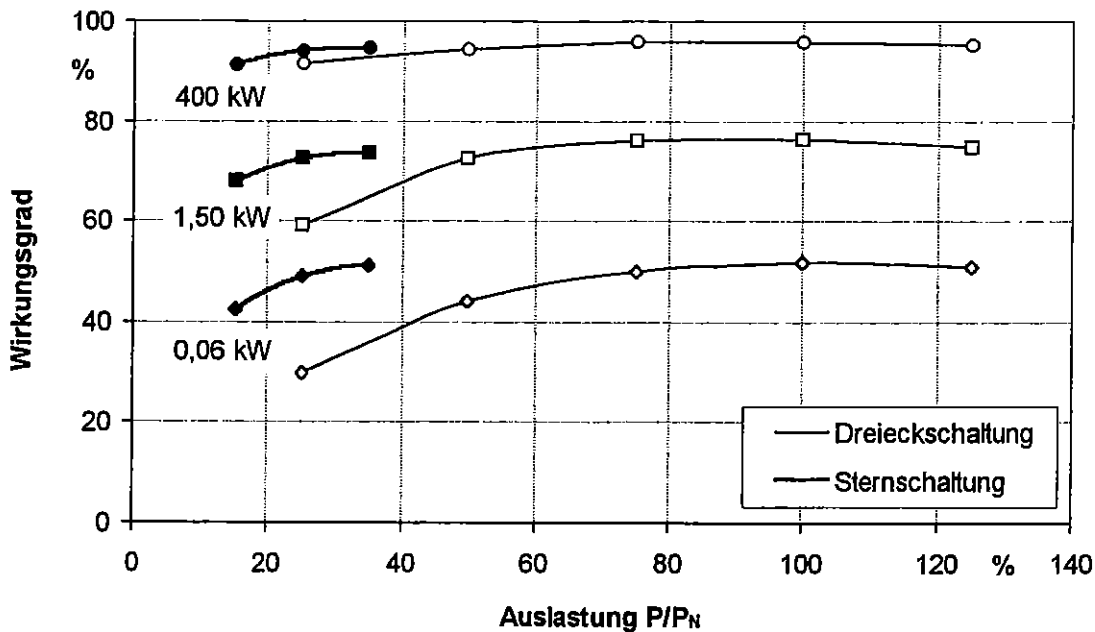


Bild 8-8: Vergleich des Wirkungsgradverlaufes 4-poliger Käfigläufer-ASM unterschiedlicher Leistungsklassen bei einer Stern- und einer Dreieckschaltung

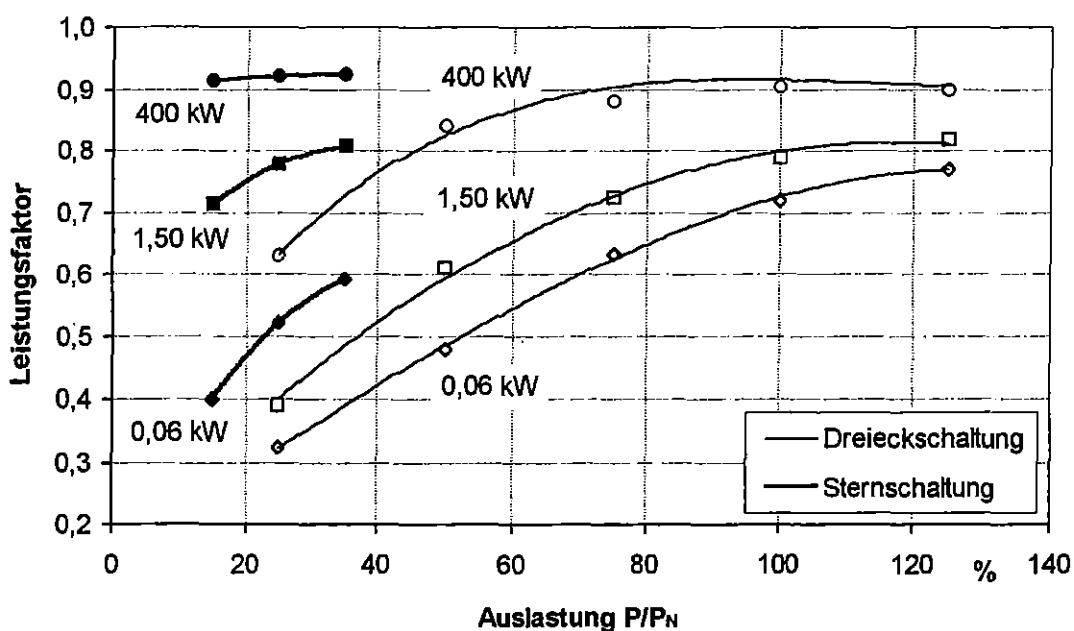


Bild 8-9: Vergleich des Leistungsfaktorverlaufes 4-poliger Käfigläufer-ASM unterschiedlicher Leistungsklassen bei einer Stern- und einer Dreieckschaltung

Bei der Sternschaltung beträgt die Strangspannung nur das $1/\sqrt{3}$ -fache des Nennwertes, d.h. daß sich das Anzugsmoment und der Ständerstrom auf $1/3$ des Betrages bei Dreieckschaltung vermindern. Demzufolge resultieren bei der Sternschaltung im Gegensatz zur Dreieckschaltung bessere Wirkungsgrade und Leistungsfaktoren.

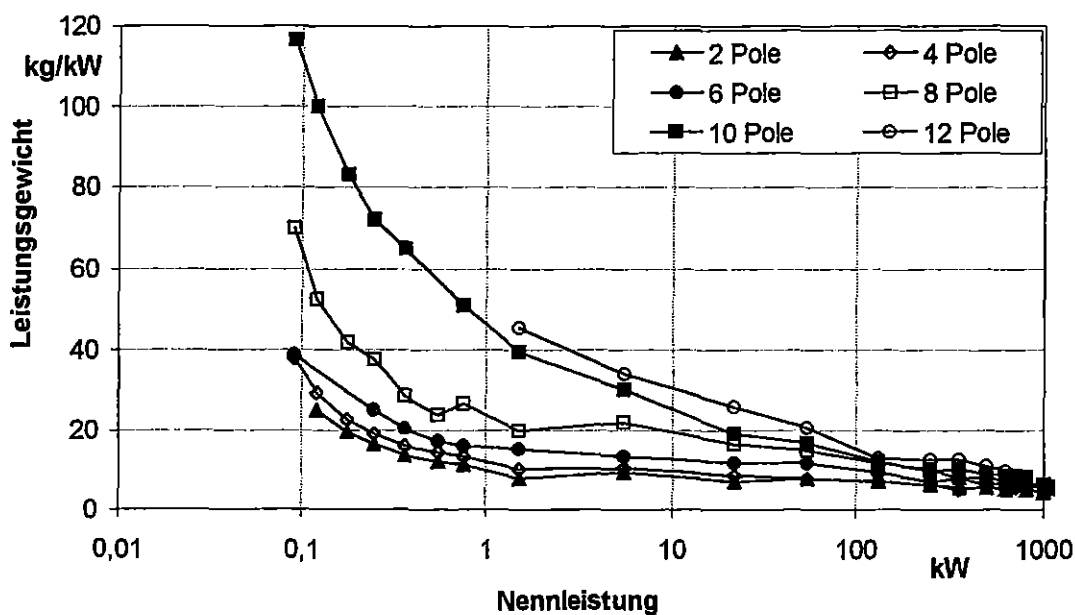


Bild 8-10: Leistungsgewichte von Käfigläufer-ASM in Abhängigkeit von der Polzahl

8.1.3 Leistungsgewichte

In *Bild 8-10* ist der Verlauf des auf die Nennleistung bezogenen Leistungsgewichtes der Käfigläufer-ASM über der Nennleistung in Abhängigkeit von der Polzahl dargestellt. Analog zu den Wachstumsgesetzen nimmt das spezifische Gewicht mit zunehmender Nennleistung bzw. Baugröße bis zu einer Untergrenze von ca. 5 kg/kW hyperbolisch ab. Diese Grenze wird sowohl von kleinen Motoren mit Aluminiumgehäuse bei einer Nennleistung von ca. 20 kW, aber auch von großen Motoren mit Graugußgehäuse bei einer Nennleistung von über 400 kW erreicht. Die Angaben für das Leistungsgewicht von Motoren unterschiedlicher Hersteller wiesen Unterschiede bis zu 10 % auf.

Bei gleicher Leistungsklasse sind oberflächengekühlte Hochspannungsmotoren schwerer als Niederspannungsmotoren, da für die Leiterisolation ein größerer Materialaufwand notwendig ist. Der Übergang zur Innenkühlung ist mit einer deutlichen Gewichtsreduzierung verbunden, da nahezu alle Aufwendungen zur Oberflächenvergrößerung (Kühlrippen etc.) entfallen. Die Wärmeabfuhr erfolgt direkt innerhalb der Maschine über Kühlkanäle. Wegen dieser effektiveren Kühlart können höhere Stromdichten zugelassen werden, wodurch sich eine zusätzliche Gewichtsreduktion durch Einsparung an Leitermaterial einstellt.

Die Polzahl hat einen entscheidenden Einfluß auf das Leistungsgewicht. Der mit der Polzahl steigende konstruktive Mehraufwand und die damit in Verbindung stehende Volumenvergrößerung führt bei gleicher Nennleistung zu einer höheren Masse. Das Gewicht von 2- und 4-poligen Motoren unterscheidet sich allerdings kaum. Bei sehr kleinen Nennleistungen sind 2-polige ASM um etwa 10 % leichter als die 4-poligen Ausführungen. Mit zunehmender Leistungsklasse sind die Gewichtsunterschiede jedoch minimal. Bei gleicher Nennleistung wiegen 6-polige Motoren 10 bis 25 % und 8-polige 40 bis 100 % mehr als die 4-poligen Motoren.

8.1.4 Kosten

In *Bild 8-11* sind die Listenpreise von Käfigläufer-ASM in Abhängigkeit von der Polzahl aufgetragen. Hierbei ist zu beachten, daß die Hersteller üblicherweise einen Rabatt von bis zu 70 % gewähren. Da sich der technische Aufwand einer Motorkonstruktion mit der Polzahl erhöht, steigen mit zunehmender Polzahl auch die Listenpreise. Bei den 2- und 4-poligen Motoren zeigt sich nahezu kein Unterschied im Listenpreis, da der 4-polige Motor in größeren Stückzahlen hergestellt wird.

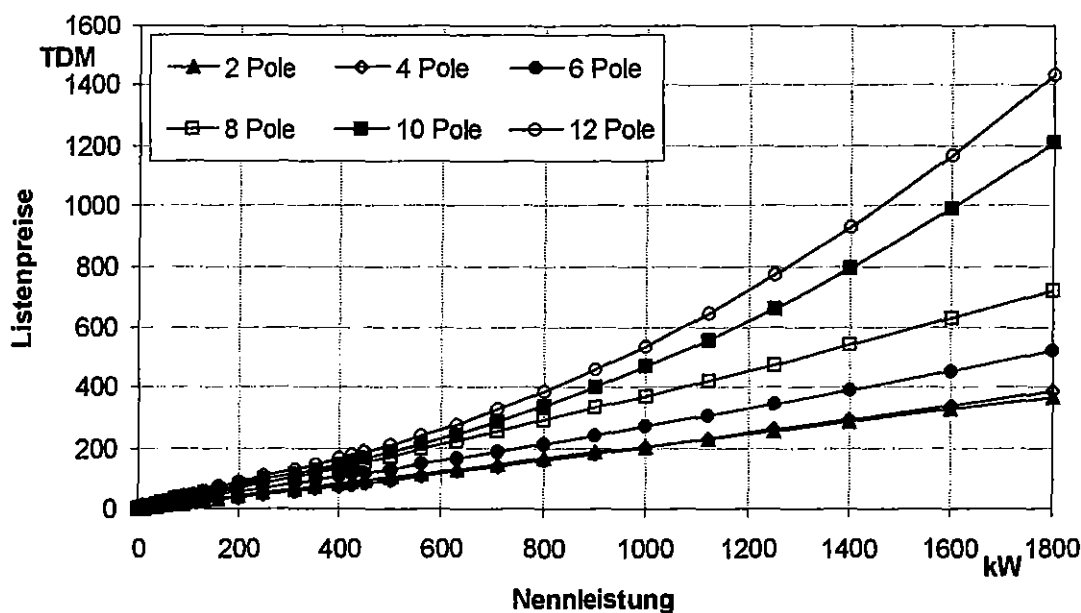


Bild 8-11: Listenpreise von ASM in Abhängigkeit von der Polzahl

Für 2- bis 6-polige Motoren ist ein nahezu linearer Verlauf der Listenpreise über der Nennleistung zu erkennen. Dagegen weisen 8- bis 12-polige ASM eine quadratisch ansteigende Charakteristik der Listenpreise über der Nennleistung auf. Hier schlagen sich unter anderem die Größen der Fertigungsserien nieder (vgl. Bild 8-12).

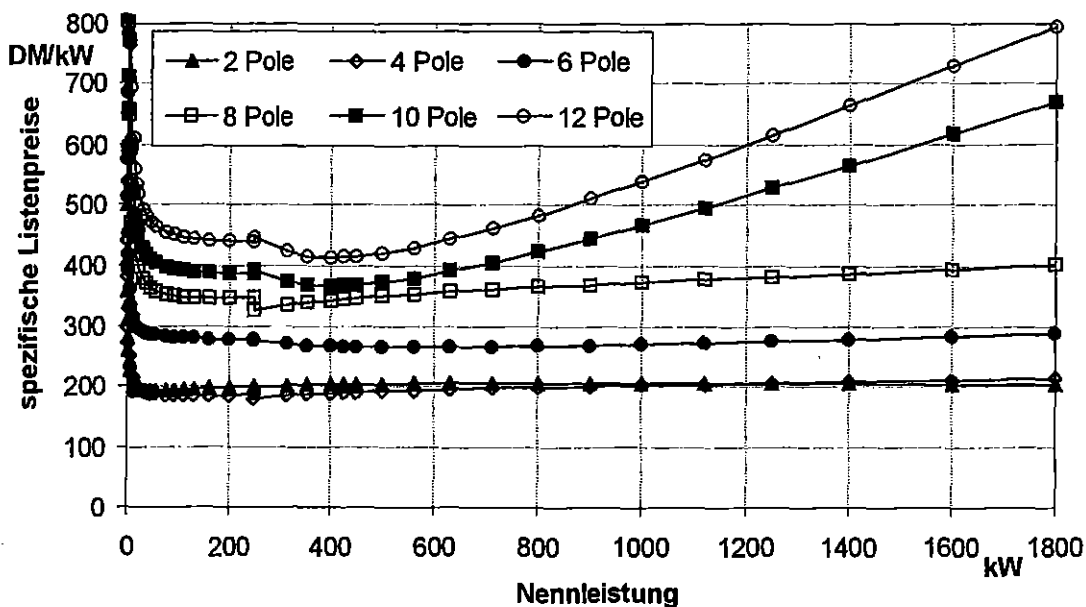


Bild 8-12: Spezifische Listenpreise von ASM in Abhängigkeit von der Polzahl

8.2 Asynchronmotoren am I-Umrichter

Beim gekoppelten Betrieb einer ASM am Umrichter treten zusätzliche Oberwellenverluste auf, die die Belastbarkeit des Motors einschränken. Bei drehzahlabhängiger Kühlung muß bei Konstant-Moment-Antrieben ($M = const.$) das zulässige Nennmoment im unteren Drehzahlbereich reduziert werden, da sonst die auftretenden Stromwärmeverluste nicht ausreichend abgeführt werden können. Bei Strömungsmaschinen-Antrieben ($M \sim n^2$) entfällt dagegen dieses Problem, da bei kleinen Drehzahlen auch die Belastungsmomente und damit die Stromwärmeverluste gering sind. Bei fremdbelüfteten Maschinen tritt kein Kühlungsproblem auf.

8.2.1 Wirkungsgrade

Für die beiden Komponenten Elektromotor und I-Umrichter lassen sich separat die jeweiligen Verluste und damit die zugehörigen Wirkungsgradverläufe angeben. Die Motorwirkungsgrade sind aufgrund überschwingungsbedingter Zusatzverluste im Umrichterbetrieb geringer als beim Betrieb am Netz. Beim I-Umrichter treten zusätzlich Kommutierungsverluste auf. Die Umrichterwirkungsgrade hängen sowohl von der Taktfrequenz als auch von der Belastung ab. Aus der Multiplikation der beiden Komponentenwirkungsgrade resultiert der Gesamtwirkungsgrad des Antriebssystems. Bei Umrichterantrieben steigt analog zum Motor der Wirkungsgrad mit der Leistung an.

In **Bild 8-13** sind die Systemwirkungsgradverläufe von zwei 4-poligen ASM am I-Umrichter für einen Konstant-Moment- sowie einen Strömungsmaschinen-Antrieb über der Frequenz aufgetragen. Der Gesamtwirkungsgrad sinkt für $M = const.$ bei einer Frequenz von 20 Hz je nach Nennleistung auf fast 70 bis 80 % ab. Bei dieser Frequenz werden allerdings nur 20 % der Nennleistung abgegeben. Bei $M \sim n^2$ fällt mit der Frequenz bzw. Drehzahl auch das Moment ab. Insgesamt wird daher bei gleicher Frequenz deutlich weniger Leistung umgesetzt als bei Konstant-Moment-Antrieben, d.h. bei gleicher Drehzahl gerät man stärker in den Teillastbereich. Infolgedessen ist der Wirkungsgrad bei Strömungsmaschinen-Antrieben bei gleicher Drehzahl und Frequenz schlechter.

In **Bild 8-14** sind bei $M = const.$ die Teillastwirkungsgrade einer Käfigläufer-ASM am I-Umrichter aufgetragen. Die Wirkungsgrade sind für Drehmomentverhältnisse M/M_{zul} von 1/4, 2/4, 3/4 und 4/4 angegeben, wobei das zulässige Drehmoment M_{zul} für einen angenommenen Drehzahlstellbereich von 1/10 gilt ($M_{zul}/M_N = 0,79$). Die abgegebene Leistung nimmt proportional mit der Drehzahl bzw. mit der Frequenz zu. Oberhalb $M/M_{zul} = 2:4$ liegen die Wirkungsgradlinien bei dieser Antriebsart sehr eng zusammen. Der Teillastbetrieb bringt also keine großen Wirkungsgradeinbußen bei einem Konstant-Moment-Antrieb. Erst bei $M/M_{zul} = 1/4$ ist ein Wirkungsgradabfall von mehreren Prozentpunkten zu verzeichnen.

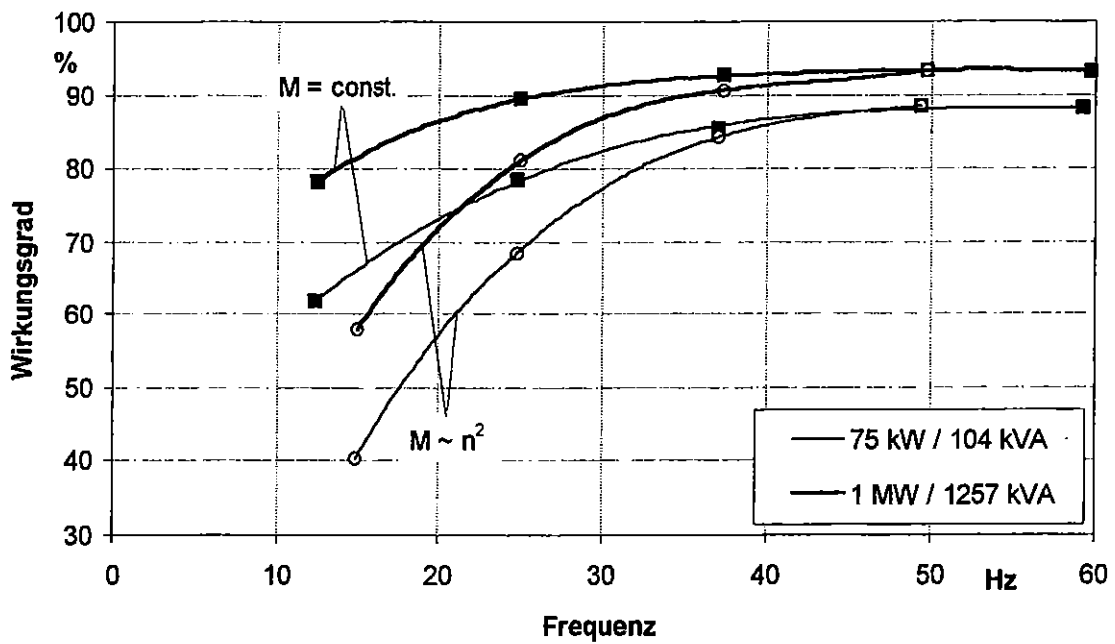


Bild 8-13: Wirkungsgradverlauf zweier 4-poliger Käfigläufer-ASM mit I-Umrichter für unterschiedliche Lastfälle

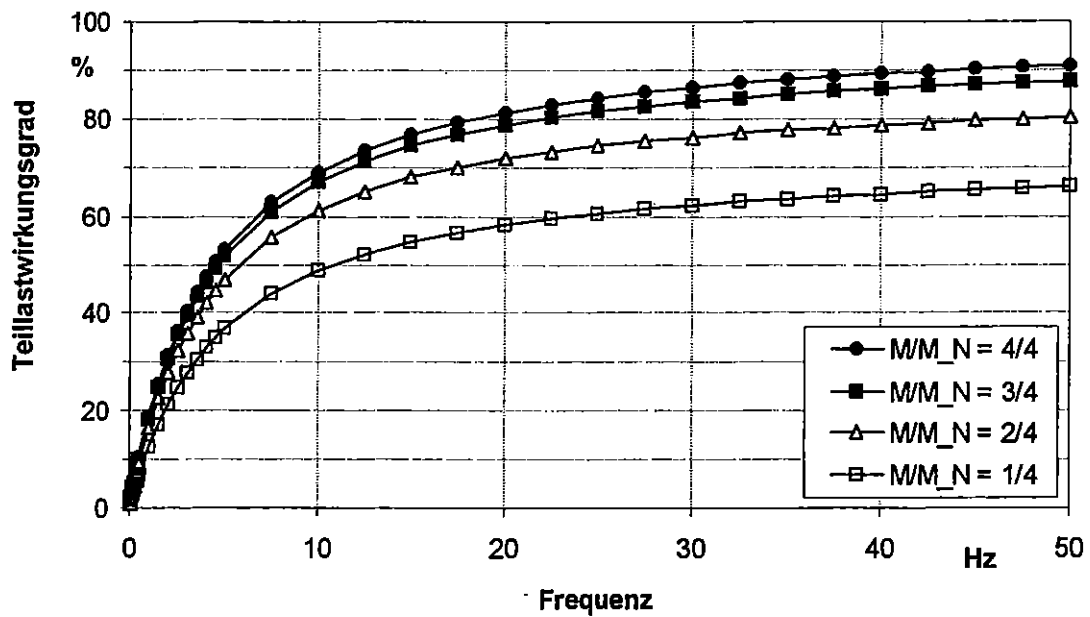


Bild 8-14: Teillastwirkungsgrade einer 4-poligen Käfigläufer-ASM (250 kW) am I-Umrichter für $M = \text{const.}$

Für eine ASM mit einer Nennleistung von 250 kW ist ein I-Umrichter mit einer Nennleistung von 328 kVA erforderlich. In **Bild 8-15** sind die Teillastwirkungsgrade für die entsprechenden Drehmomentverhältnisse aufgetragen. Die Verluste steigen etwa linear mit der Frequenz und

nehmen ungefähr proportional mit der abgegebenen Leistung zu, die ihrerseits linear mit der Frequenz wächst. Im Gegensatz zu den Motorwirkungsgraden sinken die Umrichterwirkungsgrade bei Drehzahlabenkung von 50 Hz bis zu 20 Hz um etwa 10 % ab.

