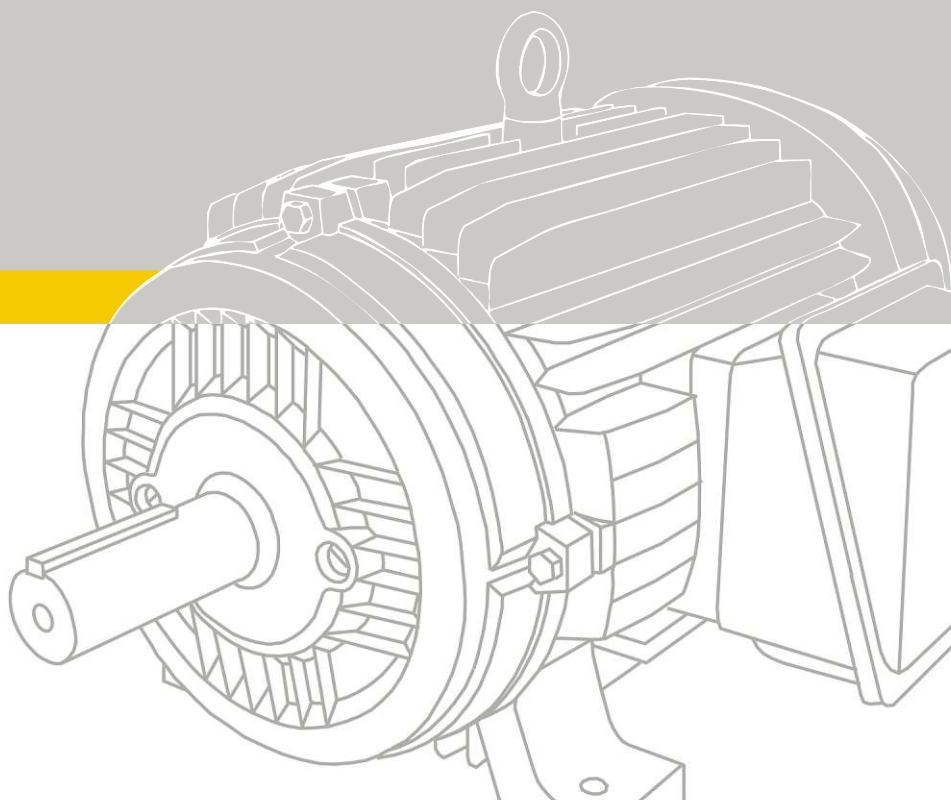


Reinhard Mansius

PRAXISHANDBUCH ANTRIEBS- AUSLEGUNG

GRUNDLAGEN – TOOLS – BEISPIELE



Ein Fachbuch von

konstruktions
praxis

elektro
technik
AUTOMATISIERUNG

ELEKTRONIK
PRAXIS



VOGEL COMMUNICATIONS
GROUP

Reinhard Mansius

Praxishandbuch Antriebsauslegung

Dipl.-Ing. Reinhard Mansius

Praxishandbuch Antriebsauslegung

Grundlagen · Tools · Beispiele

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

Dipl.-Ing. **REINHARD MANSIUS**

Jahrgang 1966

1983–1985 Berufsausbildung zum Elektromonteuer

1989–1994 Studium Elektrotechnik, Fachrichtung: Elektrische Maschinen und Geräte, Automatisierungstechnik

1994–1999 bei Reform Elektromotorenbau GmbH & Co. KG tätig als Prüffeldingenieur, Projekt-ingenieur

1999–2002 bei Demag Cranes & Components GmbH zunächst als Elektrokonstrukteur, dann von 2000 bis 2002 als Projektingenieur / Antriebsberechner

Seit 2002 bei Bosch Rexroth AG als Applikationsingenieur, seit 2003 Produktmanager Antriebssysteme

Weitere Informationen:

www.vogel-professional-education.de

ISBN 978-3-8343-3543-2

ISBN E-Book 978-3-8343-6324-4

3. Auflage. 2025

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Lektorat: Ulrike Klein, Berlin

Druck: General Nyomda Kft.

6728 Szeged, Kollegiumi ut 11/H

Gedruckt auf zertifiziertem Papier mit mineralölfreien Druckfarben

Copyright 2012, 2025 by Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, Würzburg

Vogel Communications Group GmbH & Co. KG

Max-Planck-Straße 7/9

97082 Würzburg

Tel.: +49 931 418-0

Fragen zur Produktsicherheit:

produktsicherheit@vogel.de

Vorwort

Antriebssysteme sind für die Bereitstellung mechanischer Bewegungsenergie im wahrsten Sinne des Wortes die treibenden Kräfte bei der Realisierung von industriellen Prozessen. Die verschiedenen technologischen Verfahren fordern angepasste Lösungen, die die notwendigen Bewegungsabläufe realisieren sollen. Als Antriebsmittel gibt es dafür mehrere Möglichkeiten wie zum Beispiel Verbrennungs-, Hydraulik-, Pneumatik- oder Elektromotoren.

Der elektrische Antrieb hat sich aufgrund vieler Vorteile ein großes Feld an Anwendungen erobert. Umweltfreundlichkeit, gute Transportierbarkeit der notwendigen Energie auch über große Entfernungen, guter Wirkungsgrad bei der Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie, hohe Verfügbarkeit sowie einfache Rückführung und Nutzung anfallender Bremsenergie sind nur einige davon.

Aber auch wenn die Bewegung durch hydraulische oder pneumatische Antriebe realisiert wird, zum Beispiel aufgrund von Anforderungen an den Explosionsschutz, der Unempfindlichkeit gegen Überlastung oder den begrenzten Bauraum am Ort des mechanischen Prozesses, steht am Anfang oftmals ein Elektromotor, der die Primärenergie in mechanische Energie wandelt, so dass eine Umwandlung am Ort des Geschehens nicht mehr notwendig ist.