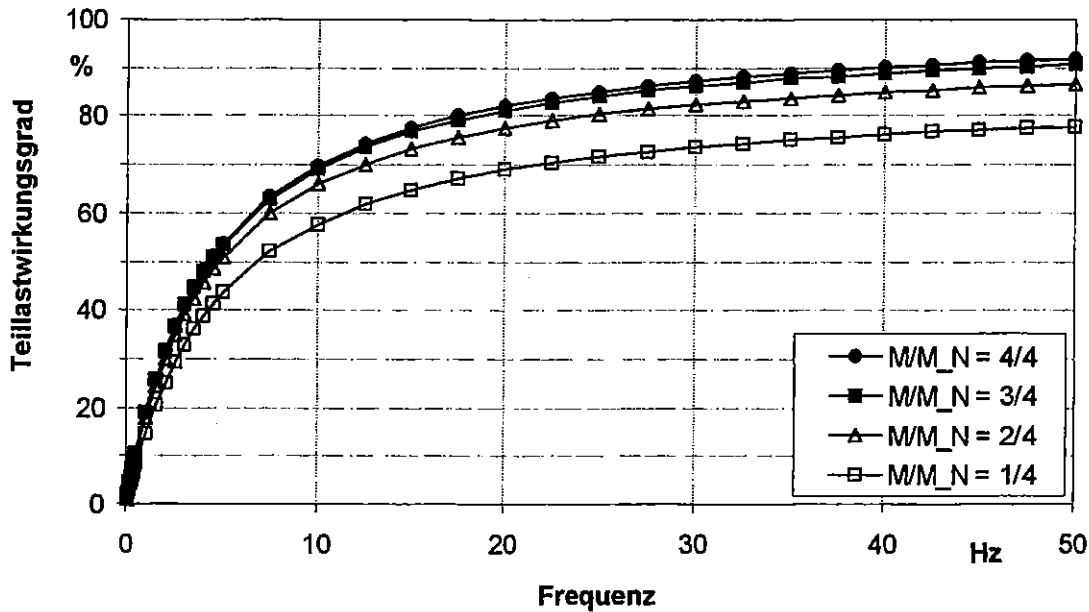


Bild 8-15: Teillastwirkungsgrade eines I-Umrichters (328 kVA) für $M = const.$

In **Bild 8-16** sind die Systemwirkungsgrade der ASM mit I-Umrichter für $M = const.$ und $M \sim n^2$ dargestellt. Die Teillastwirkungsgrade des Motors hängen im Gegensatz zum I-Umrichter relativ gering von der Frequenz ab. Bei den Wirkungsgraden des Gesamtantriebs stellt sich zu kleineren Drehzahlen hin (von 50 Hz auf 20 Hz) ein Rückgang von mehr als 10 % ein. Entsprechend dem Frequenzverhältnis beträgt die Leistungsabgabe bei 20 Hz allerdings nur noch 20 % des Ausgangswertes.

Wegen der Strömungsmaschinen-Charakteristik gelangt der Motor stärker in den Teillastbereich (vgl. Bild 8-16). Als Folge daraus fällt der Wirkungsgrad mit sinkender Drehzahl stärker ab als beim Konstant-Moment-Antrieb. Eine Überdimensionierung des Antriebes führt im unteren Drehzahlbereich zu erheblichen Wirkungsgradeinbußen. Bei Strömungsmaschinen-Antrieben ist somit stärker als bei Konstant-Moment-Antrieben auf eine optimale Dimensionierung zu achten.

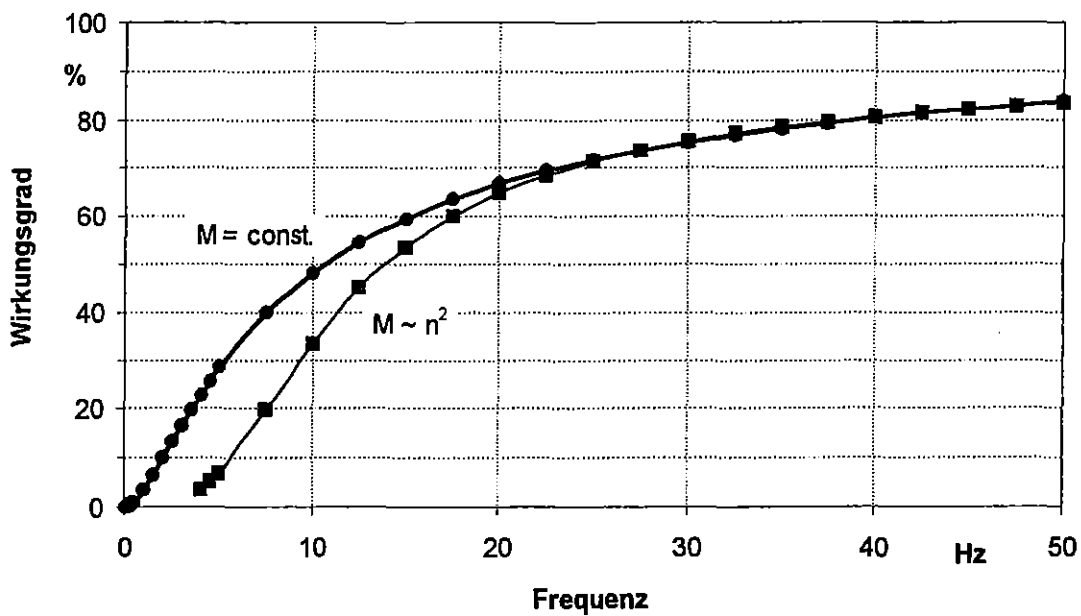


Bild 8-16: Wirkungsgradverlauf einer 4-poligen Käfigläufer-ASM (250 kW) mit I-Umrichter (328 kVA) für unterschiedliche Lastfälle ($M/M_N = 4/4$)

8.2.2 Kosten

Bei elektrischen Antrieben sind relativ hohe Rabattfaktoren üblich, die in erster Linie von der Stückzahl abhängen. Die Gesamtkosten sind aus den Einzelkosten der Hauptkomponenten Motor und Umrichter zu ermitteln. Hierbei wird mit einem mittleren Rabattsatz von 70 % für ASM und 25 % aller anderen Antriebskomponenten gerechnet.

In **Bild 8-17** sind die Nettopreise (Listenpreise abzüglich Rabatt) von 4-poligen Käfigläufer-ASM mit I-Umrichter in Abhängigkeit von der Nennleistung dargestellt. Während die Motorpreise annähernd linear von der Nennleistung abhängen, treten beim I-Umrichter bauart- und baugrößenbedingte Sprünge auf, die sich entsprechend in den Gesamtpreisen der Antriebssysteme niederschlagen. Umrichter sind teilweise wesentlich teurer als die Motoren.

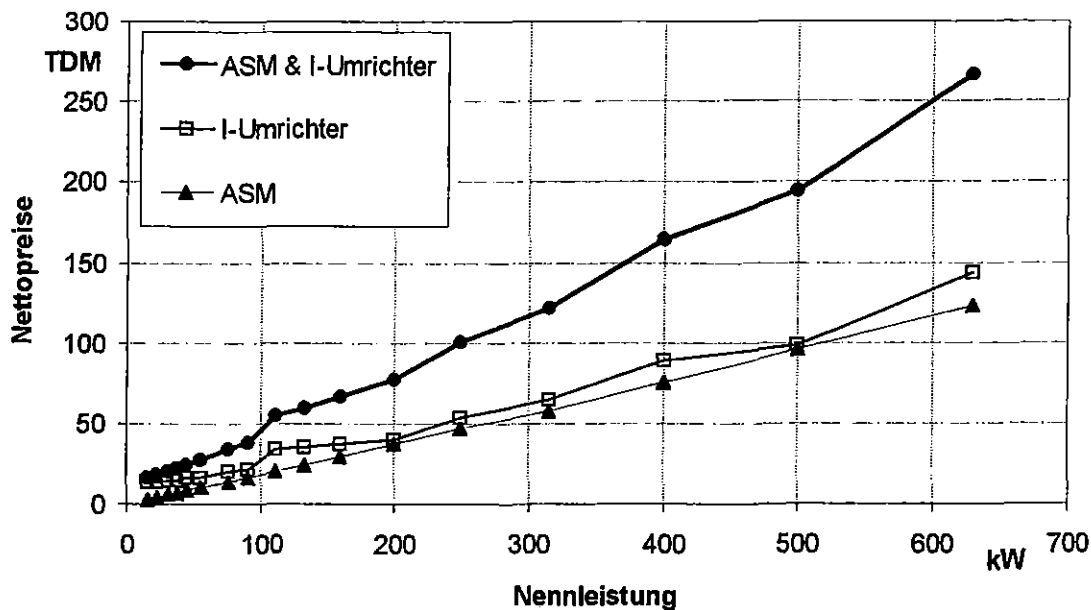


Bild 8-17: Nettopreise von ASM (4-polig) mit I-Umrichter in Abhängigkeit von der Nennleistung

8.3 Asynchronmotoren am Pulswechselrichter

Da der Pulswechselrichter keine rein sinusförmige Spannung liefert, treten im Motor analog zum I-Umrichter ebenfalls Zusatzverluste durch Oberschwingungen auf. Allerdings entfallen beim Spannungszwischenkreis die Kommutierungsverluste. Die zulässigen Leistungen sind daher für gleiche Drehzahlstellbereiche grundsätzlich höher als im Betrieb am I-Umrichter. Für Strömungsmaschinen-Antriebe braucht die Leistung bis 250 kW nicht eingeschränkt werden. Bei Konstant-Moment-Antrieben ist die erforderliche Leistungsreduktion wie bei I-Umrichtern vom Drehzahlbereich abhängig, wenn der Motor eine drehzahlabhängige Kühlung besitzt.

8.3.1 Wirkungsgrade

In Bild 8-18 ist der Wirkungsgradverlauf eines Antriebssystems aus ASM und Pulswechselrichter für einen Konstant-Moment- sowie einen Strömungsmaschinen-Antrieb über der Frequenz aufgetragen. Wie bereits erklärt wurde, wird bei $M \sim n^2$ und gleicher Frequenz deutlich weniger Leistung umgesetzt als bei Konstant-Moment-Antrieben, d.h. bei gleicher Drehzahl gerät man stärker in den Teillastbereich. Infolgedessen ist der Wirkungsgrad bei Strömungsmaschinen-Antrieben im gleichen Betriebspunkt schlechter. Bei hohen Leistungen ist das Wirkungsgradniveau erwartungsgemäß höher.

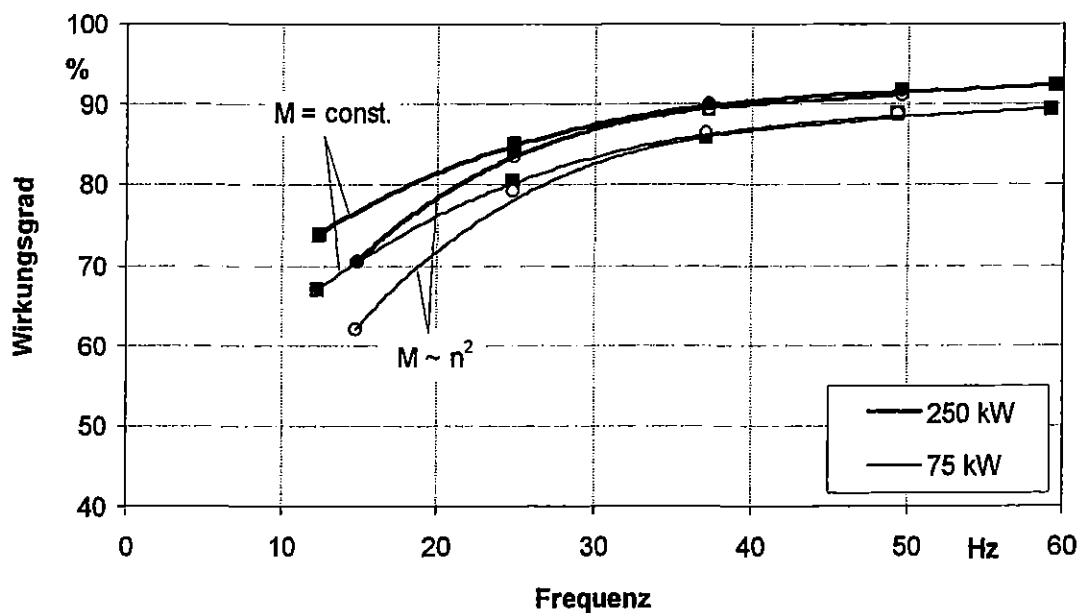


Bild 8-18: Wirkungsgradverlauf 4-poliger Käfigläufer-ASM mit Pulswechselrichter für unterschiedliche Lastfälle

Die Wirkungsgradverläufe von Strömungsmaschinen-Antrieben sind geprägt durch den Verlauf der abgegebenen Leistung über der Frequenz, die ausgehend vom Nennpunkt bei 50 Hz mit der 3. Potenz abnimmt. Dies bedeutet im Vergleich zum Konstant-Moment-Antrieb (lineare Abnahme der Leistung über der Frequenz) für gleiche Drehzahlen bzw. Frequenzen wesentlich geringere Auslastungen von Motor und Umrichter und damit des Gesamtantriebs. So ist der Antriebswirkungsgrad bei Drehzahlabenkung bereits bei 20 Hz auf etwa 70 % abgesunken.

Aufgrund des höheren Leistungsniveaus - Motornennleistung 250 kW statt 75 kW - wird auch ein entsprechend höheres Wirkungsgradniveau erreicht. Bei 30 Hz liegt der Wirkungsgrad immerhin noch bei ca. 85 %.

In **Bild 8-19** sind beispielhaft die Teillastwirkungsgrade eines Antriebssystems aus ASM und Pulswechselrichter für Konstant-Moment-Betrieb aufgetragen. Im ganzen Drehzahlbereich liegen die Wirkungsgrade für die Drehmomentverhältnisse M/M_N von $4/4$ und $3/4$ sehr eng zusammen. Erst bei weiterer Momentenabsenkung ($M/M_N = 2/4$ bzw. $1/4$) wird ein lastabhängiger Einfluß spürbar. Bei kleinen Drehzahlen sinken alle Wirkungsgrade stark ab. Bei einer Frequenz von 10 Hz ist nur mit einem relativ geringem Wirkungsgrad von 65 % zu rechnen, während zwischen 20 Hz und 50 Hz relativ hohe Wirkungsgrade erreicht werden.

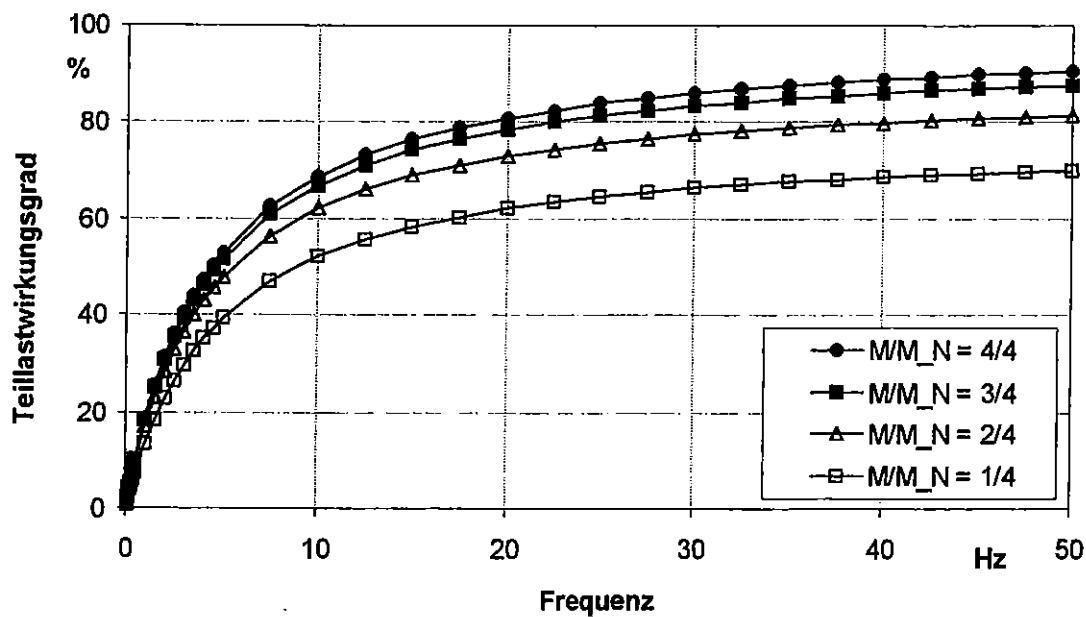


Bild 8-19: Teillastwirkungsgrade einer Käfigläufer-ASM (250 kW) am Pulswechselrichter für $M = \text{const.}$

Die Teillastwirkungsgrade von Pulswechselrichtern hängen ebenfalls sowohl vom Moment als auch von der Frequenz ab (vgl. Bild 8-20). Auch hier werden in einem weiten Frequenzbereich hohe Wirkungsgrade erreicht, wenn das Lastmoment mindestens die Hälfte des Nennmomentes beträgt. Bei kleinerer Last sinkt der Wirkungsgrad stärker ab.

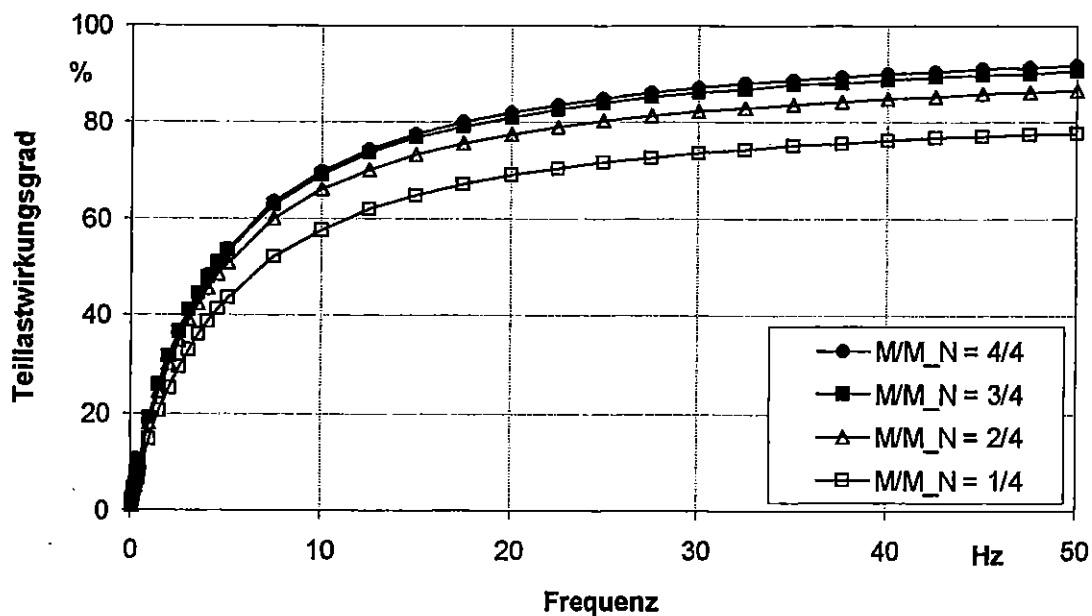


Bild 8-20: Teillastwirkungsgrade eines Pulswechselrichters (328 kVA) für $M = \text{const.}$

8.3.2 Kosten

In *Bild 8-21* sind die Kosten von Käfigläufer-ASM mit Frequenzumrichter unter Berücksichtigung handelsüblicher Rabatte aufgetragen.

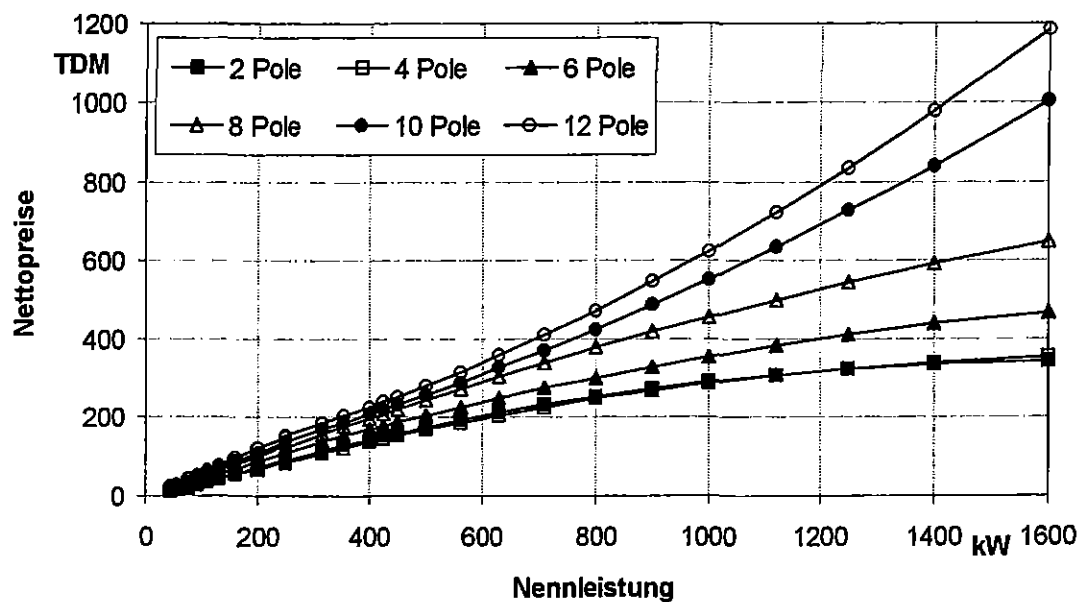


Bild 8-21: Nettopreise (Listenpreise abzügl. Rabatt) von Käfigläufer-ASM mit Frequenzumrichter

8.4 Synchronmotoren

8.4.1 Wirkungsgrade

In *Bild 8-22* ist der Verlauf des Nennwirkungsgrades von fremderregten Synchronmaschinen in Abhängigkeit von der Polzahl über der Nennleistung dargestellt. Mit zunehmender Polzahl erhöhen sich das Volumen und die Masse der Maschine. Dies bewirkt eine Zunahme der Eisenverluste sowie der magnetischen Streuung, so daß sich der Wirkungsgrad vermindert.

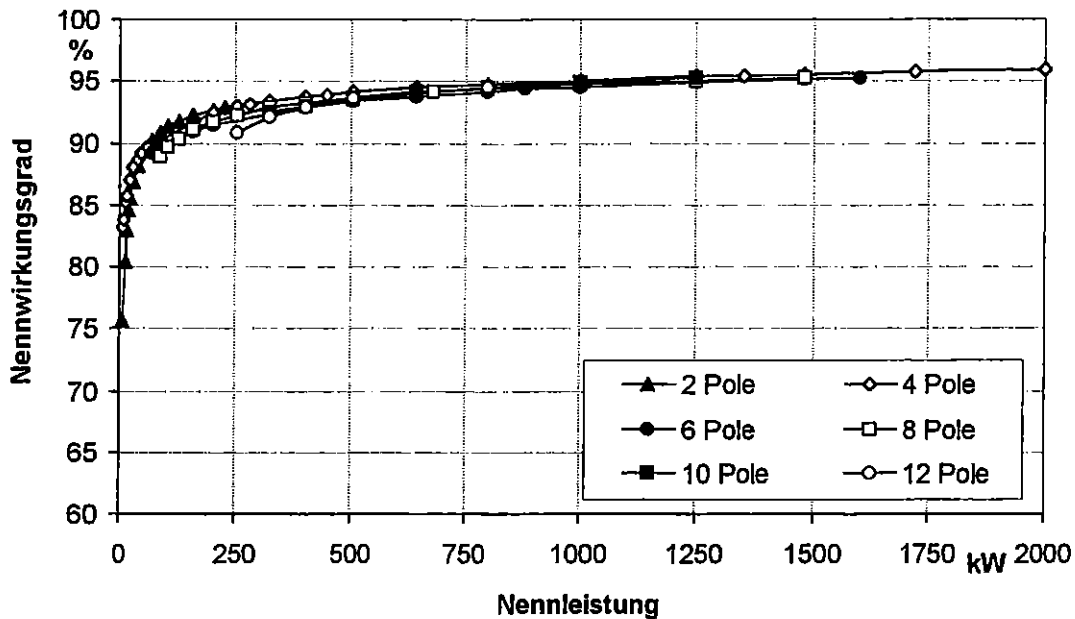


Bild 8-22: Nennwirkungsgradverlauf von fremderregten Synchronmaschinen in Abhängigkeit von der Polzahl

8.4.2 Leistungsgewichte

Analog zur ASM ergeben sich für die fremderregten Synchronmaschinen qualitativ ähnliche Verläufe des auf die Nennleistung bezogenen Leistungsgewichtes in Abhängigkeit von der Polzahl (vgl. *Bild 8-23*). Bei gleicher Nennleistung nimmt mit steigender Polzahl das Maschinenvolumen zu. Außerdem nimmt das Leistungsgewicht bei unveränderter Polzahl mit steigender Nennleistung bis zu einer Untergrenze ab.

8.4.3 Kosten

In *Bild 8-24* sind die Listenpreise der fremderregten SM über der Nennleistung in Abhängigkeit von der Polzahl dargestellt. Bei einer höheren Polzahl ist ein zusätzlicher Konstruktionsaufwand notwendig, was sich im Preis niederschlägt. Zwischen den 2- und 4-poligen Motoren

ist kein Unterschied im Listenpreis zu verzeichnen, da der 4-polige Motor in größeren Stückzahlen hergestellt wird.

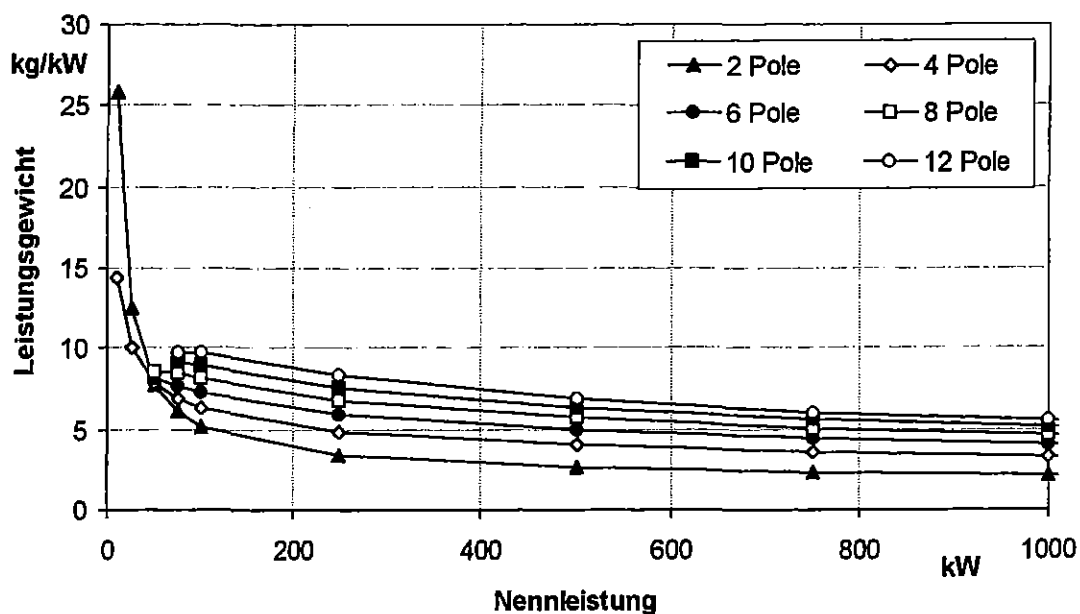


Bild 8-23: Leistungsgewichte von fremderregten SM in Abhängigkeit von der Polzahl

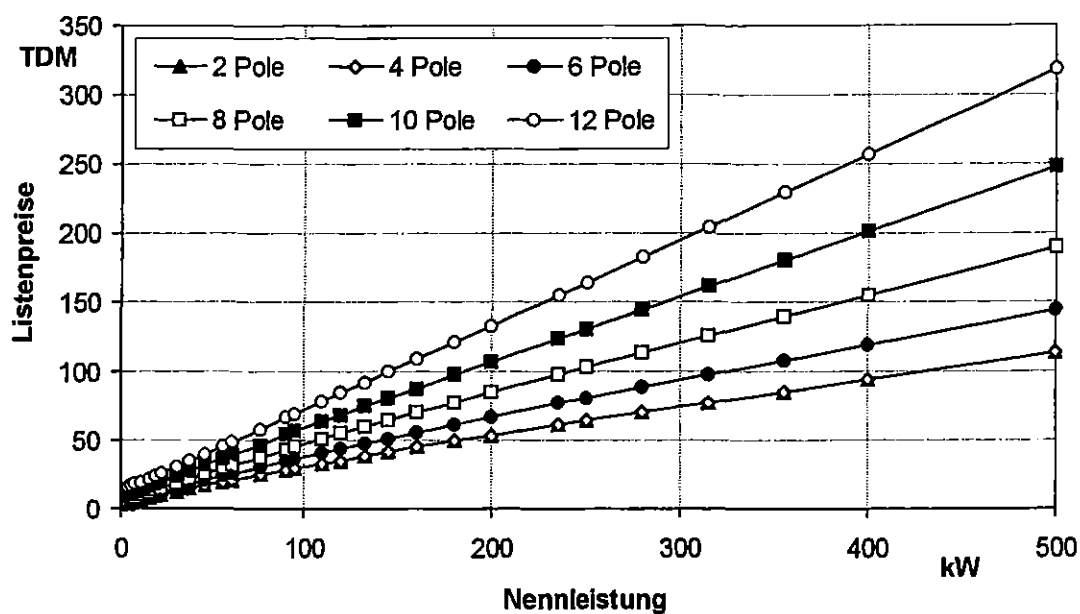


Bild 8-24: Kosten (Listenpreise) von SM in Abhängigkeit von der Polzahl

8.5 Synchronmotoren am I-Umrichter

Beim Betrieb der SM am I-Umrichter ergeben sich qualitativ ähnliche Verläufe der systembeschreibenden Größen wie bei der ASM.

8.5.1 Wirkungsgrade

In **Bild 8-25** sind die Systemwirkungsgradverläufe von zwei 4-poligen SM am I-Umrichter für einen Konstant-Moment- sowie einen Strömungsmaschinen-Antrieb über der Frequenz abgebildet. Bei $M \sim n^2$ ergibt sich ein schlechteres Teillastverhalten im Vergleich zu $M = const.$, da hier mit der Drehzahl bzw. Frequenz auch das Moment abfällt. Der Gesamtwirkungsgrad ist daher bei Strömungsmaschinen-Antrieben im gleichen Betriebspunkt niedriger.

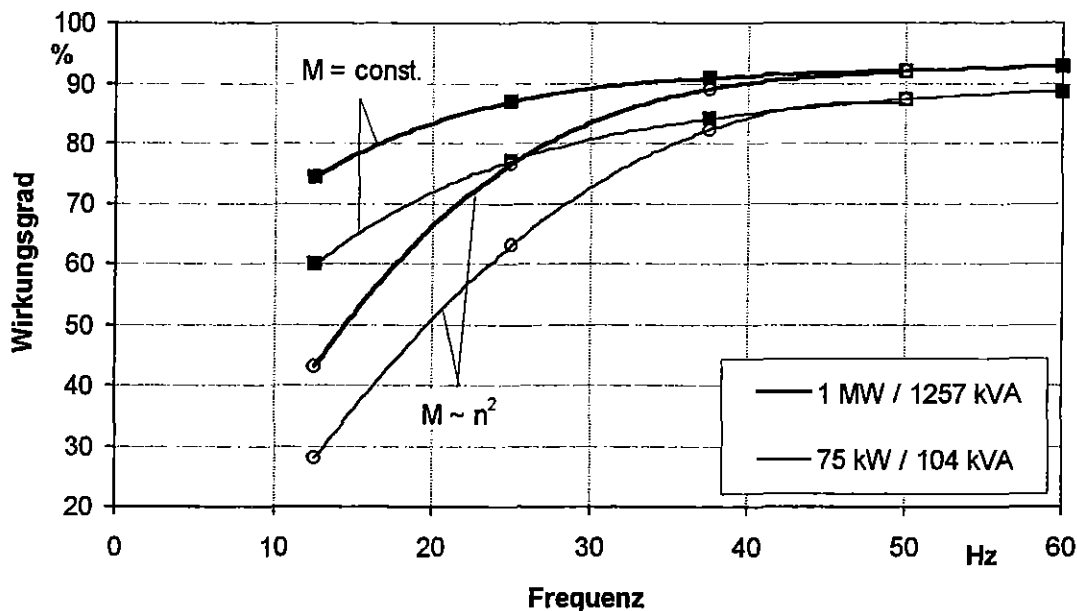


Bild 8-25: Wirkungsgradverläufe von fremderregten SM mit I-Umrichter für $M = const.$ und $M \sim n^2$ im Vergleich

In **Bild 8-26** sind für $M = const.$ die Teillastwirkungsgrade einer SM am I-Umrichter für unterschiedliche Drehmomentenverhältnisse dargestellt. Oberhalb von $M/M_{zul} = 3/4$ sind bei einem Konstant-Moment-Antrieb nur geringe Unterschiede zwischen den Wirkungsgradlinien zu verzeichnen. Ab $M/M_{zul} = 2/4$ fällt der Wirkungsgrad dagegen um mehrere Prozentpunkte ab.

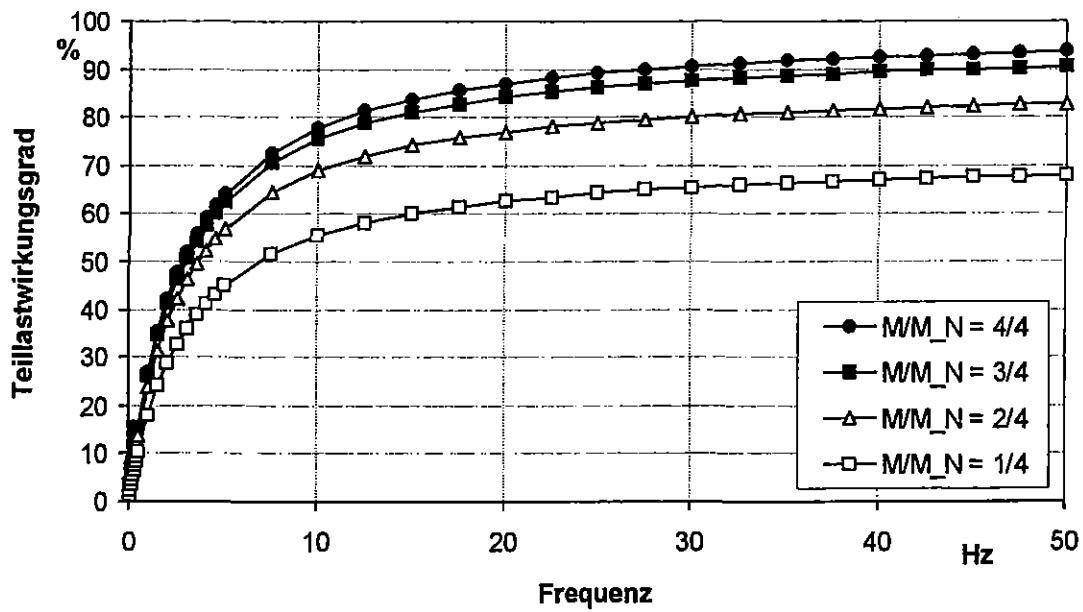


Bild 8-26: Teillastwirkungsgrade einer fremderregten SM mit I-Umrichter für $M = \text{const.}$

Ähnliche Verhältnisse ergeben sich für Strömungsmaschinen-Antriebe (vgl. **Bild 8-27**). Außerdem gelangt der Motor bei dieser Antriebsart wegen der zusätzlichen Abnahme des Momentes mit der Frequenz stärker in den Teillastbereich.

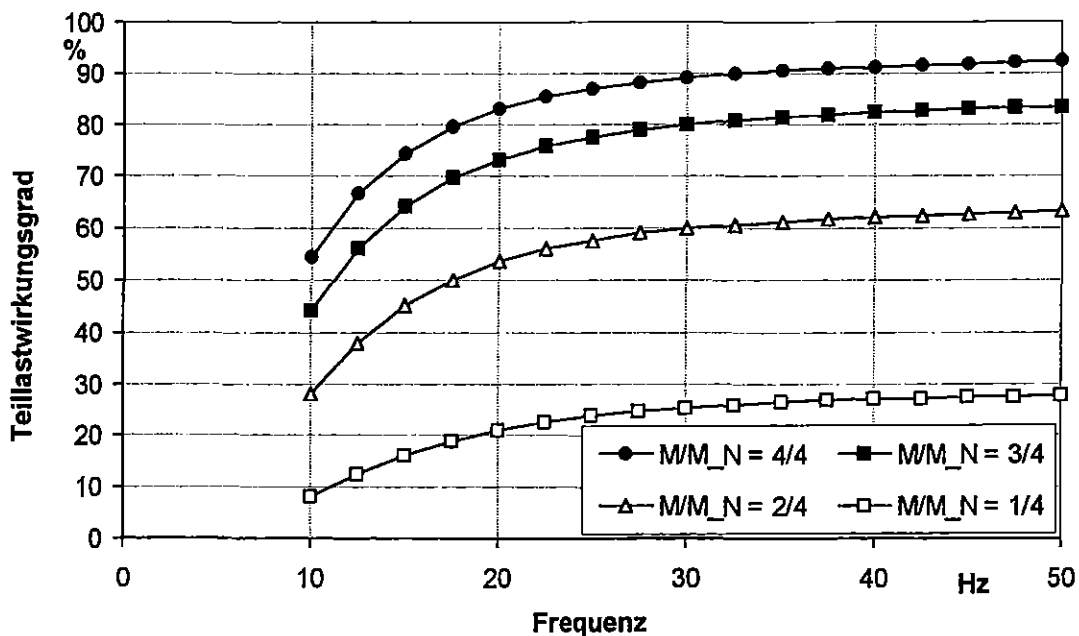


Bild 8-27: Teillastwirkungsgrade einer fremderregten SM mit I-Umrichter für $M \sim n^2$

8.5.2 Kosten

In *Bild 8-28* sind die Nettopreise von SM mit I-Umrichter über der Nennleistung in Abhängigkeit von der Polzahl aufgetragen. Die Preise des Antriebes steigen annähernd linear mit der Nennleistung. Ebenfalls nehmen sie mit der Polzahl aufgrund des höheren Konstruktionsaufwandes stark zu. Bei den 2- und 4-poligen Antrieben ist kein Preisunterschied zu verzeichnen, da der 4-polige Motor in größeren Stückzahlen hergestellt wird.

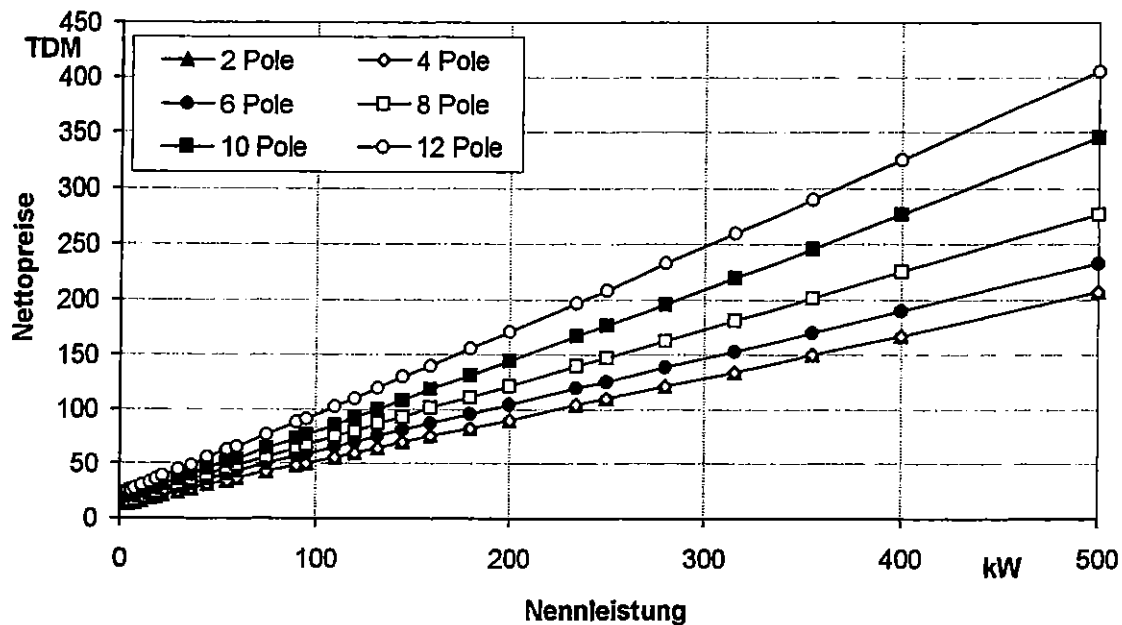


Bild 8-28: Nettopreise von fremderregten SM mit I-Umrichtern in Abhängigkeit von der Polzahl

8.6 Synchronmotoren am Pulswechselrichter

8.6.1 Wirkungsgrade

In *Bild 8-29* bzw. *Bild 8-30* sind Wirkungsgrad- bzw. Teillastwirkungsgradverläufe eines Antriebssystems aus SM und Pulswechselrichter für einen Konstant-Moment- und einen Strömungsmaschinen-Antrieb über der Frequenz dargestellt. Es ergeben sich vergleichbare Verläufe wie bei der ASM mit Pulswechselrichter.

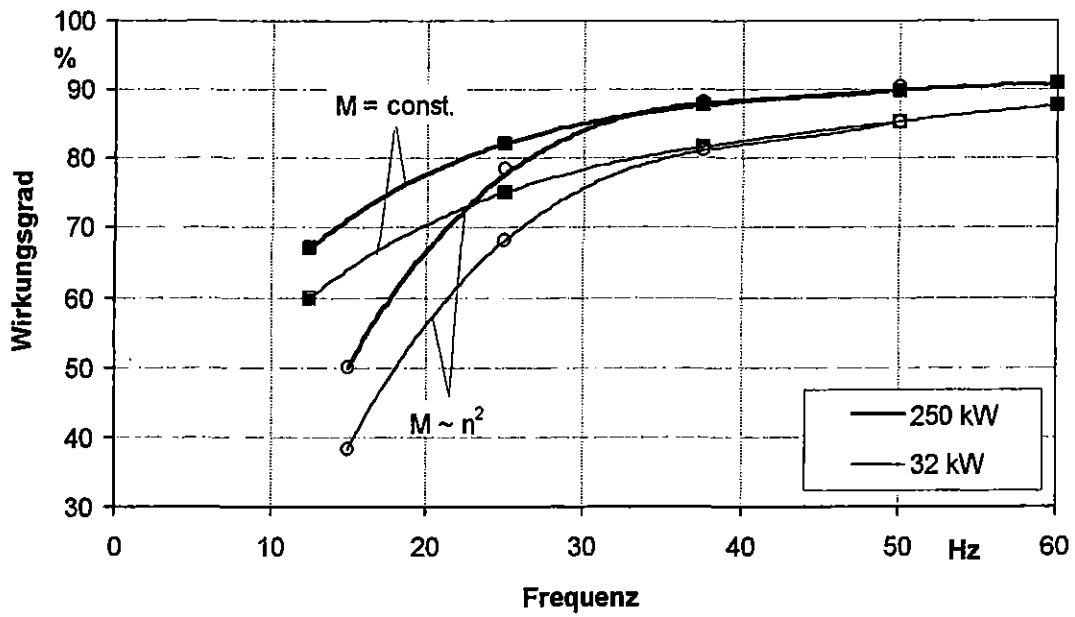


Bild 8-29: Wirkungsgradverlauf zweier fremderregter SM mit Pulswechselrichter für $M = \text{const.}$ und $M \sim n^2$ im Vergleich

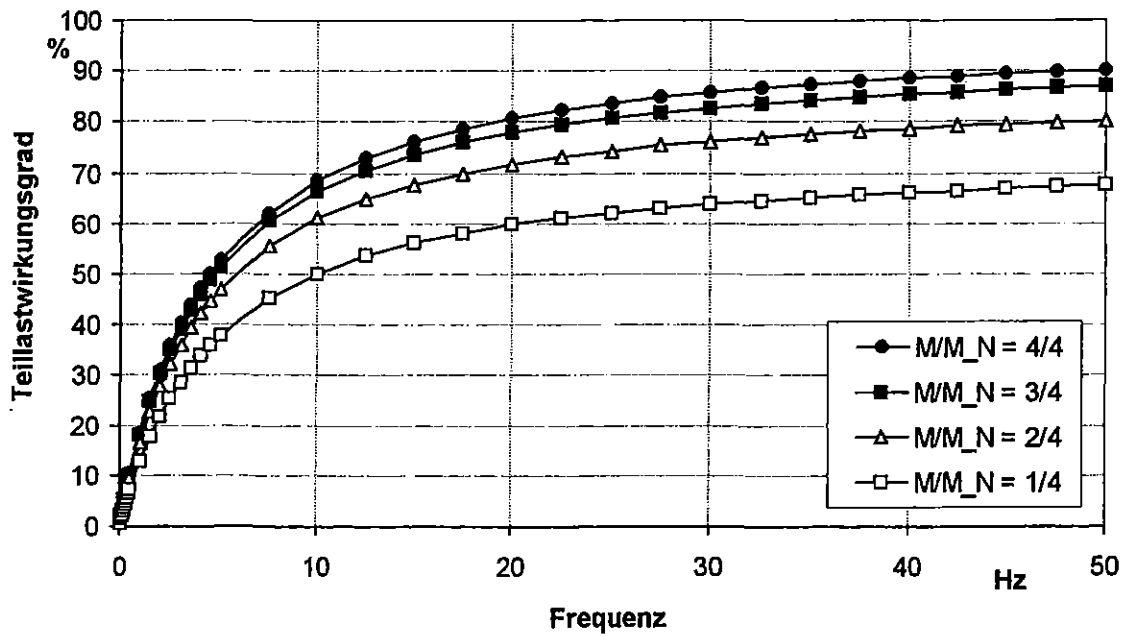


Bild 8-30: Teillastwirkungsgrade einer fremderregten SM (250 kW) mit Pulswechselrichter für $M = \text{const.}$

8.6.2 Kosten

Das *Bild 8-31* zeigt die Listenpreise von SM mit Pulswechselrichter unter Berücksichtigung handelsüblicher Rabatte über der Nennleistung in Abhängigkeit von der Polzahl.

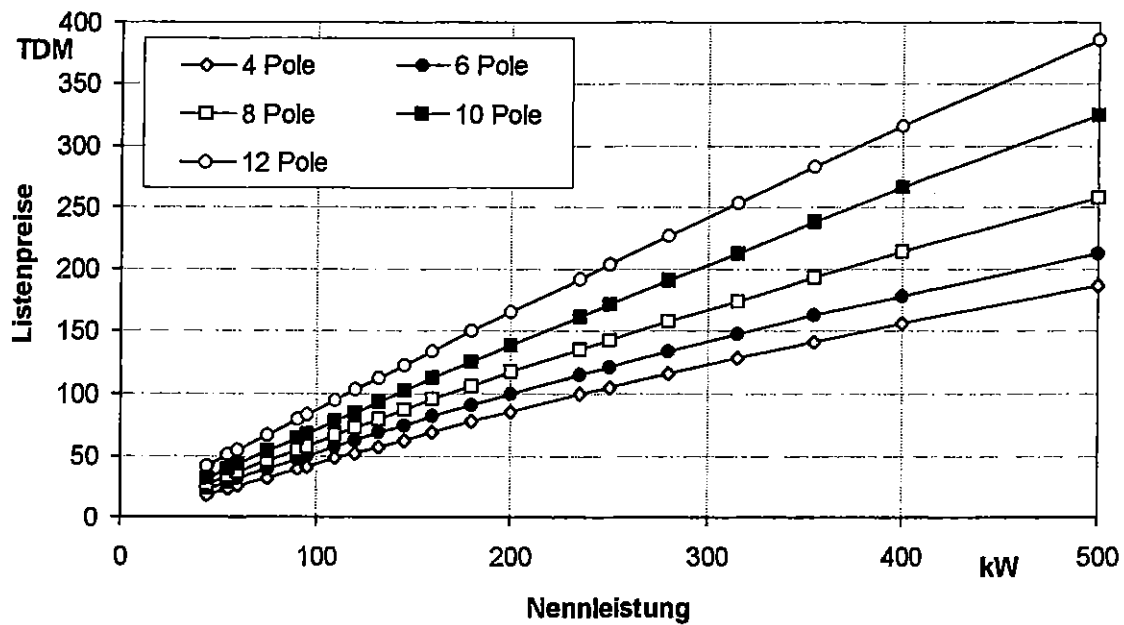


Bild 8-31: Preise von fremderregten SM mit Frequenzumrichter (Listenpreise abzügl. Rabatt)

8.7 Gleichstrommotoren

8.7.1 Wirkungsgrade

In *Bild 8-32* ist der Verlauf des Nennwirkungsgrades der GSM über der Nennleistung in Abhängigkeit von der Nenndrehzahl dargestellt. Die Wirkungsgrade von Gleichstrommotoren bewegen sich im abgebildeten Leistungsbereich zwischen 60 und 94%. Mit zunehmender Nenndrehzahl, d.h. kleinerer Polpaarzahl, vermindern sich die Maschinenverluste (vgl. ASM), so daß sich bessere Nennwirkungsgrade einstellen.

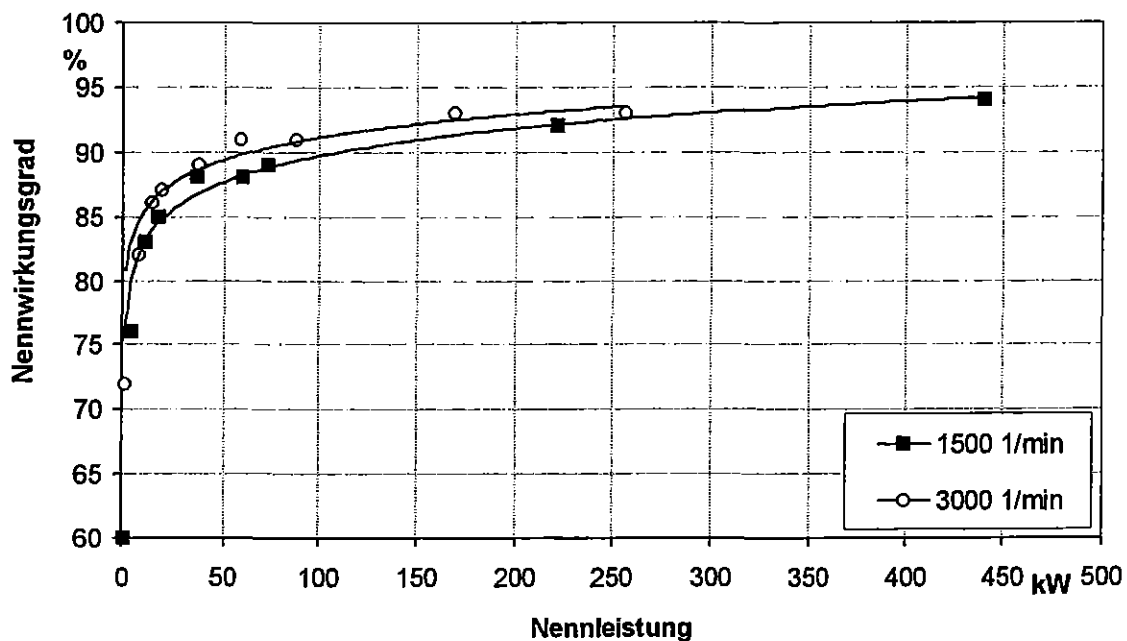


Bild 8-32: Nennwirkungsgradverlauf von GSM in Abhängigkeit von der Nenndrehzahl

8.7.2 Leistungsgewichte

Das Gewicht von GSM weist mit zunehmender Nennleistung einen degressiven Verlauf auf. Mit sinkender Nenndrehzahl, d.h. höherer Polpaarzahl, nimmt das Gewicht der GSM zu, da sich auch hier der konstruktive Mehraufwand für die höhere Pol- und Ankerleiterzahl bemerkbar macht. Im unteren Leistungsbereich (< 50 kW) sinken die Leistungsgewichte mit steigender Nennleistung stark ab. Dagegen ist im Bereich über 50 kW nur noch eine geringe Abnahme des Leistungsgewichtes erkennbar (vgl. *Bild 8-33*).

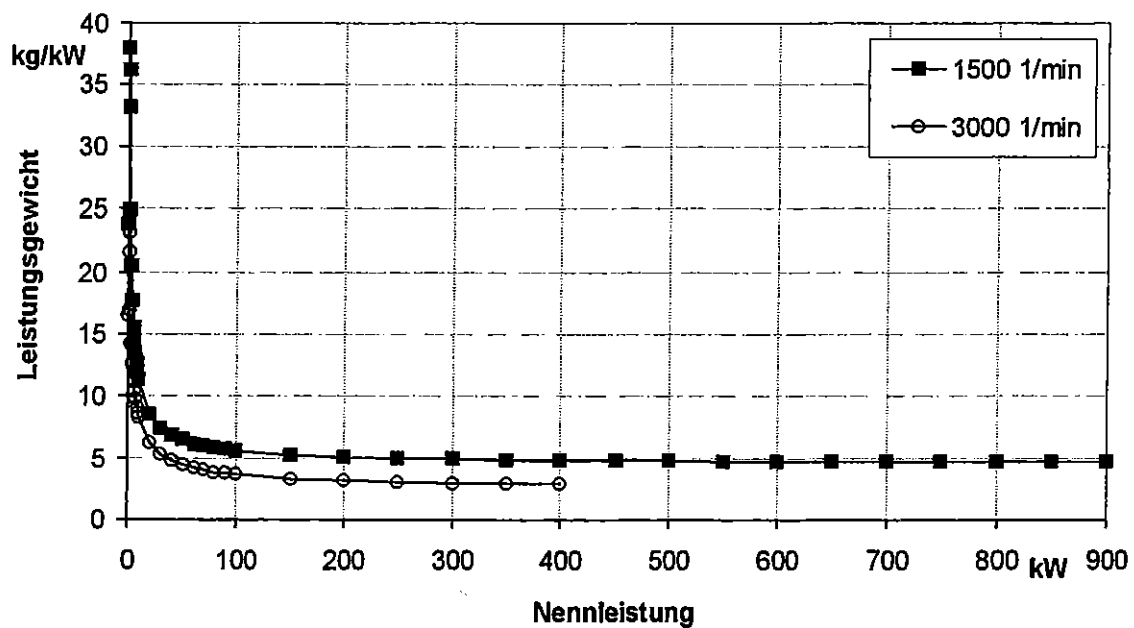


Bild 8-33: Leistungsgewichte von GSM in Abhängigkeit von der Nenndrehzahl

8.7.3 Kosten

Die Preise von GSM wachsen annähernd linear mit der Nennleistung an (vgl. Bild 8-34).

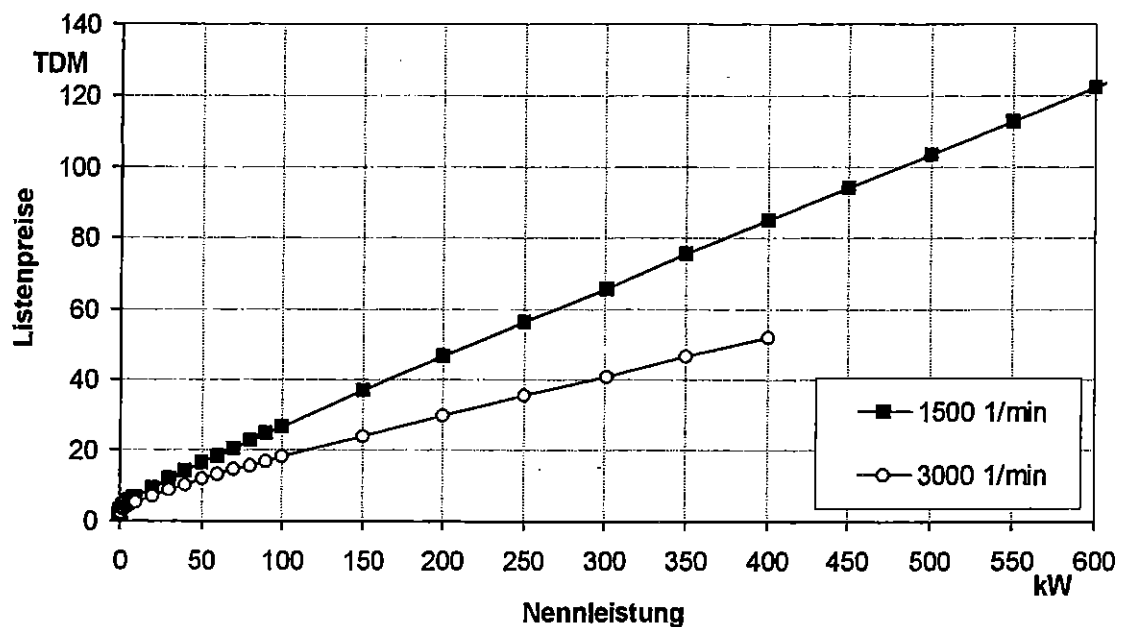


Bild 8-34: Listenpreise von GSM in Abhängigkeit von der Nennleistung

Bei niedrigen Nenndrehzahlen ist wegen der erforderlichen höheren Polzahl zusätzlicher Konstruktionsaufwand nötig, der sich in den Kosten der Maschine niederschlägt. GSM mit einer Nenndrehzahl von 1.500 min^{-1} sind oberhalb 50 kW deutlich teurer als GSM mit einer Nenndrehzahl von 3.000 min^{-1} . Bei GSM wird üblicherweise ein Rabatt von ca. 25 % gewährt.

8.8 Gleichstrommotoren am Stromrichter

8.8.1 Wirkungsgrade

Die Stromrichterverluste setzen sich aus den Verlusten der Halbleiterventile sowie dem Energieaufwand für die Elektronik und die Lüfter zusammen. Diese Verluste sind in ihrer Gesamtheit allerdings sehr gering, so daß generell von Stromrichterwirkungsgraden von bis zu 97 % ausgegangen werden kann. Die Nennwirkungsgrade von GSM gelten im allgemeinen für den Betrieb mit idealer Gleichspannung, d.h. ohne Wechselanteile.

Bei Stromrichterspeisung kann dagegen nicht mehr von einem Gleichstrom im herkömmlichen Sinn ausgegangen werden, da überlagerte Oberwellen auftreten. Diese Wechselanteile beeinflussen zwar nicht den drehmomentbildenden Mittelwert des Ankerstromes, erhöhen allerdings seinen Effektivwert. Da für die Stromwärmeverluste der Effektivwert des Ankerstromes maßgeblich ist, muß mit Rücksicht auf die zulässige Erwärmung der GSM eine Leistungsreduzierung in der Größenordnung von bis zu 10 % vorgenommen werden. Die bei Stromrichterspeisung durch die Stromwelligkeit entstehenden Verluste sind sehr schwer quantifizierbar. Der Wirkungsgrad verschlechtert sich jedoch besonders im Teillastbereich.

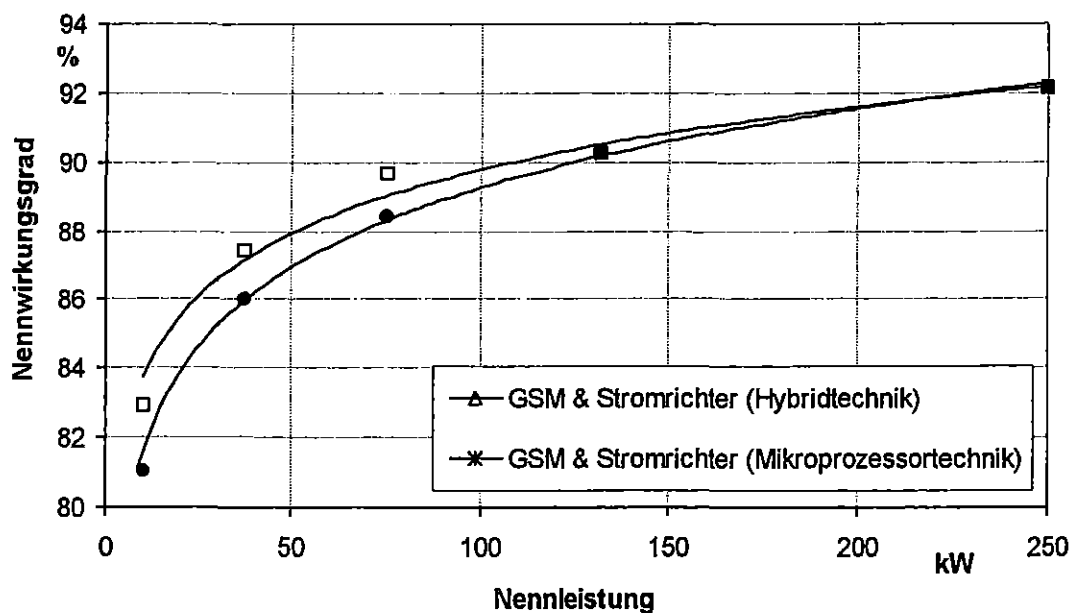


Bild 8-35: Nennwirkungsgradverlauf von GSM mit Stromrichter

In **Bild 8-35** sind die Nennwirkungsgrade von GSM am Stromrichter in Mikroprozessor- und Hybridtechnik über der Nennleistung aufgetragen. Hierbei ist zu erkennen, daß Stromrichter in Mikroprozessortechnik im Vergleich zur konventionellen Hybridtechnik geringfügig bessere Nennwirkungsgrade aufweisen.

8.8.2 Kosten

Die Preise von Stromrichtern für Gleichstromantriebe hängen davon ab, ob sie für den Einquadranten- oder Vierquadrantenbetrieb geeignet sind (vgl. **Bild 8-36**). Eine zusätzliche Ausstattung der Stromrichter mit Mikroprozessoren, die bessere dynamische Eigenschaften und Regelfähigkeit gewährleisten, schlägt sich ebenfalls im Preis nieder. Die Ausrüstung mit Mikroprozessoren bedeutet etwa eine Verdoppelung der Investitionen. Für Stromrichter werden Rabatte von bis zu 25 % gewährt.

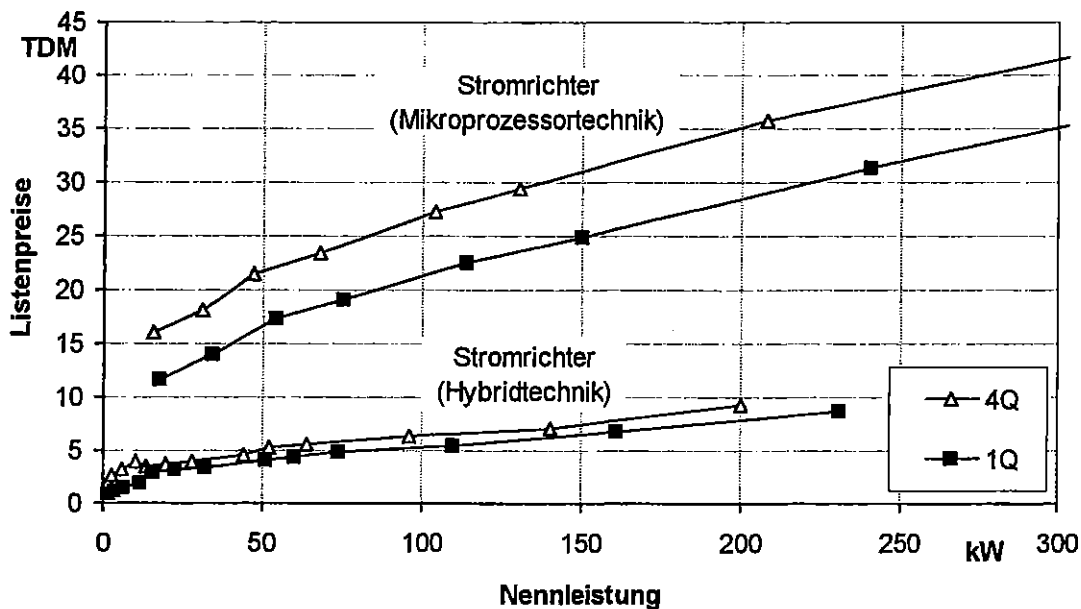


Bild 8-36: Listenpreise von Stromrichtern für GSM

In **Bild 8-37** sind für den Einquadrantenbetrieb bei Nenndrehzahlen von 1.500 min^{-1} die Systemkosten (Motor und Stromrichter) aufgetragen. Der GSM ist oberhalb einer Nennleistung von etwa 100 kW die teuerste Komponente des Antriebes. Bei den Gesamtpreisen für GSM-Antriebe machen die Stromrichter Kosten ca. 20 bis 30% und die Stromrichter mit Mikroprozessorausstattungen knapp die Hälfte der Beträge aus.

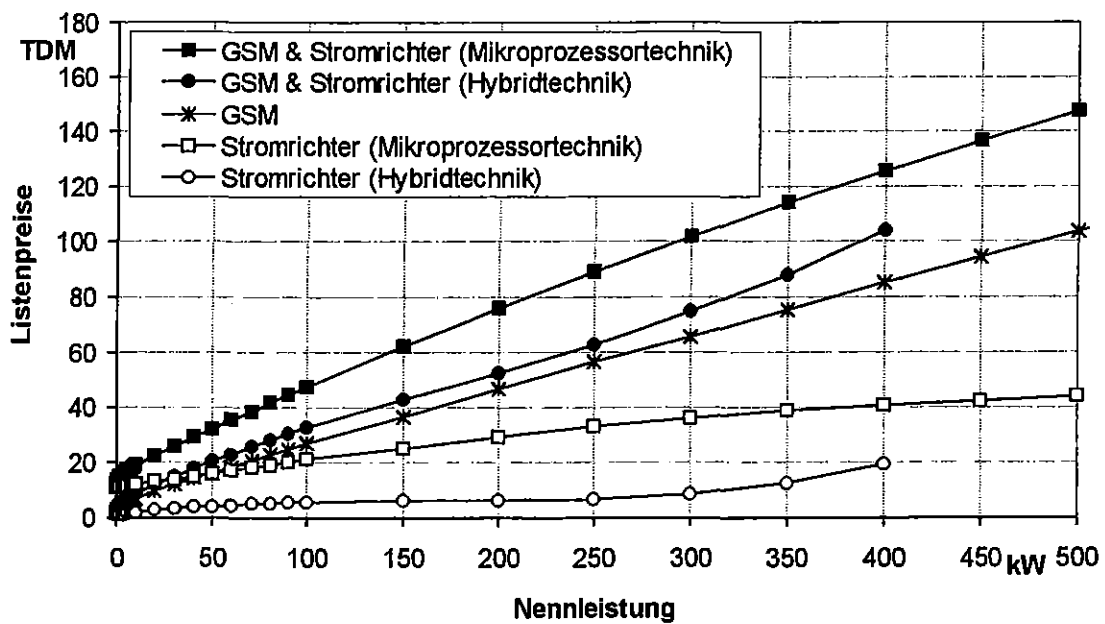


Bild 8-37: Listenpreise von GSM mit Stromrichter (1-Q-Betrieb; $n_N = 1.500 \text{ min}^{-1}$)

Bild 8-38 gibt die gleichen Zusammenhänge für einen 4-Q-Betrieb bei 1.500 min^{-1} wieder. Bei vergleichbaren Nennleistungen von 350 kW sind die Antriebspreise nur geringfügig höher als bei 1-Q-Betrieb, da der Haupteinfluß auf die Preise durch die Mikroprozessorausrüstung der Umrichter bestimmt ist.

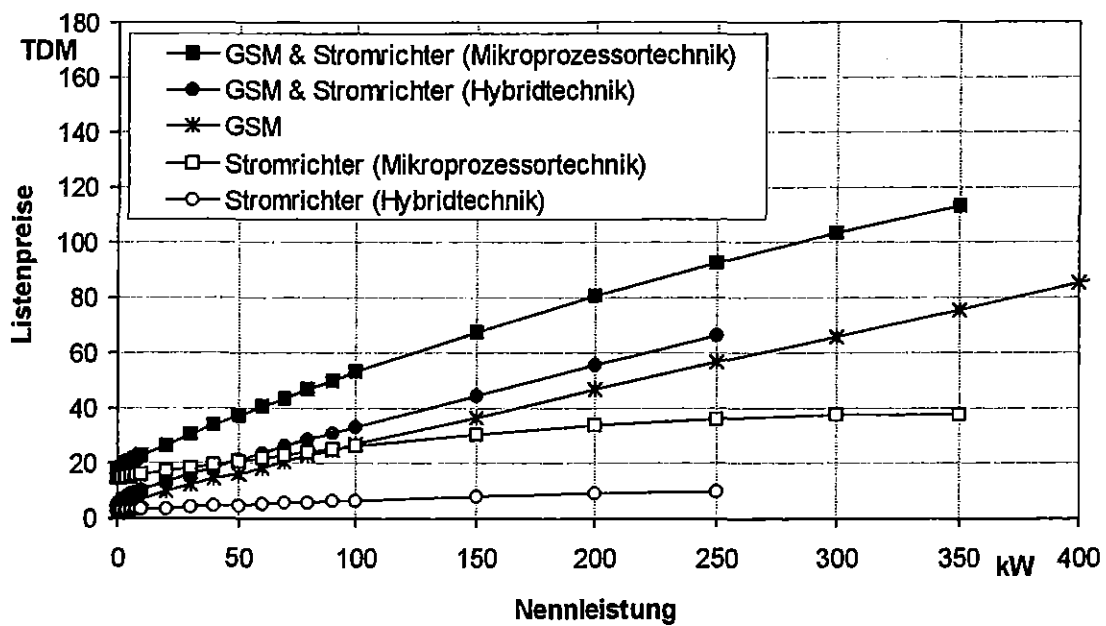


Bild 8-38: Listenpreise von GSM mit Stromrichter (4-Q-Betrieb; $n_N = 1.500 \text{ min}^{-1}$)

9 Beispiel für die Handhabung der Datenblätter

In diesem Abschnitt soll die Handhabung der Datenblätter anhand von zwei konkreten Beispielen erläutert werden. Gleichzeitig wird für diese Anwendungsfälle aufgezeigt, wie Daten aus verschiedenen Technikbereichen im Rahmen von *IKARUS TV 8* verknüpft werden können.

Als Beispiel soll zum einen die Drehzahlregelung eines Drehkolbenverdichters dienen, der technikbedingt ein konstantes Antriebsmoment ($M = \text{const.}$) verlangt. Daneben wird die Drehzahlregelung eines Ventilators mit Strömungsmaschinencharakteristik ($M \sim n^2$) untersucht. Hierbei wird jeweils ein energetischer Vergleich der Drehzahlregelung mit konventionellen Regelungsarten angestellt.

Abschließend soll für Drehzahl-Drehmoment-Charakteristiken, die nicht explizit in den Datenblättern beinhaltet sind, ein Weg aufgezeigt werden, wie der Wirkungsgrad von Momentenverläufen abgeschätzt werden kann.

9.1 Anwendungsfall für einen Drehkolbenverdichter mit $M = \text{const.}$

Um ein Antriebssystem energetisch effizient zu dimensionieren, müssen als erstes die Systemanforderungen durch die Arbeitsmaschine herausgestellt werden (vgl. Kap. 2). In diesem Beispiel soll ein drehzahl geregelter Antrieb für einen Drehkolbenverdichter ausgesucht und mit alternativen Regelungsarten verglichen werden.

Als Arbeitsmaschine soll der Drehkolbenverdichter LV-V<L-D1T-L1-6>95 nach /IKA 8.08/ betrachtet werden. Dieser weist folgende technische Daten auf:

<i>Bauart:</i>	einstufig, trockenlaufend, zweiflügeliges Kolbenprofil
<i>Druckbereich:</i>	1,2 bis 2,0 bar
<i>Volumenstrombereich:</i>	bis 5000 m ³ /h

In *Bild 9-1* ist die Drehmomentcharakteristik des Verdichters LV-V<L-D1T-L1-6>95 bei einem Ansaugdruck von 1 bar über dem Verdichtungsenddruck dargestellt. Die Momentencharakteristik des Drehkolbenverdichters ist unabhängig von der Drehzahl und steigt linear mit dem Druck an. Für den Verdichter soll nachfolgend ein Betrieb bei einem konstanten Druck von 2 bar gefordert sein ($M = \text{const.}$).

Die Förderleistung des Drehkolbenverdichters steigt linear mit der Drehzahl an (vgl. *Bild 9-2*).

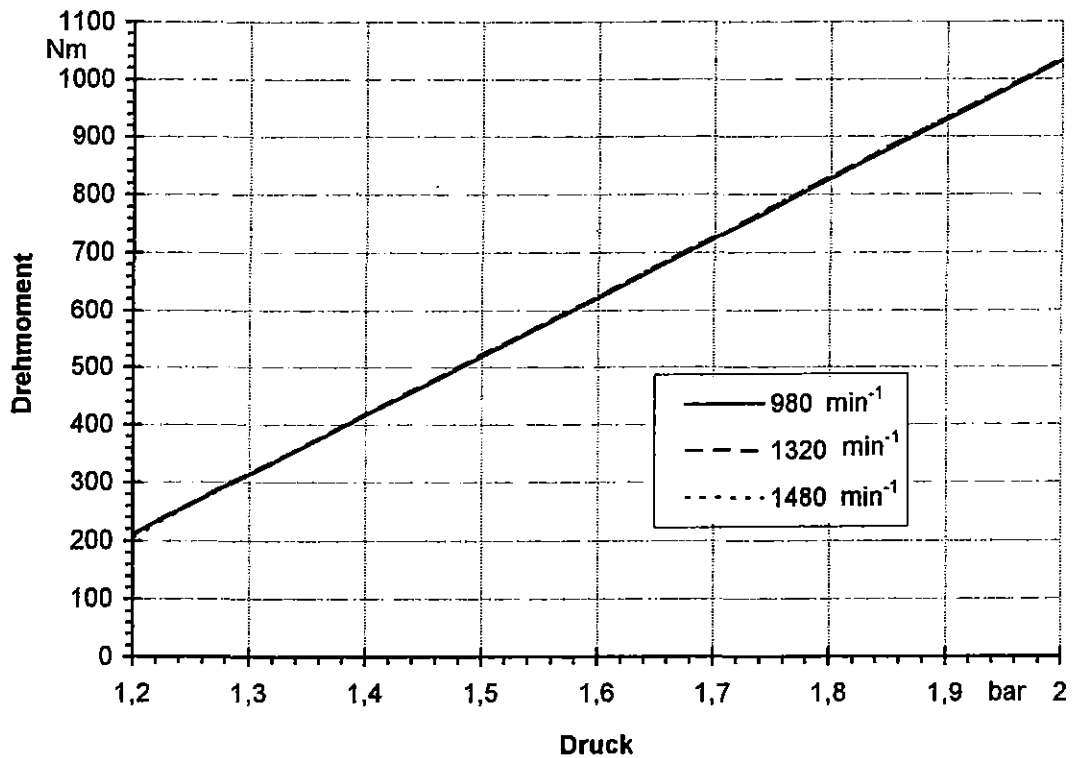


Bild 9-1: Drehmomentcharakteristik des Drehkolbenverdichters LV-V<L-DIT-LI-6>95 in Abhängigkeit vom Druck /IKA 8.08/

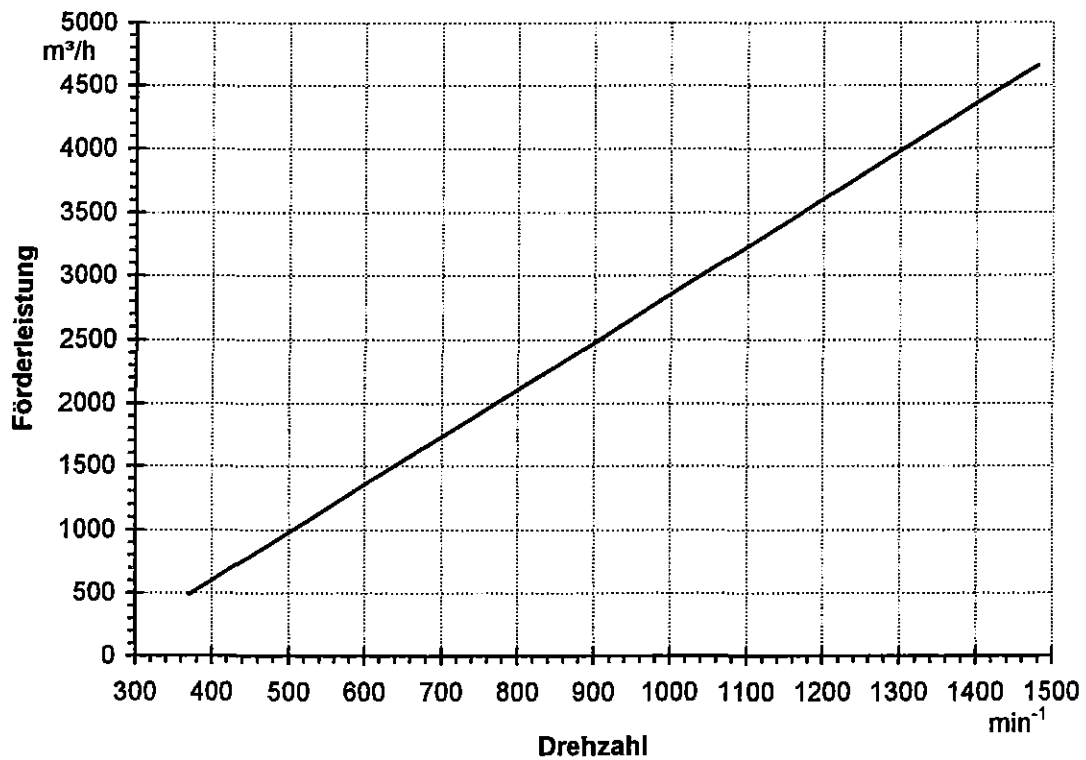


Bild 9-2: Förderleistung des Drehkolbenverdichters LV-V<L-DIT-LI-6>95 in Abhängigkeit von der Drehzahl bei einem Druckverhältnis von 2 /IKA 8.08/

Nach /IKA 8.08/ beträgt bei einer Drehzahl von 1.480 min^{-1} (\rightarrow Drehzahlklasse 7) die maximal erforderliche Wellenleistung $159,87 \text{ kW}$ (\rightarrow Leistungsklasse 4). Der nächst größere Normmotor hat eine Leistung von 160 kW . Damit stehen für diese Antriebsaufgabe für das Statusjahr 1995 folgende Motordatensätze zur Verfügung:

EA-A<K-7-040-4-1>95	EA-G<N-7-042-4-1>95	EA-G<N-7-050-4-2>95
EA-A<K-7-050-4-1>95	EA-G<N-7-042-4-2>95	EA-G<N-7-060-4-1>95
EA-A<K-7-069-4-1>95	EA-G<N-7-046-4-1>95	EA-A<K-7-300-.-1>95
EA-S<F-7-040-4-1>95	EA-G<N-7-050-4-1>95	EA-A<K-7-600-.-1>95

Als Antriebsmaschinen sollen eine ASM mit Käfigläufer (EA-A<K-7-040-4-1>95; *Tabelle 9-2*) und eine GSM (EA-G<N-7-042-4-1>95; siehe Anhang) untersucht werden. Die geforderte mechanische Leistung von 160 kW ist nicht explizit im Datenblatt aufgeführt. Daher ist eine lineare Interpolation zwischen dem gewählten und dem maximalen Wert erforderlich. Die Teillastwirkungsgrade sind für $M = \text{const.}$ in *Tabelle 9-1* zusammengefaßt.

Tabelle 9-1: Antriebswirkungsgrade im Umrichterbetrieb ($M = \text{const.}$; $P_N = 160 \text{ kW}$)

n/n_N [%]	EA-A<K-7-040-4-1>95 mit Umrichtertyp		EA-G<N-7-042-4-1>95 mit Stromrichtertyp	
	EU-U<V-.-.040-4-1>95 [%]	EU-I<.-.-.040-4-1>95 [%]	EU-E<H-.-.040-4-1>95 [%]	EU-E<M-.-.040-4-1>95 [%]
100	90,6	90,0	86,0	86,0
75	88,1	87,7	80,2	80,1
50	83,3	81,9	59,8	59,7
25	71,1	66,7	23,1	23,1

Mit den Antriebswirkungsgraden gemäß *Tabelle 9-1* und der Fördercharakteristik des Drehkolbenverdichters (vgl. *Bild 9-2*) kann der spezifische Energieeinsatz bei einer Drehzahlregelung mit konventionellen Regelungsarten (/IKA 8.08/) verglichen werden. Der spezifische Verdichtungsaufwand p berechnet sich aus der Betriebsdrehzahl n , dem Motormoment M bei dem entsprechenden Enddruck, der Förderleistung $\dot{V}(n)$ und dem Antriebswirkungsgrad η wie folgt:

$$p = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot M}{\eta \cdot \dot{V}(n)} = \frac{P(n)}{\eta \cdot \dot{V}(n)} \quad [\text{W/m}^3/\text{min}] \quad (9-1)$$

In *Tabelle 9-3* ist der spezifische Verdichtungsaufwand p bei Drehzahlregelung mit unterschiedlichen Umrichtertypen dem der Bypass-, Vollast-Leerlauf- und Saugdrosselregelung gegenübergestellt. Die konventionellen Regelungsarten weisen im Vollastbetrieb ($n/n_N = 100 \%$) ein energetisch günstigeres Verhalten auf als eine Drehzahlregelung. Der Grund hierfür liegt darin, daß bei der Drehzahlregelung Umrichterverluste anfallen.

Tabelle 9-2a: Datenblatt EA-A<K-7-040-4-1>95; Seite 1

Datenblatt: **Elektrische Antriebe / Motor** EA-A<K-7-040-4-1>95

Typ: **Asynchronmaschine; 75 - 250 kW; 400 V 3 AC; p = 2**

Allgemeine Angaben

Motorart	Asynchronmaschine mit Käfigläufer (Drehspannungsnetz)
Standardausl. der Ständerwicklung	Dreieck
Isolierstoffklasse	F
Schutzart	IP55
Kühlart	IC01
Polpaarzahl	2
Statusjahr	1995

Motorkenndaten

Nennleistung P_N (Wellenleistung)
 Nenn Drehzahl n_N
 Anschlußspannung
 Nennstrom I_N bei Anschlußspannung
 Nennmoment M_N
 Anlaufmoment M_A/M_N
 Maximales Moment M_{max}/M_N
 Anlaufstrom I_A/I_N
 Überlastbarkeit
 maximale Überlastdauer t_{max}
 maximale mechanische Drehzahl n_{max}
 mechanische Grenzleistung P_{max}

Einheit	maximal*	gewählt	minimal*	Güte	Kommentar
kW	250	132	75	2	
1/min	1488	1485	1480	2	synchrone Drehzahl = 1500 U/min
V	400	400	400	2	
A	424,8	230,6	134,6	2	
Nm	1604,4	848,8	483,9	2	
-	1,9	2,5	2,5	3	variiert stark mit Läuferbauart und Hersteller
-	2,8	2,7	2,7	3	variiert stark mit Läuferbauart und Hersteller
-	7,0	6,9	6,7	3	variiert stark mit Läuferbauart und Hersteller
%	50	50	50	2	
s	120	120	120	2	
1/min	2600	2600	3000	2	
% P_N	159	153	153	2	DIN VDE 0530 für S2, S3, S6

Konstruktionsdaten

Masse m
 Leistungsgewicht
 Trägheitsmoment J
 Schalleistung

Einheit	maximal*	gewählt	minimal*	Güte	Kommentar
kg	1480	870	550	2	
kg/kW	5,9	6,6	7,3	2	
kgm ²	5,4	2,2	1,0	2	
dB(A)	90	87	85	2	

Betriebsdaten

Wirkungsgrad bei $P/P_N = 25\%$
 $P/P_N = 50\%$
 $P/P_N = 75\%$
 $P/P_N = 100\%$
 $P/P_N = 125\%$
 Leistungsfaktor bei $P/P_N = 25\%$
 $P/P_N = 50\%$
 $P/P_N = 75\%$
 $P/P_N = 100\%$
 $P/P_N = 125\%$

Einheit	maximal*	gewählt	minimal*	Güte	Kommentar
%	90,1	88,0	85,8	2	
%	93,7	92,5	91,2	2	
%	95,3	94,1	92,9	2	
%	95,1	93,9	92,7	2	
%	94,4	93,0	91,7	2	
-	0,60	0,56	0,54	2	
-	0,82	0,79	0,77	2	
-	0,87	0,85	0,83	2	
-	0,89	0,88	0,87	2	
-	0,89	0,88	0,88	2	

Umschalten Dreieck → Stern:

Wirkungsgrad bei $P/P_N = 35\%$
 $P/P_N = 25\%$
 $P/P_N = 15\%$
 Leistungsfaktor bei $P/P_N = 35\%$
 $P/P_N = 25\%$
 $P/P_N = 15\%$

Einheit	maximal*	gewählt	minimal*	Güte	Kommentar
%	94	93	91	3	
%	93	92	91	3	
%	91	89	88	3	
-	0,90	0,89	0,88	3	
-	0,88	0,86	0,84	3	
-	0,83	0,80	0,78	3	

Ökonomische Daten

Investitionen
 Spezifische Investitionen
 Preiszuschlag für:
 Zündschutzart erhöhte Sicherheit
 Zündschutzart druckfeste Kapselung
 Montage- und Inbetriebnahmekosten
 Beseitigungskosten
 Wartungs- und Instandhaltungskosten
 technische Lebensdauer
 ökonomische Lebensdauer

Einheit	maximal*	gewählt	minimal*	Güte	Kommentar
DM	46870	24430	13910	2	60 - 70 % Rabatt auf Listenpreis üblich
DM/kW	187	185	185	2	bezogen auf Listenpreis
% Inv.	23	25	26	3	
% Inv.	50	57	64	3	
% Inv.	2	2	2	3	geschätzt
% Inv.	5	5	5	3	geschätzt
DM/a	0	0	0	3	geschätzt
a	15	15	15	3	
a	10	10	10	2	A/A-Tabelle Elektromotoren

Tabelle 9-2b: Datenblatt EA-A<K-7-040-4-1>95; Seite 2

Umrichterbetrieb 1: Betrieb am: Spannungszwischenkreisumrichter; 97,8 - 321,4 kVA; 400 V 3AC
 Kurzbez.: EU-U<V-.-040-4-1>95

Lastverlauf: M~n²

Maximale mech. Leistung P_{uq}
 reduziertes Nennmoment M_{uq}
 Wirkungsgrad bei n/n_N = 30%
 n/n_N = 50%
 n/n_N = 75%
 n/n_N = 100%
 Leistungsfaktor bei Nenndrehzahl

Einheit	maximal*	gewählt	minimal*	Güte	Kommentar
kW	250	132	75	2	
Nm	1604	849	484	2	
%	70,6	66,3	62,2	3	Teillastverhältnis P/P _{uq} = 2,7 %
%	84,3	81,8	79,2	3	Teillastverhältnis P/P _{uq} = 12,5 %
%	90,0	88,3	86,6	3	Teillastverhältnis P/P _{uq} = 42 %
%	91,8	90,3	88,8	3	Teillastverhältnis P/P _{uq} = 100 %
-	0,88	0,86	0,85	3	

Lastverlauf: M=const.

Maximale mech. Leistung P_{uc}
 reduziertes Nennmoment M_{uc}
 Wirkungsgrad bei n/n_N = 25%
 n/n_N = 50%
 n/n_N = 75%
 n/n_N = 100%
 n/n_N = 120%
 Moment bei 1,2-facher Nenndrehzahl
 Leistungsfaktor bei Nenndrehzahl

Einheit	maximal*	gewählt	minimal*	Güte	Kommentar
kW	236	122	68	2	Werte für Stellbereich 1:3
Nm	1517	782	436	2	
%	73,8	70,3	66,9	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 25 %
%	85,1	82,8	80,4	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 50 %
%	89,5	87,7	85,9	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 75 %
%	91,8	90,3	88,8	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 100 %
%	92,4	90,9	89,4	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 100 %
Nm	1337	707	403	2	Feldschwächbereich P = P _N
-	0,88	0,86	0,85	3	

Umrichterbetrieb 2: Betrieb am: Stromzwischenkreisumrichter; 104,4 - 327,7 kVA; 400 V 3AC
 Kurzbez.: EU-I<-.-040-4-1>95

Lastverlauf: M~n²

Maximale mech. Leistung P_{uq}
 reduziertes Nennmoment M_{uq}
 Wirkungsgrad bei n/n_N = 30%
 n/n_N = 50%
 n/n_N = 75%
 n/n_N = 100%
 Leistungsfaktor bei Nenndrehzahl

Einheit	maximal*	gewählt	minimal*	Güte	Kommentar
kW	250	132	75	2	
Nm	1604	849	484	2	
%	48,6	44,2	40,3	3	Teillastverhältnis P/P _{uq} = 2,7 %
%	74,7	71,5	68,5	3	Teillastverhältnis P/P _{uq} = 12,5 %
%	87,7	86,0	84,3	3	Teillastverhältnis P/P _{uq} = 42 %
%	91,1	89,7	88,4	3	Teillastverhältnis P/P _{uq} = 100 %
-	0,78	0,75	0,73	3	

Lastverlauf: M=const.

Maximale mech. Leistung P_{uc}
 reduziertes Nennmoment M_{uc}
 Wirkungsgrad bei n/n_N = 25%
 n/n_N = 50%
 n/n_N = 75%
 n/n_N = 100%
 n/n_N = 120%
 Moment bei 1,2-facher Nenndrehzahl
 Leistungsfaktor bei Nenndrehzahl

Einheit	maximal*	gewählt	minimal*	Güte	Kommentar
kW	236	122	68	2	Werte für Stellbereich 1:3
Nm	1517	782	436	2	
%	70,0	65,7	61,8	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 25 %
%	84,2	81,3	78,6	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 50 %
%	89,2	87,3	85,3	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 75 %
%	91,1	89,7	88,4	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 100 %
%	90,9	89,6	88,2	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 100 %
Nm	1337	707	403	2	Feldschwächbereich P = P _N
-	0,78	0,75	0,73	3	

Anmerkung: Güte: 1 = sicher und belastbar
 2 = eingeschränkt belastbar
 3 = geschätzte Werte
 minimal*: gültig für untere Leistungsgrenze
 maximal*: gültig für obere Leistungsgrenze

*** = keine Daten verfügbar
 ** = Angabe aus technischen oder begrifflichen Gründen nicht möglich
 "u" = Umrichterbetrieb
 "q" = quadratisches Lastmoment
 "c" = konstantes Lastmoment

Tabelle 9-3: Spezifischer Verdichtungsaufwand verschiedener Regelungsarten bei einem Enddruck von 2 bar

Förderleistung [m ³ /h]	n/n _N [%]	Drehzahlregelung				konventionelle Regelung			
		Asynchronmaschine		Gleichstrommaschine		Asynchronmaschine			GSM
		U-Umrichter [kW/m ³ /min]	I-Umrichter [kW/m ³ /min]	Stromrichter 1 [kW/m ³ /min]	Stromrichter 2 [kW/m ³ /min]	Bypaß [kW/m ³ /min]	Vollast-Leerl. [kW/m ³ /min]	Saugdrossel * [kW/m ³ /min]	Bypaß [kW/m ³ /min]
4 657	100	2,27	2,29	2,39	2,39	2,19	2,19	2,17	2,25
3 267	75	2,50	2,51	2,75	2,75	3,12	3,18	4,00	3,21
1 878	50	3,07	3,12	4,27	4,28	5,43	5,64	8,58	5,58
488	25	6,91	7,37	21,31	21,31	20,88	22,08	39,42	21,48

* Bei der Saugdrosselregelung wurde eine ASM (P_N = 250 kW) angesetzt

Stromrichter 1: Hybridtechnik

Stromrichter 2: Mikroprozessortechnik

Im Teillastbereich ist die Drehzahlregelung der ASM sowohl im Vergleich zu den konventionellen Regelungsarten als auch zu der drehzahlgeregelten GSM energetisch effizienter. Die Saugdrosselregelung weist in diesem Zusammenhang die energetisch ungünstigsten Werte auf, da durch die Gleichdruckverdichtung des Drehkolbenverdichters bei sinkendem Saugdruck die Kupplungsleistung ansteigt. Daher ist bei gleichem Volumenstromregelbereich eine höhere Motorleistung zu installieren als bei den anderen Regelungsarten. Der Grund für das energetisch ungünstige Verhalten der Vollast-Leerlauf-Regelung ist die hohe Leerlaufleistung.

Die Motorstrangumschaltung von Dreieck auf Stern führt zu einer Verbesserung der energetischen Effizienz des Motors im Teillastbereich (vgl. Kap. 3.1.1). Bei längeren Verdichterleerlaufzeiten ist daher bei der ASM als Antriebseinheit durch die Umschaltung von Dreieck- auf Sternbetrieb eine Reduzierung des spezifischen Energieverbrauches möglich, falls keine Abschaltung erfolgt.

Um diesen Zusammenhang zu verdeutlichen, ist der Motorwirkungsgrad der ASM in **Bild 9-3** für Stern- und Dreieckschaltung über der Wellenleistung aufgetragen. Bei einer Verdichterleerlaufleistung von 40 kW erhöht sich durch die Umschaltung auf Sternschaltung der Motorwirkungsgrad um 4,5 Prozentpunkte. Bei einer durchschnittlichen Förderleistung des Verdichters von 488 m³/h, was einer Auslastung von 10,5 % entspricht, reduziert sich dadurch der spezifische Energieverbrauch um ca. 4 %.

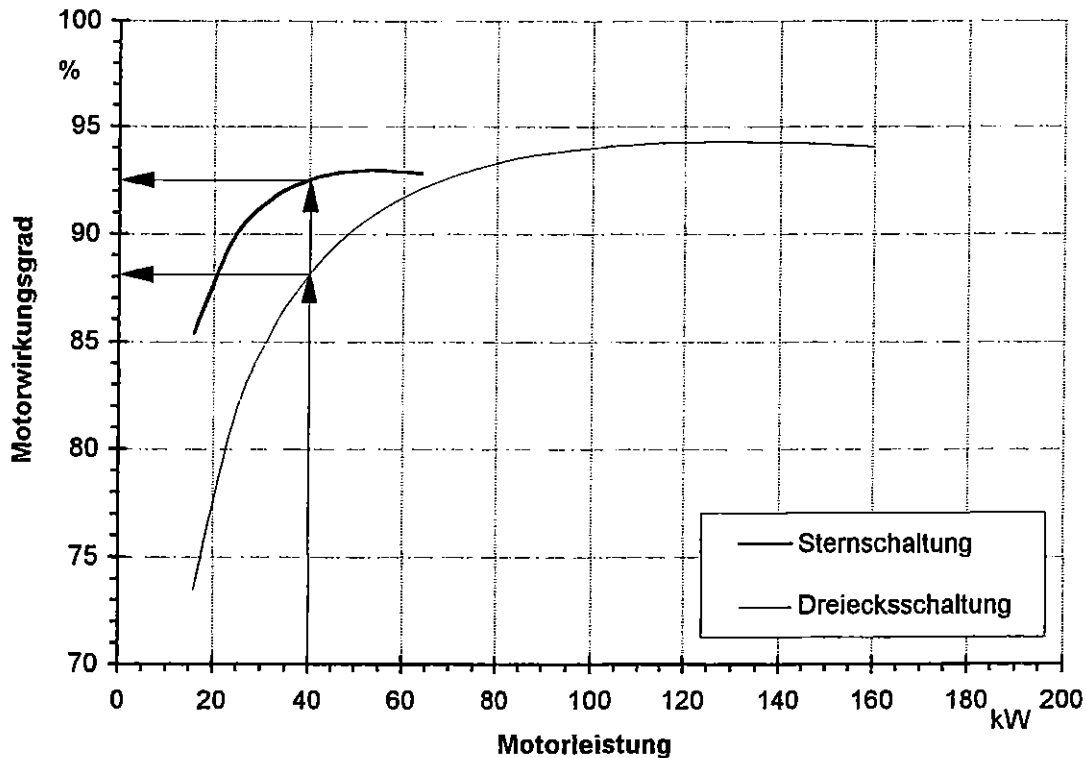


Bild 9-3: Verlauf des Motorwirkungsgrades bei Dreieck- und Sternschaltung

Bei Nachrüstung der Verdichterantriebseinheit mit einer Drehzahlregelung fallen lediglich die Umrichter Kosten an, die aus den Datenblättern EU-U<V-. -040-4-1>95, EU-I<.- -040-4-1>95, EU-E<H-. -040-4-1>95 und EU-E<M-. -040-4-1>95 entnommen werden können. Mittels linearer Interpolation zwischen dem gewählten und dem maximalen Wert erhält man die Investitionen inklusive Montage und Inbetriebnahme (vgl. *Tabelle 9-4*).

Tabelle 9-4: Investitionen der Motoren und Umrichter

	Listenpreis	Rabatt	Nettopreis
Asynchronmaschine	29 800 DM	70%	8 940 DM
U-Umrichter	50 400 DM	25%	37 800 DM
I-Umrichter	48 200 DM	25%	36 150 DM
Gleichstrommaschine	38 550 DM	25%	28 913 DM
Stromrichter (Hybridtechnik)	4 400 DM	25%	3 300 DM
Stromrichter (Mikroprozessortechnik)	18 700 DM	25%	14 025 DM

Bei einer angenommenen Betriebszeit des Verdichters von 5000 h/a, einem Stromarbeitspreis von 0,16 DM/kWh und einem Zinsfuß von 8% ergeben sich die Energieeinsparpotentiale und Amortisationsdauern der Drehzahlregelung gegenüber der energetisch optimalsten konventionellen Regelungsart (Bypaß) gemäß *Tabelle 9-5* und *Tabelle 9-6*.

Tabelle 9-5: Energieeinsparpotential der Drehzahlregelung gegenüber der Bypassregelung

Förderleistung [m³/h]	Asynchronmaschine		Gleichstrommaschine	
	U-Umrichter [kWh/a]	I-Umrichter [kWh/a]	Stromrichter 1 [kWh/a]	Stromrichter 2 [kWh/a]
4 657	-32 818	-38 688	-55 613	-55 821
3 267	168 419	165 303	125 811	125 391
1 878	369 195	361 450	205 668	204 453
488	568 112	549 601	6 928	6 729

Tabelle 9-6: Amortisationsdauern der Drehzahlregelung gegenüber der Bypassregelung

Förderleistung [m³/h]	Asynchronmaschine		Gleichstrommaschine	
	U-Umrichter [a]	I-Umrichter [a]	Stromrichter 1 [a]	Stromrichter 2 [a]
4 657	-	-	-	-
3 267	1,5	1,5	0,2	0,7
1 878	0,7	0,7	0,1	0,5
488	0,4	0,4	3,5	-

Der für die ASM benötigte U-Umrichter ist gegenüber einem Stromrichter für die GSM energetisch günstiger, jedoch bezüglich den Anschaffungskosten (Nettopreise) teurer. Allerdings ist die Energieeinsparung beim U-Umrichter innerhalb der Lebensdauer höher, so daß dieser die energetisch- und kostenoptimale Lösung darstellt. Die Amortisationsdauern beider Frequenzumrichter sind nach Tabelle 9-6 in etwa gleich. Die Investitionen der Drehzahlregelung eines Gleichstromantriebes amortisieren sich nach maximal 3,5 Jahren, außer bei sehr niedriger Auslastung für den Stromrichter in Mikroprozessortechnik.

Soll eine vorhandene drehzahlgeregelte GSM durch eine drehzahlgeregelte ASM ersetzt werden, so errechnen sich die entsprechenden Energieeinsparpotentiale und Amortisationsdauern gemäß *Tabelle 9-7*. Die höheren Wartungskosten der GSM wurden hierbei der ASM gut geschrieben.

Tabelle 9-7: Energieeinsparpotential und Amortisationsdauern der ASM mit Frequenzumrichter gegenüber der GSM mit Stromrichter in Hybridtechnik

Förderleistung [m³/h]	Energieeinsparung		Amortisationsdauer	
	U-Umrichter [kWh/a]	I-Umrichter [kWh/a]	U-Umrichter [a]	I-Umrichter [a]
4 657	47 112	41 243	7,3	8,1
3 267	66 926	63 810	4,9	5,0
1 878	187 844	180 100	1,7	1,7
488	585 502	566 991	0,5	0,5

9.1 Anwendungsfall für einen Ventilator mit $M \sim n^2$

Ein Ventilator ist eine Arbeitsmaschine mit einem über der Drehzahl quadratisch ansteigendem Moment ($M \sim n^2$). Nachfolgend soll die Drehzahlregelung eines Axialventilators mit der Bypassregelung und der Regelung mittels Laufschaufelverstellung verglichen werden. Für den Anwendungsfall dient ein Axialventilator mit den technischen Kenngrößen gemäß *Tabelle 9-8*.

Tabelle 9-8: Kenngrößen des Axialventilators nach /IKA 8.06/

		Minimum	Gewählt	Maximum
Ventilator-drehzahl	[min ⁻¹]	475	713	950
Wellenleistung	[kW]	0,15	0,49	1,16
Volumenstrom	[m ³ /h]	6 835	10 253	13 671

Als erstes muß die Leistungsanforderung und die Fördercharakteristik des Ventilators betrachtet werden (vgl. *Bild 9-4*). Der mit der 3. Potenz ansteigende mechanische Leistungsbedarf bedingt einen quadratisch ansteigenden Momentenverlauf (vgl. *Bild 9-5*).

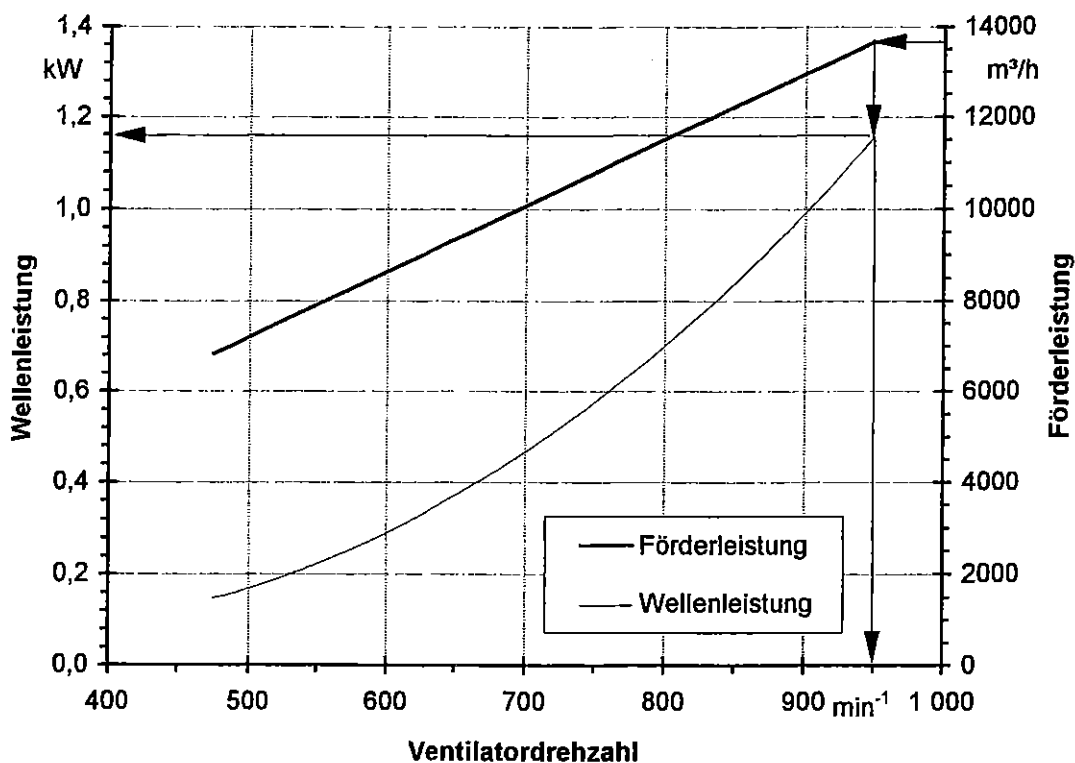


Bild 9-4: Wellenleistung und Förderleistung des Axialventilators /IKA 8.06/

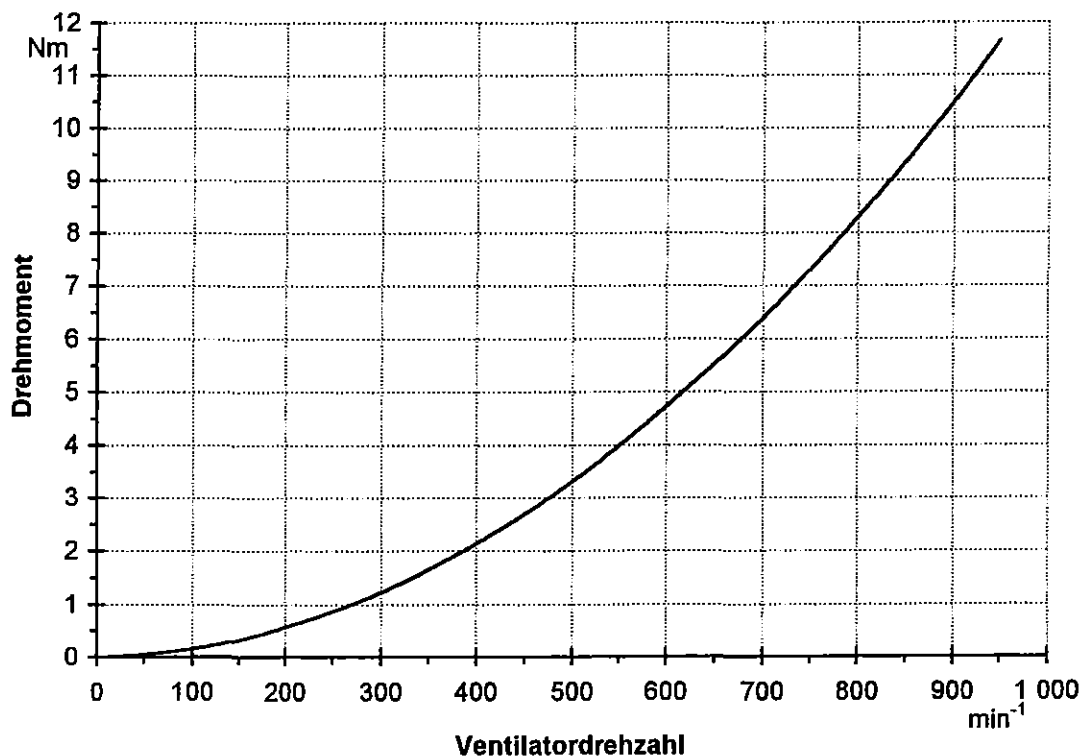


Bild 9-5: Drehmomentanforderung des Axialventilators /IKA 8.06/

Nach /IKA 8.06/ beträgt bei einer Drehzahl von 950 min^{-1} (\rightarrow Drehzahlklasse 6) die maximal erforderliche Wellenleistung $1,16 \text{ kW}$ (\rightarrow Leistungsklasse 2). Der entsprechende, nächst größere Normmotor hat eine Leistung von $1,18 \text{ kW}$. Damit stehen für diese Antriebsaufgabe folgende Motordatensätze zur Verfügung:

EA-A<K-6-023-2-1>95 EA-A<K-6-040-2-1>95
 EA-A<K-6-050-2-1>95 EA-G<N-6-026-2-1>95
 EA-G<N-6-026-2-2>95

Als Antriebsmaschine soll eine ASM mit Käfigläufer (EA-A<K-6-040-2-1>95; siehe Anhang) untersucht werden. Die geforderte mechanische Leistung von $1,18 \text{ kW}$ ist nicht explizit im Datenblatt aufgeführt. Daher ist auch hier eine lineare Interpolation zwischen den beiden Stützstellen erforderlich.

Die Teillastwirkungsgrade bei Betrieb am Spannungszwischenkreisumrichter sind für $M \sim n^2$ in **Tabelle 9-9** zusammengefasst. Ein I-Umrichter steht für diesen Leistungsbereich nicht zur Verfügung.

Tabelle 9-9: Antriebswirkungsgrade im Umrichterbetrieb ($M \sim n^2$; $P_N = 1,18 \text{ kW}$)

n/n_N [%]	Wirkungsgrad [%]	Auslastung P/P_N [%]
30	23,8	2,7
50	45,9	12,5
75	61,4	42
100	67,8	100

Mit den Antriebswirkungsgraden gemäß Tabelle 9-9 und der Förderleistung des Axialventilators (vgl. Bild 9-4) kann analog zu Gleichung 9-1 der spezifische Energieeinsatz bei einer Drehzahlregelung mit konventionellen Regelungsarten (/IKA 8.06/) verglichen werden.

In **Tabelle 9-10** ist der spezifische Energieaufwand bei Drehzahlregelung (ASM mit U-Umrichter) dem der Bypaßregelung und der Laufschaufelverstellung gegenübergestellt. Bei Vollast ($n/n_N = 100 \%$) stellt sich bei den konventionellen Regelungen ein nur geringer energetischer Vorteil gegenüber der Drehzahlregelung ein, da keine Umrichterverluste anfallen.

Tabelle 9-10: Spezifischer Energieverbrauch verschiedener Regelungsarten

Förderleistung [m ³ /h]	n/n_N [%]	Spezifischer Energieverbrauch [Wh/m ³]		
		Drehzahlregelung	Bypaßregelung	Laufschaufelverstellung
4 101	30	0,03	0,39	-
6 835	50	0,05	0,23	-
10 253	75	0,08	0,16	0,09
13 671	100	0,13	0,12	0,12

"-" außerhalb des Regelbereiches

Analog zum Drehkolbenverdichter ist auch beim Ventilator die Drehzahlregelung im Teillastbereich den konventionellen Regelungsarten energetisch überlegen. Hervorzuheben ist hier auch der weitere Regelbereich.

Die Nachrüstung des Axialventilators mit einer Drehzahlregelung kostet ca. DM 1.590. Bei einer angenommenen Betriebszeit des Ventilators von 5.000 h/a, einem Stromarbeitspreis von 0,16 DM/kWh und einem Zinsfuß von 8 % ergeben sich die Amortisationsdauern der Drehzahlregelung gegenüber den konventionellen Regelungsarten gemäß **Tabelle 9-11**.

Tabelle 9-11: Energiekosteneinsparungen und Amortisationsdauern der Drehzahlregelung gegenüber den konventionellen Regelungsarten

Förderleistung [m ³ /h]	Bypaßregelung		Laufschaufelverstellung	
	[DM/a]	[a]	[DM/a]	[a]
4 101	1 171	1,5	-	-
6 835	1 021	1,7	-	-
10 253	637	2,9	97	-
13 671	-89	-	-89	-

"-" keine Amortisationsdauer bestimmbar

Die Drehzahlregelung amortisiert sich im Fall einer Nachrüstung bei einer mittleren Ventilatorauslastung von 75 % nach ca. drei Jahren. Falls bei der vorhandenen Regelung mittels Verstellung der Laufschaufeln der Regelbereich ausreicht, ist eine Umrüstung auf Drehzahlregelung nicht rentabel.

9.2 Beliebiger Lastfall

In den Datenblättern sind für den Umrichterbetrieb nur Daten für den Fall angegeben, daß bei Nenndrehzahl das Nennmoment abgegeben wird. Die energetischen Daten bei einer Überdimensionierung des Antriebes werden nicht explizit ausgewiesen. Für eine grobe Abschätzung des Wirkungsgrades soll nun angenommen werden, daß die Verluste P_V als drehzahlunabhängige Funktion des Motormomentes M darzustellen sind.

Um die Verluste in Abhängigkeit des Motormomentes abzuschätzen, reicht es aus, die Verluste im Lastfall $M \sim n^2$ zu analysieren. Die Verluste berechnen sich aus der Motornennleistung P_N , der Auslastung $A (= P/P_N)$ und dem Wirkungsgrad η wie folgt:

$$P_V = P_{el} - P_{mech} = \frac{P_N \cdot A}{\eta} - P_N \cdot A \quad (9-2)$$

Die Stromwärmeverluste sind näherungsweise proportional zum Quadrat des Momentes. Eisen- und Zusatzverluste werden den Stromwärmeverlusten zugeschlagen. Es empfiehlt sich, die Stromwärmeverluste durch ein Polynom zweiten Grades anzunähern.

Es muß berücksichtigt werden, daß dies für eine maximale Auslastung von 100 % bei Nenndrehzahl gilt. Allerdings sind die Verluste bei einer reduzierten Auslastung x bei Nenndrehzahl gesucht. Die Verluste $P_V(x)$ sind daher wie folgt über die Teillastdaten bei Nenndrehzahl anzupassen:

$$P_V(x) = P_V(M) \cdot \frac{\eta(100\%)}{\eta(x)} + \frac{\eta(100\%)}{\eta(x)} \cdot x \cdot P_N \quad (9-3)$$

In diesem Beispiel soll erneut der Drehkolbenverdichter LV-V<L-D1T-L1-6>95 aus Kap. 9.1 nach /IKA 8.08/ betrachtet werden. Dieser wird wiederum bei einem konstantem Druck von 2 bar betrieben, d.h. daß das Wellenmoment konstant ist. Wie oben bereits erwähnt wurde, ist bei einer Saugdrosselregelung eine höhere Motorleistung zu installieren als bei der Drehzahlregelung. Im folgenden Beispiel soll daher der überdimensionierte Antrieb untersucht werden. Bei der Saugdrosselregelung wurde ein 250 kW Motor installiert. Bei einer Drehzahlregelung genügt eine Leistung von 160 kW, was einem Motormoment von 64% des Nennmomentes entspricht. Für die drehzahlgeregelte ASM (250 kW) stellt sich analog dazu ein Wirkungsgradverlauf gemäß **Bild 9-6** ein.

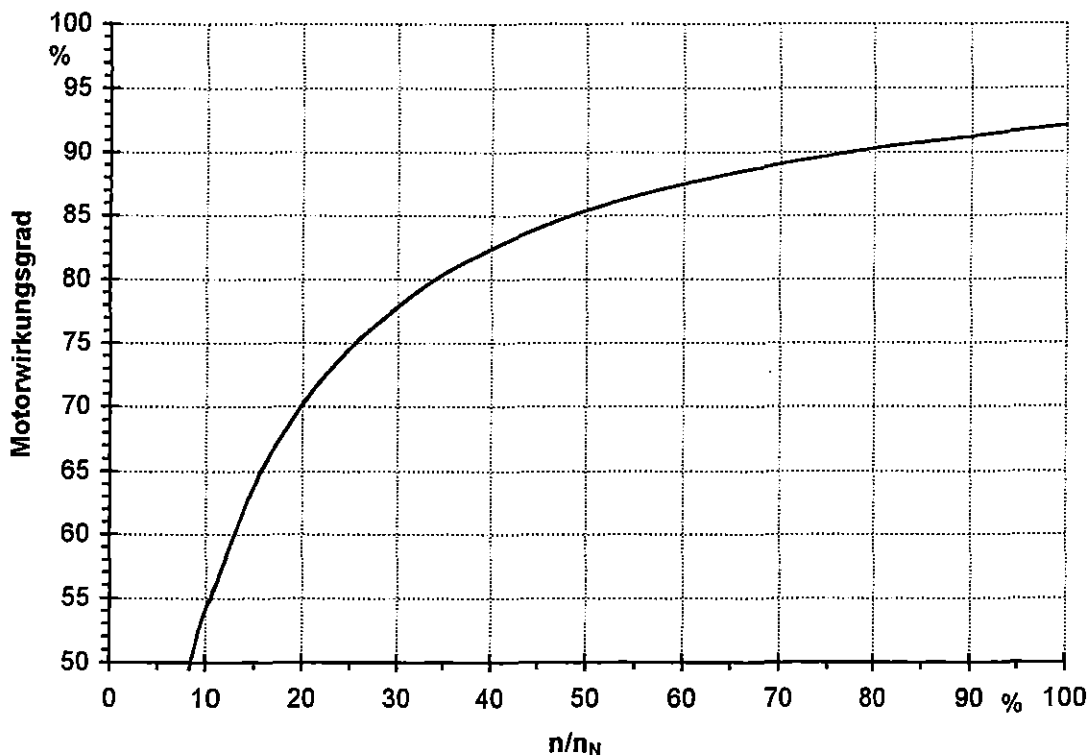


Bild 9-6: Wirkungsgradverlauf der ASM (250 kW) bei 64% vom Nennmoment

Der spezifische Verdichtungsaufwand in **Tabelle 9-12** berechnet sich analog zu Gleichung 9-1. Auf die Darstellung des gegenüber dem U-Umrichter energetisch ungünstigeren I-Umrichters wurde verzichtet.

Bei einem Vergleich der Werte gemäß **Tabelle 9-3** mit denen aus **Tabelle 9-12** ist festzustellen, daß die ASM mit 250 kW hier sogar einen geringeren Energieverbrauch hat als die ASM mit 160 kW. Dies liegt daran, daß die ASM mit 250 kW bei einer Auslastung von 64% noch einen besseren Wirkungsgrad aufweist als die ASM mit 160 kW bei einer Auslastung von 100% (vgl. **Bild 9-7**).

Es muß beachtet werden, daß der Wirkungsgrad hierbei über der Wellenleistung und nicht der Auslastung dargestellt ist. Die für die Bypass- und die Vollast-Leerlauf-Regelung relevanten Wellenleistungen wurden durch senkrechte Linien gekennzeichnet.

Tabelle 9-12: Spezifischer Verdichtungsaufwand bei einem Enddruck von 2 bar

n/n _N [%]	Förderleistung [m ³ /h]	Drehzahlregelung	konventionelle Regelung		
		U-Umrichter [kWh/m ³ /min]	Bypass [kWh/m ³ /min]	Vollast-Leerl. [kWh/m ³ /min]	Saugdrossel [kWh/m ³ /min]
100	4 657	2,24	2,17	2,17	2,17
75	3 267	2,45	3,10	3,17	4,00
50	1 878	2,99	5,39	5,64	8,59
25	488	6,59	20,74	22,17	39,46

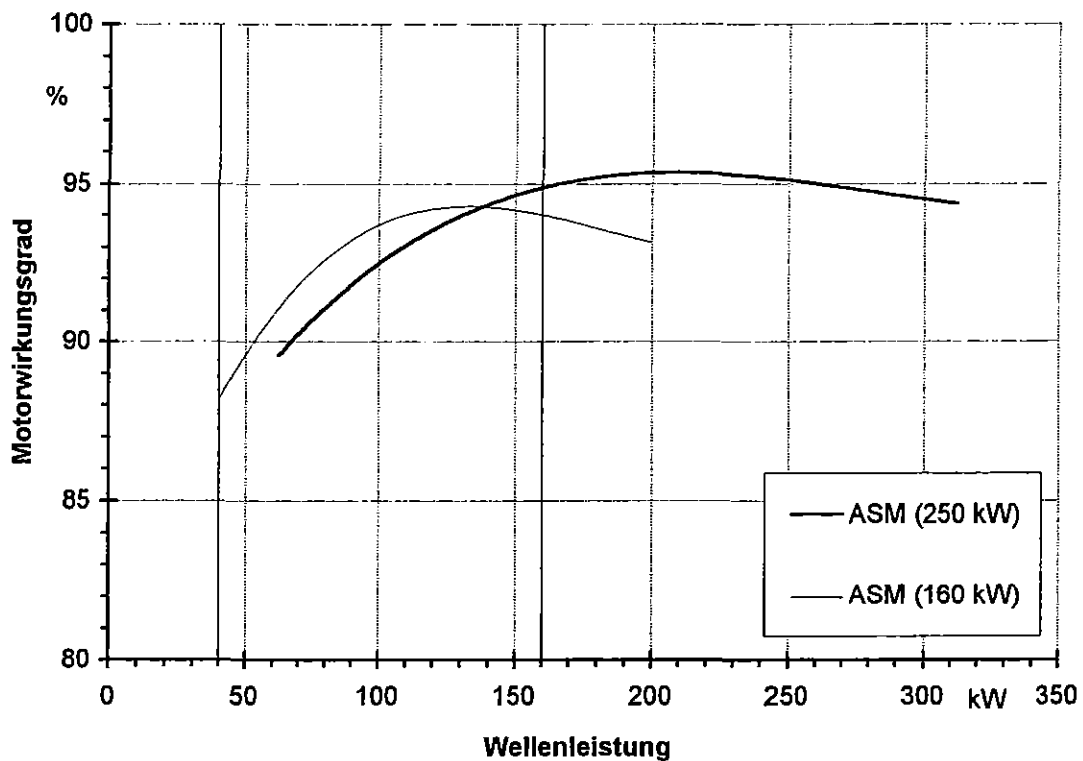


Bild 9-7: Wirkungsgradverlauf bei Nenndrehzahl ohne Umrichter

10 Quellenverzeichnis

- /FIS/** **Fischer, R.:** *Elektrische Maschinen*
München, Carl Hanser Verlag, 1989
- /FUE/** **Fuest, K.:** *Elektrische Maschinen und Antriebe*
Braunschweig, Vieweg, 1985
- /IKA 8.06/** **Hoffmann C. et al.:** *Ventilatoren*
Bericht 8.06, IKARUS, Teilvorhaben 8, „Querschnittstechniken“;
Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1995
- /IKA 8.08/** **Saller A. et al.:** *Kompressionsmaschinen*
Bericht 8.08, IKARUS, Teilvorhaben 8, „Querschnittstechniken“;
Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1996
- /RAV/** *Elektrische Antriebe energieoptimal auslegen und betreiben*
Tagungsunterlagen eines Seminars im Rahmen des Impulsprogramms RAVEL,
Bern, 1993
- /SAG/** **Siemens AG:** *Planungsunterlagen für Drehstrom-Niederspannungsmotoren*
Katalog M10, 1991
- /TUM/** **Lorenzen H.W.:** *Grundlagen der elektrischen Maschinen*
Vorlesungsmanuskript, Institut und Lehrstuhl für elektrische Maschinen und
Geräte, TU München, 1988
- /VDE/** **Forst H.J. et al.:** *Frequenzgeregelte Antriebe*
VDE-Verlag, Frankfurt am Main, 1992
- /ZAE 2/** **Bauer H. et al.:** *Rationalisierung des Strombedarfs für stationäre elektrische
Antriebe (Teil I)*, Endbericht (94-250.007), Forschungsstelle für Energiewirt-
schaft, ZAE Abteilung 5, 1995
- /ZAE 4/** **Immel G.:** *Prüfstandsversuche an Antrieben für Elektrostraßenfahrzeuge*
Endbericht (94-250.023), Forschungsstelle für Energiewirtschaft,
ZAE Abteilung 5, 1996

Unterlagen folgender Firmen wurden ausgewählt:

<i>ABB</i>	<i>AEG</i>	<i>AEM</i>
<i>BALDOR</i>	<i>HITACHI</i>	<i>LOHER</i>
<i>SIEMENS</i>	<i>VEM</i>	<i>YASKAWA</i>

ANHANG

Beispieldatenblätter

Umrichter

Stromrichter in Mikroprozessortechnik	A 1
Stromrichter in Hybridtechnik	A 2
Spannungszwischenkreisumrichter	A 3
Stromzwischenkreisumrichter	A 4

Motoren

Asynchronmaschine	A 5
Gleichstrommaschine	A 7

Vollständige Datensammlung in *IKARUS 8-05a „Elektrische Antriebe: Datensammlung“*

Als Datenbank über das Fachinformationszentrum in Karlsruhe erhältlich



Datenblatt:

Stromrichter

EU-E<M--040-4-1>95

Typ:

Stromrichter mit Mikroprozessor für 1-Quadrantenbetrieb; 84 bis 268 kW; 400 V

Allgemeine Angaben

Umrichterart
Schutzart
Kühlart
Statusjahr

Stromrichter mit Mikroprozessor für 1-Quadrantenbetrieb
IP20
IC01
1995

Umrichterkerndaten

Nennleistung P_N
Anschlußspannung
Ausgangsspannung U_N
 U_{min}
Ausgangsstrom I_N
 I_{min}
 I_{max}
Ausgangsfrequenz f_N
 f_{min}
 f_{max}
Überlastbarkeit
maximale Überlastdauer t_{max}
zulässige Häufigkeit

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kW	144	84	268	2	
V	400	400	400	2	
V	460	460	460	2	
V	0	0	0	2	
A	313	183	583	2	
A	0	0	0	2	
A	470	274	874	2	maximal 60 s
Hz	-	-	-	2	entfällt
Hz	-	-	-	2	entfällt
Hz	-	-	-	2	entfällt
%	50	50	50	2	
s	60	60	60	2	
1/h	12	12	12	3	

Konstruktionsdaten

Masse m
Leistungsgewicht
Kühlluftbedarf
Hilfsenergieverbrauch für Kühlung

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kg	26	19	40	2	
kg/kVA	0,18	0,23	0,15	2	
m ³ /h	-	-	-	2	
kW	-	-	-	2	

Geeignete Motoren

Motorart
Leistungsbereich

-	3	3	3		1 = ASM, 2 = SM, 3 = GM, 4 = ASM und SM
kW	132	75	250	2	

Betriebsdaten

Lastverlauf M-n²

Wirkungsgrad bei $n/n_N = 30\%$
 $n/n_N = 50\%$
 $n/n_N = 75\%$
 $n/n_N = 100\%$
Leistungsfaktor bei $n/n_N = 100\%$

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
%	80,7	80,6	80,8	3	
%	95,0	94,9	95,1	3	
%	98,5	98,4	98,5	3	
%	99,4	99,3	99,4	2	
-	0,98	0,98	0,98	3	Netzseitig

Lastverlauf M=const.

Umrechnungsfaktoren k für P_{uc}

Drehzahlstellbereich 1:3
Drehzahlstellbereich 1:5
Drehzahlstellbereich 1:10
Drehzahlstellbereich 1:100
Wirkungsgrad bei $n/n_N = 25\%$
 $n/n_N = 50\%$
 $n/n_N = 75\%$
 $n/n_N = 100\%$
 $n/n_N = 120\%$
Leistungsfaktor bei $n/n_N = 100\%$

-	-	-	-	2	entfällt
-	-	-	-	2	entfällt
-	-	-	-	2	entfällt
-	-	-	-	2	entfällt
%	97,5	97,5	97,5	3	
%	98,7	98,7	98,7	3	
%	99,1	99,1	99,1	3	
%	99,4	99,4	99,4	2	
%	99,4	99,4	99,4	3	Feldschwächbereich $P=P_N$
-	0,98	0,98	0,98	3	Netzseitig

Ökonomische Daten

Investitionen
Leistungspreis
Montage- und Inbetriebnahmekosten
Beseitigungskosten
Wartungs- und Instandhaltungskosten
ökonomische Lebensdauer
technische Lebensdauer

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
DM	33500	26300	45600	2	Schrankgerät mit Kommutierungs-drossel
DM/kW	233	313	170	2	
%	10	10	10	3	geschätzt
%	15	15	15	3	geschätzt
DM/a	0	0	0	3	geschätzt
a	5	5	5	2	AfA-Tabelle Frequenzwandler
a	7,5	7,5	7,5	3	= 1,5 * ökonomische Lebensdauer

minimal*: göltig für untere Leistungsgrenze
maximal*: göltig für obere Leistungsgrenze

*** = keine Daten verfügbar
"u" = Angabe aus technischen oder begrifflichen Gründen nicht möglich
"u" = Umrichterbetrieb
"c" = konst. Lastmoment

Datenblatt:

Stromrichter

EU-E<H--040-4-1>95

Typ:

Stromrichter in Hybridtechnik für 1-Quadrantenbetrieb; 84 bis 268 kW; 400 V

Allgemeine Angaben

Umrichterart	Stromrichter in Hybridtechnik für 1-Quadrantenbetrieb
Schutzart	IP20
Kühlart	IC01
Statusjahr	1995

Umrichterdaten

	Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
Nennleistung P_N	kW	144	84	268	2	
Anschlußspannung	V	400	400	400	2	
Ausgangsspannung U_N	V	460	460	460	2	
	V	0	0	0	2	
Ausgangsstrom I_N	A	313	183	583	2	
	A	0	0	0	2	
	A	470	274	874	2	maximal 60 s
Ausgangsfrequenz f_N	Hz	-	-	-	2	entfällt
	Hz	-	-	-	2	entfällt
	Hz	-	-	-	2	entfällt
Überlastbarkeit	%	50	50	50	2	
maximale Überlastdauer t_{max}	s	60	60	60	2	
zulässige Häufigkeit	1/h	12	12	12	3	

Konstruktionsdaten

	Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
Masse m	kg	22	15	33	2	
Leistungsgewicht	kg/kVA	0,15	0,18	0,12	2	
Kühlluftbedarf	m³/h	-	-	-	2	
Hilfsenergieverbrauch für Kühlung	kW	-	-	-	2	

Geeignete Motoren

Motorart	3	3	3		1 = ASM, 2 = SM, 3 = GM, 4 = ASM und SM
Leistungsbereich	kW	132	75	250	2

Betriebsdaten

	Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
Lastverlauf $M=n^2$						
Wirkungsgrad bei $n/n_N = 30\%$	%	80,6	80,6	80,6	3	
$n/n_N = 50\%$	%	95,2	95,1	95,2	3	
$n/n_N = 75\%$	%	98,5	98,5	98,6	3	
$n/n_N = 100\%$	%	99,4	99,4	99,4	2	
Leistungsfaktor bei $n/n_N = 100\%$	-	0,98	0,98	0,98	3	Netzseitig

Lastverlauf $M=const.$

	Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
Umrechnungsfaktoren k für P_{uc}						
Drehzahlstellbereich 1:3	-	-	-	-	2	entfällt
Drehzahlstellbereich 1:5	-	-	-	-	2	entfällt
Drehzahlstellbereich 1:10	-	-	-	-	2	entfällt
Drehzahlstellbereich 1:100	-	-	-	-	2	entfällt
Wirkungsgrad bei $n/n_N = 25\%$	%	97,4	97,4	97,4	3	
$n/n_N = 50\%$	%	98,7	98,7	98,7	3	
$n/n_N = 75\%$	%	99,2	99,2	99,2	3	
$n/n_N = 100\%$	%	99,4	99,4	99,4	2	
$n/n_N = 120\%$	%	99,4	99,4	99,4	3	Feldschwäcbereich $P=P_N$
Leistungsfaktor bei $n/n_N = 100\%$	-	0,98	0,98	0,98	3	Netzseitig

Ökonomische Daten

	Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
Investitionen	DM	8600	6600	12600	2	Schrankgerät mit Kommutierungsdrösel
Leistungspreis	DM/kW	60	79	47	2	
Montage- und Inbetriebnahmekosten	%	10	10	10	3	geschätzt
Beseitigungskosten	%	15	15	15	3	geschätzt
Wartungs- und Instandhaltungskosten	DM/a	0	0	0	3	geschätzt
ökonomische Lebensdauer	a	5	5	5	2	AfA-Tabelle Frequenzwandler
technische Lebensdauer	a	7,5	7,5	7,5	3	= 1,5 * ökonomische Lebensdauer

minimal*: gültig für untere Leistungsgrenze
 maximal*: gültig für obere Leistungsgrenze

*** = keine Daten verfügbar
 "-" = Angabe aus technischen oder begrifflichen Gründen nicht möglich
 "u" = Umrichterbetrieb
 "c" = konst. Lastmoment

Datenblatt

Frequenzumrichter

EU-U<V-.040-4-1>95

Typ

Spannungszwischenkreisumrichter; 98 - 321 kVA; 400 V 3AC

Allgemeine Angaben

Umrichterart
Schutzart
Kühlart
Statusjahr

Spannungszwischenkreisumrichter (IGBT-Pulsumrichter)
IP20
IC01
1995

Umrichterdaten

Scheinleistung S
Anschlußspannung
Ausgangsspannung U_N
 U_{min}
Ausgangsstrom I_H
 I_{min}
 I_{max}
Ausgangsfrequenz f_N
 f_{min}
 f_{max}
Überlastbarkeit
maximale Überlastdauer t_{max}
zulässige Häufigkeit $1/h$

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kVA	170,7	97,8	321,4	2	
V	400	400	400	2	
V	400	400	400	2	
V	0	0	0	2	
A	256,0	146,7	482,2	2	
A	0	0	0	2	
A	426,6	244,5	803,6	2	
Hz	50	50	50	2	
Hz	2	2	2	2	
Hz	120	120	120	2	
%	150	150	150	2	
s	60	60	60	2	
1/h	12	12	12	2	

Konstruktionsdaten

Masse m
Leistungsgewicht
Kühlluftbedarf
Hilfsenergieverbrauch für Kühlung

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kg	145	84	269	2	
kg/kVA	0,85	0,86	0,84	2	
m³/h	0	0	1	2	
kW	-	-	-	2	entfällt

Geeignete Motoren

Motorart
Leistungsbereich

-	4	4	4		1 = ASM, 2 = SM, 3 = GM, 4 = ASM und SM
kW	132	75	250	2	

Betriebsdaten

Lastverlauf M-n²
Wirkungsgrad bei $\eta_N = 30\%$
 $\eta_N = 50\%$
 $\eta_N = 75\%$
 $\eta_N = 100\%$
Leistungsfaktor bei $\eta_N = 100\%$

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
%	88,8	87,6	90,1	3	
%	93,8	93,3	94,4	3	
%	96,3	96,0	96,6	3	
%	97,5	97,3	97,6	3	
-	0,98	0,98	0,98	3	

Lastverlauf M=const.

Umrechnungsfaktoren k für P_{uc}
Drehzahlstellbereich 1:3
Drehzahlstellbereich 1:5
Drehzahlstellbereich 1:10
Drehzahlstellbereich 1:100
Wirkungsgrad bei $\eta_N = 25\%$
 $\eta_N = 50\%$
 $\eta_N = 75\%$
 $\eta_N = 100\%$
 $\eta_N = 120\%$
Leistungsfaktor bei $\eta_N = 100\%$

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
-	0,92	0,90	0,95	2	
-	0,87	0,85	0,91	2	
-	0,83	0,80	0,88	2	
-	*	*	*	2	
%	89,7	89,4	90,1	3	
%	94,7	94,5	95,0	3	
%	96,5	96,3	96,7	3	
%	97,5	97,3	97,6	3	
%	98,3	98,2	98,5	3	Feldschwäcbereich
-	0,98	0,98	0,98	3	

Ökonomische Daten

Investitionen
Leistungspreis
Montage- und Inbetriebnahmekosten
Beseitigungskosten
Wartungs- und Instandhaltungskosten
ökonomische Lebensdauer
technische Lebensdauer

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
DM	34250	14328	70710	2	Listenpreis; 25 % Rabatt üblich
DM/kVA	201	146	220	2	
%	10	10	10	3	geschätzt
%	5	5	5	3	geschätzt
DM/a	0	0	0	3	geschätzt
a	5	5	5	2	A/A-Tabelle Frequenzwandler
a	7,5	7,5	7,5	3	= 1,5 * ökonomische Lebensdauer

minimal*: gültig für untere Leistungsgrenze
maximal*: gültig für obere Leistungsgrenze

*** = keine Daten verfügbar
"-" = Angabe aus technischen oder begrifflichen Gründen nicht möglich
"u" = Umrichterbetrieb
"e" = konst. Lastmoment

Datenblatt

Frequenzumrichter

EU-I<.-.040-4-1>95

Typ

Stromzwischenkreisumrichter; 104 - 328 kVA; 400 V 3AC

Allgemeine Angaben

Umrichterart 6/6 pulsiger Stromzwischenkreisumrichter
 Schutzart IP22
 Kühlart IC37
 Statusjahr 1995

Umrichterkerndaten

Scheinleistung S
 Anschlußspannung
 Ausgangsspannung U_N
 U_{min}
 Ausgangsstrom I_N
 I_{min}
 I_{max}
 Ausgangsfrequenz f_N
 f_{min}
 f_{max}
 Überlastbarkeit
 maximale Überlastdauer t_{max}
 zulässige Häufigkeit

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kVA	177	104	328	2	
V	400	400	400	2	
V	400	400	400	2	
V	0	0	0	2	
A	258	151	476	2	
A	52	30	95	2	
A	284	167	526	2	
Hz	50	50	50	2	
Hz	0	0	0	2	
Hz	100	100	100	2	
%	110	110	110	2	
s	60	60	60	2	
1/h	12	12	12	3	

Konstruktionsdaten

Masse m
 Leistungsgewicht
 Kühlluftbedarf
 Hilfsenergieverbrauch für Kühlung

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kg	200	200	200	2	
kg/kVA	1,1	1,9	0,61	2	
m³/h	1500	1100	2500	2	
kW	0,09	0,05	0,22	3	Schätzung über IKARUS TV8 Axialventilator

Geeignete Motoren

Motorart
 Leistungsbereich

-	4	4	4		1 = ASM, 2 = SM, 3 = GM, 4 = ASM und SM
kW	132	75	250	2	

Betriebsdaten

Lastverlauf M~n²

Wirkungsgrad bei $\eta_{fN} = 30\%$
 $\eta_{fN} = 50\%$
 $\eta_{fN} = 75\%$
 $\eta_{fN} = 100\%$
 Leistungsfaktor bei $\eta_{fN} = 100\%$

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
%	59,2	56,7	62,0	3	
%	82,1	80,6	83,7	3	
%	93,8	93,5	94,1	3	
%	96,8	96,8	96,9	3	
-	0,86	0,84	0,87	2	

Lastverlauf M=const.

Umrechnungsfaktoren k für P_{Uc}

Drehzahlstellbereich 1:3
 Drehzahlstellbereich 1:5
 Drehzahlstellbereich 1:10
 Drehzahlstellbereich 1:100

Wirkungsgrad bei $\eta_{fN} = 25\%$
 $\eta_{fN} = 50\%$
 $\eta_{fN} = 75\%$
 $\eta_{fN} = 100\%$
 $\eta_{fN} = 120\%$
 Leistungsfaktor bei $\eta_{fN} = 100\%$

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
-	0,92	0,90	0,95	2	
-	0,87	0,85	0,91	2	
-	0,83	0,80	0,88	2	
-	*	*	*	2	
%	83,9	82,5	85,4	3	
%	93,1	92,4	93,9	3	
%	96,1	95,8	96,4	3	
%	96,8	96,8	96,9	3	
%	96,8	96,8	96,9	3	Feldschwäcbereich P = const.
-	0,86	0,84	0,87	2	

Ökonomische Daten

Investitionen
 Leistungspreis
 Montage- und Inbetriebnahmekosten
 Beseitigungskosten
 Wartungs- und Instandhaltungskosten
 ökonomische Lebensdauer
 technische Lebensdauer

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
DM	35500	24800	59800	2	20 - 30 % Rabatt auf Listenpreis üblich
DM/kVA	200	237	182	2	
%	10	10	10	3	geschätzt
%	15	15	15	3	geschätzt
DM/a	0	0	0	3	geschätzt
a	5	5	5	2	A/A-Tabelle Frequenzwandler
a	7,5	7,5	7,5	3	= 1,5 * ökonomische Lebensdauer

minimal*: gültig für untere Leistungsgrenze
 maximal*: gültig für obere Leistungsgrenze

*** = keine Daten verfügbar
 "-" = Angabe aus technischen oder begrifflichen Gründen nicht möglich
 "u" = Umrichterbetrieb
 "c" = konst. Lastmoment

Datenblatt:

Elektrische Antriebe / Motor

EA-A<K-6-040-2-1>95

Typ:

Asynchronmaschine; 1,1 - 7,5 kW; 400 V 3 AC; p = 3

Allgemeine Angaben

Motorart
Standardausf. der Ständerwicklung
Isolierstoffklasse
Schutzart
Kühlart
Polpaarzahl
Statusjahr

Asynchronmaschine mit Käfigläufer (Drehspannungsnetz)
Dreieck
F
IP55
IC01
3
1995

Motorkenndaten

Nennleistung P_N (Wellenleistung)
Nenn Drehzahl n_N
Anschlußspannung
Nennstrom I_N bei Anschlußspannung
Nennmoment M_N
Anlaufmoment M_A/M_N
Maximales Moment M_{max}/M_N
Anlaufstrom I_A/I_N
Überlastbarkeit
maximale Überlastdauer t_{max}
maximale mechanische Drehzahl n_{max}
mechanische Grenzleistung P_{max}

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kW	4,0	1,1	7,5	2	
1/min	940	900	960	2	synchrone Drehzahl = 1000 U/min
V	400	400	400	2	
A	9,3	3,0	16,3	2	
Nm	40,6	11,7	74,6	2	
-	2,0	2,4	2,1	3	variiert stark mit Läuferbauart und Hersteller
-	2,4	2,4	2,5	3	variiert stark mit Läuferbauart und Hersteller
-	5,0	4,1	5,1	3	variiert stark mit Läuferbauart und Hersteller
%	50	50	50	2	
s	120	120	120	2	
1/min	3600	3600	3600	2	
% P_N	136	136	142	2	DIN VDE 0530 für S2, S3, S6

Konstruktionsdaten

Masse m
Leistungsgewicht
Trägheitsmoment J
Schalleistung

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kg	60	20	100	2	
kg/kW	15,0	18,2	13,3	2	
kgm ²	0,0408	0,0003	0,10	2	
dB(A)	68	63	71	2	

Betriebsdaten

Wirkungsgrad bei

$P/P_N = 25\%$
 $P/P_N = 50\%$
 $P/P_N = 75\%$
 $P/P_N = 100\%$
 $P/P_N = 125\%$

Leistungsfaktor bei

$P/P_N = 25\%$
 $P/P_N = 50\%$
 $P/P_N = 75\%$
 $P/P_N = 100\%$
 $P/P_N = 125\%$

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
%	63,5	51,5	68,8	2	
%	76,8	65,8	81,0	2	
%	81,1	70,7	84,9	2	
%	82,1	72,2	85,7	2	
%	80,3	70,3	84,1	2	
-	0,38	0,34	0,41	2	
-	0,60	0,55	0,62	2	
-	0,70	0,65	0,72	2	
-	0,76	0,73	0,77	2	
-	0,80	0,78	0,81	2	

Umschalten Dreieck → Stern:

Wirkungsgrad bei

$P/P_N = 35\%$
 $P/P_N = 25\%$
 $P/P_N = 15\%$

Leistungsfaktor bei

$P/P_N = 35\%$
 $P/P_N = 25\%$
 $P/P_N = 15\%$

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
%	81	71	85	3	
%	80	69	83	3	
%	74	64	78	3	
-	0,77	0,74	0,78	3	
-	0,70	0,66	0,72	3	
-	0,61	0,55	0,63	3	

Ökonomische Daten

Investitionen

Spezifische Investitionen

Preiszuschlag für:

Zündschutzart erhöhte Sicherheit

Zündschutzart druckfeste Kapselung

Montage- und Inbetriebnahmekosten

Beseitigungskosten

Wartungs- und Instandhaltungskosten

technische Lebensdauer

ökonomische Lebensdauer

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
DM	1560	630	2510	2	60 - 70 % Rabatt auf Listenpreis üblich
DM/kW	390	573	335	2	bezogen auf Listenpreis
% Inv.	32	36	31	3	
% Inv.	115	149	101	3	
% Inv.	2	2	2	3	geschätzt
% Inv.	5	5	5	3	geschätzt
DM/a	0	0	0	3	geschätzt
a	15	15	15	3	
a	10	10	10	2	A/A-Tabelle Elektromotoren

Umrichterbetrieb 1: Betrieb am: Spannungszwischenkreisumrichter; 3,9 - 11,6 kVA; 400 V 3AC
 Kurzbez.: EU-U<.-.-040-2-1>95

Lastverlauf: M~n²

Maximale mech. Leistung P_{Uq}
 reduziertes Nennmoment M_{Uq}
 Wirkungsgrad bei n/n_N = 30%
 n/n_N = 50%
 n/n_N = 75%
 n/n_N = 100%
 Leistungsfaktor bei Nenndrehzahl

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kW	4,0	1,1	7,5	2	
Nm	40,6	11,7	74,6	2	
%	33,1	23,5	38,4	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 2,7 %
%	57,0	45,6	62,2	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 12,5 %
%	71,5	61,1	75,8	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 42 %
%	77,3	67,5	81,0	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 100 %
-	0,74	0,72	0,76	3	

Lastverlauf: M=const.

Maximale mech. Leistung P_{uc}
 reduziertes Nennmoment M_{uc}
 Wirkungsgrad bei n/n_N = 25%
 n/n_N = 50%
 n/n_N = 75%
 n/n_N = 100%
 n/n_N = 120%
 Moment bei 1,2-facher Nenndrehzahl
 Leistungsfaktor bei Nenndrehzahl

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kW	3,2	0,8	6,2	2	Werte für Stellbereich 1:3
Nm	32,5	9,0	61,4	2	
%	45,7	33,4	51,7	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 25 %
%	63,5	51,1	68,7	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 50 %
%	72,1	61,1	76,5	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 75 %
%	77,3	67,5	81,0	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 100 %
%	77,9	68,1	81,7	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 100 %
Nm	33,9	9,7	62,2	2	Feldschwächbereich P = P _N
-	0,74	0,72	0,76	3	

Umrichterbetrieb 2: Betrieb am: Stromzwischenkreisumrichter entfällt
 Kurzbez.:

Lastverlauf: M~n²

Maximale mech. Leistung P_{Uq}
 reduziertes Nennmoment M_{Uq}
 Wirkungsgrad bei n/n_N = 30%
 n/n_N = 50%
 n/n_N = 75%
 n/n_N = 100%
 Leistungsfaktor bei Nenndrehzahl

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kW	-	-	-	2	
Nm	-	-	-	2	
%	-	-	-	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 2,7 %
%	-	-	-	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 12,5 %
%	-	-	-	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 42 %
%	-	-	-	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 100 %
-	-	-	-	3	

Lastverlauf: M=const.

Maximale mech. Leistung P_{uc}
 reduziertes Nennmoment M_{uc}
 Wirkungsgrad bei n/n_N = 25%
 n/n_N = 50%
 n/n_N = 75%
 n/n_N = 100%
 n/n_N = 120%
 Moment bei 1,2-facher Nenndrehzahl
 Leistungsfaktor bei Nenndrehzahl

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kW	-	-	-	2	Werte für Stellbereich 1:3
Nm	-	-	-	2	
%	-	-	-	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 25 %
%	-	-	-	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 50 %
%	-	-	-	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 75 %
%	-	-	-	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 100 %
%	-	-	-	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 100 %
Nm	-	-	-	2	Feldschwächbereich P = P _N
-	-	-	-	3	

Anmerkung: Güte: 1 = sicher und belastbar
 2 = eingeschränkt belastbar
 3 = geschätzte Werte
 minimal*: gültig für untere Leistungsgrenze
 maximal*: gültig für obere Leistungsgrenze
 *** = keine Daten verfügbar
 ** = Angabe aus technischen oder begrifflichen Gründen nicht möglich
 "u" = Umrichterbetrieb
 "q" = quadratisches Lastmoment
 "c" = konstantes Lastmoment

Datenblatt:

Elektrische Antriebe / Motor

EA-G<N-7-042-4-1>95

Typ:

Gleichstromnebenschlußmaschine; 75 - 250 kW; 420 V DC; p = 2

Allgemeine Angaben

Motorart	Gleichstromnebenschlußmaschine
Standardausl. der Ständerwicklung	-
Isolierstoffklasse	F
Schutzart	IP54
Kühlart	IC37
Polpaarzahl	2
Statusjahr	1995

Motorkenndaten

Nennleistung P_N (Wellenleistung)
 Nenndrehzahl n_N
 Anschlußspannung
 Nennstrom I_N bei Anschlußspannung
 Nennmoment M_N
 Anlaufmoment M_A/M_N
 Maximales Moment M_{max}/M_N
 Anlaufstrom I_A/I_N
 Überlastbarkeit
 maximale Überlastdauer t_{max}
 maximale mechanische Drehzahl n_{max}
 mechanische Grenzleistung P_{max}

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
KW	132	75	250	2	
1/min	1500	1500	1500	2	
V	420	420	420	2	
A	344	200	637	2	
Nm	840	477	1592	2	
-	23	17	31	3	theoretischer Maximalwert
-	23	17	31	3	dem Anlaufmoment gleichgesetzt
-	23	17	31	3	über Ankerkreiswiderstand berechnet
%	50	50	50	2	
s	120	120	120	2	
1/min	2200	2200	2200	3	über Feldschwächung erreichbar
% P_N	-	-	-		

Konstruktionsdaten

Masse m
 Leistungsgewicht
 Trägheitsmoment J
 Schalleistung

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kg	710	440	1250	2	
kg/kW	5,4	5,9	5,0	2	
kgm ²	1	0,5	4	2	
dB(A)	79	77	82	2	

Betriebsdaten

Wirkungsgrad bei $P/P_N = 25\%$
 $P/P_N = 50\%$
 $P/P_N = 75\%$
 $P/P_N = 100\%$
 $P/P_N = 125\%$
 Leistungsfaktor bei $P/P_N = 25\%$
 $P/P_N = 50\%$
 $P/P_N = 75\%$
 $P/P_N = 100\%$
 $P/P_N = 125\%$

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
%	84,2	81,1	87,2	2	
%	90,0	87,6	92,1	2	
%	91,3	89,2	93,3	2	
%	91,5	89,3	93,4	2	
%	91,1	88,9	93,1	2	
-	-	-	-	2	bei Gleichspannung nicht definiert
-	-	-	-	2	bei Gleichspannung nicht definiert
-	-	-	-	2	bei Gleichspannung nicht definiert
-	-	-	-	2	bei Gleichspannung nicht definiert
-	-	-	-	2	bei Gleichspannung nicht definiert

Umschalten Dreieck → Stern:

Wirkungsgrad bei $P/P_N = 35\%$
 $P/P_N = 25\%$
 $P/P_N = 15\%$
 Leistungsfaktor bei $P/P_N = 35\%$
 $P/P_N = 25\%$
 $P/P_N = 15\%$

%	-	-	-		
%	-	-	-		
%	-	-	-		
-	-	-	-		
-	-	-	-		
-	-	-	-		

Ökonomische Daten

Investitionen
 Spezifische Investitionen
 Preiszuschlag für:
 Zündschutzart erhöhte Sicherheit
 Zündschutzart druckfeste Kapselung
 Montage- und Inbetriebnahmekosten
 Beseitigungskosten
 Wartungs- und Instandhaltungskosten
 technische Lebensdauer
 ökonomische Lebensdauer

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
DM	33300	21500	56300	2	25 % Rabatt auf Listenpreis üblich
DM/kW	252	287	225	2	bezogen auf Listenpreis
% Inv.	-	-	-	3	
% Inv.	-	-	-	3	
% Inv.	2	2	2	3	geschätzt
% Inv.	5	5	5	3	geschätzt
DM/a	1000	650	1690	3	geschätzt
a	15	15	15	3	
a	10	10	10	2	A/A-Tabelle Elektromotoren

Umrichterbetrieb 1: Betrieb am: Stromrichter in Hybridtechnik für 1-Quadrantenbetrieb; 84 bis 268 kW; 400 V
 Kurzbez.: EU-E<H-.040-4-1>95

Lastverlauf: M-n²

Maximale mech. Leistung P_{Uq}
 reduziertes Nennmoment M_{Uq}
 Wirkungsgrad bei n/n_N = 30%
 n/n_N = 50%
 n/n_N = 75%
 n/n_N = 100%
 Leistungsfaktor bei Nenndrehzahl

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kW	132	75	250	2	
Nm	840	477	1592	2	
%	29,9	26,9	33,6	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 2,7 %
%	68,8	64,9	72,8	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 12,5 %
%	86,3	83,7	88,9	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 42 %
%	90,9	88,8	92,8	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 100 %
-	-	-	-	-	

Lastverlauf: M=const.

Maximale mech. Leistung P_{uc}
 reduziertes Nennmoment M_{uc}
 Wirkungsgrad bei n/n_N = 25%
 n/n_N = 50%
 n/n_N = 75%
 n/n_N = 100%
 n/n_N = 120%
 Moment bei 1,2-facher Nenndrehzahl
 Leistungsfaktor bei Nenndrehzahl

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kW	132	75	250	2	Werte für Stellbereich 1:3
Nm	840	477	1592	2	
%	70,3	66,2	74,6	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 25 %
%	82,9	79,7	86,0	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 50 %
%	88,1	85,6	90,5	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 75 %
%	90,9	88,8	92,8	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 100 %
%	89,0	86,6	91,3	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 100 %
Nm	700	398	1326	2	Feldschwächbereich P = P _N
-	-	-	-	-	

Umrichterbetrieb 2: Betrieb am: Stromrichter mit Mikroprozessor für 1-Quadrantenbetrieb; 84 bis 268 kW; 400 V
 Kurzbez.: EU-E<M-.040-4-1>95

Lastverlauf: M-n²

Maximale mech. Leistung P_{Uq}
 reduziertes Nennmoment M_{Uq}
 Wirkungsgrad bei n/n_N = 30%
 n/n_N = 50%
 n/n_N = 75%
 n/n_N = 100%
 Leistungsfaktor bei Nenndrehzahl

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kW	132	75	250	2	
Nm	840	477	1592	2	
%	29,9	26,9	33,6	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 2,7 %
%	68,7	64,8	72,7	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 12,5 %
%	86,3	83,6	88,8	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 42 %
%	90,9	88,8	92,8	3	Teillastverhältnis P/P _{Uq} = 100 %
-	-	-	-	-	

Lastverlauf: M=const.

Maximale mech. Leistung P_{uc}
 reduziertes Nennmoment M_{uc}
 Wirkungsgrad bei n/n_N = 25%
 n/n_N = 50%
 n/n_N = 75%
 n/n_N = 100%
 n/n_N = 120%
 Moment bei 1,2-facher Nenndrehzahl
 Leistungsfaktor bei Nenndrehzahl

Einheit	gewählt	minimal*	maximal*	Güte	Kommentar
kW	132	75	250	2	
Nm	840	477	1592	2	
%	70,3	66,2	74,6	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 25 %
%	82,9	79,7	86,0	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 50 %
%	88,1	85,5	90,5	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 75 %
%	90,9	88,8	92,8	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 100 %
%	89,0	86,6	91,3	3	Teillastverhältnis P/P _{uc} = 100 %
Nm	700	398	1326	2	Feldschwächbereich P = P _N
-	-	-	-	-	

Anmerkung: Güte: 1 = sicher und belastbar
 2 = eingeschränkt belastbar
 3 = geschätzte Werte
 minimal*: gültig für untere Leistungsgrenze
 maximal*: gültig für obere Leistungsgrenze

"-" = keine Daten verfügbar
 "u" = Angabe aus technischen oder begrifflichen Gründen nicht möglich
 "u" = Umrichterbetrieb
 "q" = quadratisches Lastmoment
 "c" = konstantes Lastmoment

IKARUS – Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien

- Nr. 3-01 Emissionen des Energie-Imports der Bundesrepublik Deutschland
U.R. Fritsche, F.C. Matthes unter Mitarbeit von T. Münchmeyer
- Nr. 3-02 Kleine Photovoltaikanlagen
B. Günther
- Nr. 3-03 Solare Nahwärme
M. Nast
- Nr. 3-04 Solarimport
O. Langniß
- Nr. 3-05 Braunkohlegewinnung und Braunkohlebrikettierung in den neuen Bundesländern
(Daten für die Jahre 1989, 2005, 2020)
D. Merten, H. Kühndelt
- Nr. 3-06 Kleine Wasserkraftanlagen in Deutschland: Kosten, gegenwärtige Nutzung und Potentiale
M. Horn
- Nr. 3-07 Kosten und Potentiale der Nutzung von Windenergie in der Bundesrepublik Deutschland
J. Diekmann
- Nr. 3-08 Inländische Rohölgewinnung sowie Importe von Rohöl und Mineralölprodukten
B. Praetorius
- Nr. 4-01 Nuklearer Brennstoffkreislauf (ohne Urangewinnung)
D. Faude
- Nr. 4-03 Technische, ökonomische und ökologische Bewertung von Kohleveredelungsverfahren für die
Entwicklung von Strategien zur Reduktion energiebedingter Klimagasemissionen
H. Kubiak
- Nr. 4-04 Bereich Raffinerien und Ölveredelung
K. Hedden, A. Jess
- Nr. 4-05 Bereich Wasserkraftwerke > 1 MW
J. Giesecke, H.-B. Horlacher, G. Förster
- Nr. 4-06 (1) Strom- und wärmeerzeugende Anlagen auf fossiler und nuklearer Grundlage (Teil 1)
P. Wehowsky, W. Leidemann, A. Lezuo, W. Seifritz, M. Fishedick, D. Herrmann,
Th. Pfeifer, U. Fahl, A. Voß, H. Barnert, J. Singh
- Nr. 4-06 (2) Strom- und wärmeerzeugende Anlagen auf fossiler und nuklearer Grundlage (Teil 2)
P. Wehowsky, W. Leidemann, A. Lezuo, W. Seifritz, M. Fishedick, D. Herrmann,
Th. Pfeifer, U. Fahl, A. Voß, H. Barnert, J. Singh
- Nr. 4-08 Status der CO₂-Entsorgungstechniken
W. Seifritz
- Nr. 4-09 Gas-Wärmepumpenanlagen in Nahwärmeversorgungssystemen
R. Lux, D. Herrmann
- Nr. 4-10 Energetische Nutzung von Abfällen in Müll-Heizkraftwerken und Abschätzung
der klimarelevanten Emissionen
W. Röder, E. Thomanetz, O. Tabasaran
- Nr. 4-11 Methanol – ein neuer Energieträger für den Verkehr:
Methanol-Markt und Methanol-Herstellung
B. Höhle, G. Colsman, P. Magin
- Nr. 4-12 Wasserstoff als Energieträger: Wasserstoffherzeugung, Wasserstoffeinsatz im
Kraftwerkssektor, Wasserstoffspeicherung, -transport und -verteilung,
Wasserstoff-Verflüssiger, H₂/O₂-Dampferzeuger
R. Roesler, W. Zittel
- Nr. 4-13 Verteilung und Speicherung elektrischer Energie
H.-J. Haubrich, O. Schmitt, J. Hoffmann, A. Moser, T. Tischbein
- Nr. 4-14 Erdgastransport, -speicherung und -verteilung
H.-G. Fasold, F. Freitag, D. Heymer, L. van Heyden

IKARUS – Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien

- Nr. 4-15 Fernwärmespeicherung, -transport und -verteilung
H.-P. Winkens
- Nr. 4-17 Energieumwandlungssektor in der ehemaligen DDR: Bestandsdaten 1989
D. Merten, H. Munser, H. Hilse
- Nr. 5-03 Struktur und Analyse des Energieverbrauchs im Kleinverbrauch der BRD und DDR als Ausgangsbasis für die Verbrauchsentwicklung in den alten und neuen Bundesländern
B. Geiger
- Nr. 5-04 Analyse des Ist-Zustandes der Heizsysteme zur Wohnraumheizung der ehemaligen DDR und Möglichkeiten zur Ablösung der Kohleheizung
K. Lindner, E. Lindner, U. Zehrfeld
- Nr. 5-05 Kennwerte zur Charakterisierung und Bewertung des energetischen Zustandes und des Energieverbrauchs der Gebäude im Nichtwohnbereich
P. Sonntag, P. Mittner
- Nr. 5-06 Gebäudetypologie und spezifischer Energiebedarf für den Wohnungsbestand in den neuen Bundesländern
R. Rosin, P. Glitz, H. Borges, G. Lorenz
- Nr. 5-07 Gebäude und Beheizungsstruktur (Wohngebäude) in den alten Bundesländern (Sonderauswertung auf der Grundlage von Daten des Statistischen Bundesamtes Wiesbaden aus der Volkszählung 1987)
S. Kolmetz, L. Rouvel
- Nr. 5-10 Kostenermittlung für wärmetechnische Maßnahmen an der Gebäudehülle
C. Gruson, A. Kerschberger
- Nr. 5-11 Nutzenergiebedarf für Raumwärme in der Bundesrepublik Deutschland (alte und neue Bundesländer, 1989)
T. Gülec, S. Kolmetz, L. Rouvel
- Nr. 5-12 Energieverbrauch öffentlicher Liegenschaften in der Bundesrepublik Deutschland (alte Bundesländer, 1989)
T. Gülec, S. Kolmetz, L. Rouvel
- Nr. 5-13 Stand und Tendenzen der Neubautätigkeit in Deutschland
J. Reiß, H. Erhorn
- Nr. 5-14 Bestand und Typologie beheizter Nichtwohngebäude in Westdeutschland
M. Gierga, H. Erhorn
- Nr. 5-16 Berechnung von Heizsystemen in Wohnbauten
Solarkollektoren zur Warmwasserbereitung
G. Pfitzner, V. Schäfer
- Nr. 5-17 Kurzstudie zu den Kosten und zu Energieeinsparungen bei der Raumheizung in den neuen Bundesländern
K. Lindner
- Nr. 5-18 Kostenermittlung für wärmetechnische Maßnahmen an der Gebäudehülle bei Nichtwohngebäuden
C. Gruson
- Nr. 5-19 Ermittlung von Heizungs- und Warmwasserbereitungssystemen inklusive deren Verteilungsverluste in Nichtwohngebäuden
G. Bressler, G. Immel
- Nr. 5-20 Analyse, Synthese und Entwicklung des Stromverbrauchs im Sektor Haushalt der BRD
B. Geiger, H. Kleeberger, T. Brunner, M. Köppl

IKARUS – Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien

- Nr. 5-22 Energieeinsparungspotential im Gebäudebestand durch Maßnahmen an der Gebäudehülle
T. Gülec, S. Kolmetz, L. Rouvel
- Nr. 5-25 Berechnung von Heizungssystemen in Wohnbauten – Konventionelle Wärmeerzeuger
G. Pfitzner, V. Schäfer
- Nr. 5-26 Berechnung von Heizungssystemen in Wohnbauten – Blockheizkraftwerke
G. Pfitzner, V. Schäfer
- Nr. 5-27 Berechnung von Heizungssystemen in Wohnbauten – Wärmepumpen
G. Pfitzner, V. Schäfer
- Nr. 5-28 Endenergiebedarf der Privaten Haushalte für Raumheizung und Warmwasserbereitung in der Bundesrepublik Deutschland
S. Kolmetz, U. Ostermeier, L. Rouvel
- Nr. 5-29 Nachfragevektoren in den Sektoren Haushalt und Kleinverbraucher
S. Kolmetz, L. Rouvel, G. Bressler, E. Jochem
- Nr. 5-30 Berechnung von Heizungssystemen in Wohnbauten
Heizungs- und Warmwasserteilung
G. Pfitzner, V. Schäfer
- Nr. 5-31 Der Energiebedarf raumluftechnischer Anlagen in Nichtwohngebäuden (Lüftung, Kühlung, Klimatisierung)
S. Kolmetz, U. Ostermeier, L. Rouvel
- Nr. 6-02 Energieverbrauch der Investitionsgüter- sowie Nahrungs- und Genußmittelindustrie der alten Bundesländer
J. Schildhauer, S. Fink
- Nr. 6-05 Aktualisierung und Ergänzung der „Emissionsmatrix klimarelevanter Schadstoffe“ für das Teilgebiet Industrie
U.R. Fritsche, F.C. Matthes
- Nr. 8-01 Solarthermie
V. Schäfer, G. Pfitzner
- Nr. 8-02 Wärmepumpen
C. Günther-Pomhoff, G. Pfitzner
- Nr. 8-03 Konventionelle Wärmeerzeuger
G. Pfitzner
- Nr. 8-04 Lichttechnik
R. Hofer
- Nr. 8-05 Elektrische Antriebe
G. Immel, A. Saller
- Nr. 8-05a Elektrische Antriebe: Datensammlung
G. Immel, A. Saller
- Nr. 8-06 Ventilatoren
C. Hoffmann, G. Pfitzner
- Nr. 8-07 Pumpen
H. Bauer, E. Hellriegel, G. Pfitzner
- Nr. 8-08 Kompressionsmaschinen
S. Fink, F. Ilmberger, A. Saller
- Nr. 8-09 Dampf- und Heißwassererzeuger
J. Reichert, W. Eichhammer
- Nr. 8-09a Dampf- und Heißwassererzeuger: Datensammlung
J. Reichert, W. Eichhammer, A. Saller, W. Megele
- Nr. 8-10 Prozeßwärme: Brenner
F. Ilmberger, G. Pfitzner

IKARUS – Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien

- Nr. 8-11 Prozeßwärme: Öfen
F. Ilmberger, G. Pfitzner
- Nr. 8-12 Prozeßwärme: Trockner
F. Ilmberger, G. Pfitzner
- Nr. 8-13 Wärmetauscher zur Abwärmenutzung
S. Kuhn, H. Kuhn, W. Röhrli, U. Leis, T. Münzer
- Nr. 8-14 Verbrennungsmotor – Blockheizkraftwerke
P. Hupperich, H.-J. Schiffgens
- Nr. 8-28 Kompressionsmaschinen. Anleitung zur Datenbanknutzung
S. Fink, F. Ilmberger, A. Saller
-
- Jül-2614 Analyse von Datenbasen zu klimarelevanten Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland
Reihe Internationale Treibhausgasverifikation Nr. 1
U. Fritsche, F.C. Matthes
- Jül-2641 Institutionelle Fragen der Verifikation im Zusammenhang mit einer internationalen
Klimakonvention
Reihe Internationale Treibhausgasverifikation Nr. 2
St. Comes
- Jül-2642 Zur Theorie und Praxis der Verifikation einer globalen Klimakonvention
Reihe Internationale Treibhausgasverifikation Nr. 3
M. Efinger, H. Breitmeier
- Jül-2695 Climate protection and international policy
The Rio-conference between global responsibility and national interests
Reihe Internationale Treibhausgasverifikation Nr. 4
W. Fischer
- Jül-2741 Umweltmeßnetze: Hilfsmittel der Verifikation in einem internationalen Klimaregime
Reihe Internationale Treibhausgasverifikation Nr. 5
St. Comes
- Jül-2786 Estimates of Carbon Dioxide Emissions from Fossil Fuels Combustion in the Main
Sectors of Selected Countries 1971 – 1990
Reihe Internationale Treibhausgasverifikation Nr. 6
J.C. di Primio
- Jül-2837 Identifikation und Analyse von Datenquellen für Emissionsdatenbasen nichtenergiebedingter
Treibhausgase in Deutschland
Reihe Internationale Treibhausgasverifikation Nr. 7
M. Buchert, U. Fritsche, F.C. Matthes
- Jül-2824 Limiting Climate Change
Verification of compliance with treaty commitments to limit greenhouse gas emissions from
forests and land use by remote sensing
Reihe Internationale Treibhausgasverifikation Nr. 8
J. Lanchbery, J. Salt
- Jül-2887 International Greenhouse Gas Verification
– Elements and Institutions –
Reihe Internationale Treibhausgasverifikation Nr. 9
J.C. di Primio, W. Fischer, H.-J. Hoffmann, W. Katscher, U. Kotte, W.-D. Lauppe, G. Stein
- Jül-3190 Erkennen und Kartieren von Wald-, Brach- und Aufforstungsflächen mit multispektralen und
multitemporalen LANDSAT 5 TM Satellitenbildern in der Niederrheinischen Bucht.
Beitrag zur Verifikation internationaler Treibhausgas-Vereinbarungen
Reihe Internationale Treibhausgasverifikation Nr. 10
D. Klaus, A. Poth, M. Voß, M. Canty, G. Stein

IKARUS – Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien

- M 15 Fossile Energieträger und erneuerbare Energiequellen
Abschlußbericht Teilprojekt 3 „Primärenergie“
Monographien des Forschungszentrums Jülich Band 15
J. Diekmann, M. Horn, P. Hrubesch, B. Praetorius, F. Wittke, H.-J. Ziesing
- M 16 Energieumwandlungstechniken als Elemente von Minderungsstrategien
energiebedingter Klimagasemissionen
Abschlußbericht Teilprojekt 4 „Umwandlungssektor“
Monographien des Forschungszentrums Jülich Band 16
U. Fahl, D. Herrmann, A. Voß
- M 17 Energieverbrauchsstrukturen im Sektor Haushalte
Abschlußbericht Teilprojekt 5 „Haushalte und Kleinverbraucher, Sektor Haushalte“
Monographien des Forschungszentrums Jülich Band 17
S. Kolmetz, L. Rouvel
- M 18 Energieverbrauchsstrukturen im Sektor Kleinverbraucher
Abschlußbericht Teilprojekt 5 „Haushalte und Kleinverbraucher, Sektor Kleinverbraucher“
S. Kolmetz, L. Rouvel, G. Bressler, W. Megele, H. Bradke, E. Jochem, D. Köwener, M. Patel
- M 19 Energieeffizienz. Strukturwandel und Produktionsentwicklung der deutschen Industrie
Abschlußbericht Teilprojekt 6 „Industrie“
Monographien des Forschungszentrums Jülich Band 19
E. Jochem, H. Bradke, W. Eichhammer, F. Marscheider-Weidemann, M. Patel, P. Radgen,
St. Ramesohl, D. Saage, B. Schlomann, W. Mannsbart, J. Schildhauer, L. Petrick, G. Obst
- M 20 Klimagasrelevante Energie- und Kostenstrukturen im Straßen-, Schienen-,
Schiffs- und Luftverkehr
Abschlußbericht Teilprojekt 7 „Verkehr“
Monographien des Forschungszentrums Jülich Band 20
J. Brosthaus, R. Kober, W.-R. Müller, H. Waldeyer
- M 21 Querschnittstechniken – Sektor- und branchenübergreifende Techniken
zur Energieumwandlung
Abschlußbericht Teilprojekt 8 „Querschnittstechniken“
Monographien des Forschungszentrums Jülich Band 21
H. Schaefer, V. Schäfer
- M 22 Vereinbarungen zum Klimaschutz – das Verifikationsproblem
Abschlußbericht Teilprojekt 9 „Verifikation“
Monographien des Forschungszentrums Jülich Band 22
W. Fischer, H.-J. Hoffmann, W. Katscher, U. Kotte, W.-D. Lauppe, G. Stein
- M 25 Agreements on Climate Protection – The Verification Problem
Final Report Subproject 9 „Verification“
Monographien des Forschungszentrums Jülich Band 25
W. Fischer, H.-J. Hoffmann, W. Katscher, U. Kotte, W.-D. Lauppe, G. Stein