Das vorliegende Buch konzentriert sich auf die Beschreibung der Auslegung elektrischer Antriebssysteme. Hier wird die Auswahl der wesentlichen Bestandteile Motor, Getriebe, Stellgerät, Netzversorgung sowie deren Zusatzkomponenten beschrieben und auf die Berechnung der dafür notwendigen Größen intensiv eingegangen.

Basis bildet die richtige Analyse der physikalischen Größen des geforderten Prozesses, deren Aufarbeitung sowie die Kenntnis der technischen Möglichkeiten und Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Komponenten.

In unserem kostenlosen Onlineservice **InfoClick** finden Sie zahlreiche nützliche Auslegungstools, die als Unterstützung dienen, um ausgewählte Berechnungsschritte aus dem Buch auszuführen.

In der 3. Auflage wurden der in der Automation weit verbreitete Schrittmotor sowie der aus Energieeffizienzgründen verstärkt zum Einsatz kommende Synchron-Reluktanzmotor neu mit aufgenommen und auf die zur Auslegung nötigen Grundlagen eingegangen. Die Besonderheiten bei der Schrittmotorauslegung werden darüber hinaus in einem separaten Beispiel dargestellt.

Weiterhin wird für die Erstellung eines Trapez-Bewegungsprofils eine Möglichkeit zur variablen Aufteilung der einzelnen Bewegungsabschnitte aufgezeigt. Dadurch wird die Gestaltung des Bewegungsprofils für Optimierungszwecke vereinfacht.

Beim Asynchronmotor mit Schleifringläufer wurden die Berechnungen zum Anlauf und zur Drehzahlstellung mit Läuferwiderständen erweitert. Damit können Größen, welche für die Auslegung relevant, jedoch häufig nicht vorhanden sind, mit einfachen Mitteln aus den Motordaten abgeleitet werden.

Zu den Berechnungen auf der Netzseite ist das Thema Netzkurzschlussleistung neu aufgenommen worden. Die Netzversorgung kann somit auf Eignung in Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit des Netzes geprüft werden.

Inhalt

Vorwort	5
1 Einleitung	11
1.1 Aufgaben der Antriebsauslegung	11
1.2 Lastkennlinien von Arbeitsmaschinen	11
1.3 Kennlinien von Motoren	13
1.3.1 Allgemeines	13
1.3.2 Drehstrom-Asynchronmotor	15
1.3.3 Drehstrom-Synchronmotor	26
1.3.4 Schrittmotor	30
1.3.5 Synchron-Reluktanzmotor	35
1.3.6 Gleichstrom-Nebenschlussmotor (fremderregt)	39
1.4 Motor und Arbeitsmaschine	43
1.5 Erwärmung und Abkühlung elektrischer Maschinen	45
1.6 Betriebsarten elektrischer Maschinen	49
1.7 Charakteristiken der Anwendungen	53
1.8 Topologie des mechanischen Antriebsstrangs	56
1.9 Grundlegende Vorgehensweise bei der Antriebsauslegung	60
2 Berechnung der Bewegungsabläufe	65
2.1 Allgemeines	65
2.2 Beschleunigungsphase	67
2.3 Konstantphase	69
2.4 Verzögerungsphase	70
2.5 Dreieckprofil	72
2.6 Trapezprofil	74
2.7 Trapezprofil nach Drittel-Regel	75
2.8 Trapezprofil mit variabler Aufteilung	77
2.9 Relative Einschaltdauer	79
2.10 Fahrbereich	80
2.11 Ruck und Ruckbegrenzung	81
2.12 Bewegungsgesetze höherer Ordnung	82
2.13 Optimierung des Bewegungsablaufs	85
3 Berechnung der Kräfte und Drehmomente	89
3.1 Allgemeines	89
3.2 Gewichtskraft	89
3.3 Hangabtriebskraft	90
3.4 Aufstandskraft	90
3.5 Anziehungskraft	91
3.6 Haftreibungskraft	92
3.7 Gleitreibungskraft	93
3.8 Rollreibungskraft	93
3.9 Prozesskräfte	95
3.10 Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte	95

3.11	Windkräfte	96
3.12	Sonstige Zusatzkräfte	98
3.13	Wirksames Gewichtsdrehmoment	99
3.14	Haftreibdrehmoment	101
3.15	Gleitreibdrehmoment	101
3.16	Rollreibdrehmoment	102
3.17	Prozessdrehmomente	103
3.18	Beschleunigungs- und Verzögerungsdrehmomente	104
3.19	Sonstige Zusatzdrehmomente	107
3.20	Zusammenfassung der Kräfte und Drehmomente	107
4	Umrechnung am Abtriebsselement.	113
4.1	Allgemeines	113
4.2	Ritzel mit Zahnstange	115
4.3	Rad	116
4.4	Rolle	116
4.5	Seiltrommel	117
4.6	Zahnriemen	120
4.7	Gewindetrieb	121
4.8	Schubkurbel	122
5	Umrechnung bei Übertragungselementen	125
5.1	Allgemeines	125
5.2	Stirnradgetriebe	127
5.3	Schneckengetriebe	128
5.4	Planetenradgetriebe	128
5.5	Keil- und Flachriemen	130
5.6	Zahnriemen und Ketten	130
5.7	Kupplungen und Gelenkwellen	131
5.8	Auswahl und Optimierung des Übersetzungsverhältnisses	131
5.9	Auswahl der Getriebegröße	137
5.10	Lineare Übersetzung	138
6	Motorauswahl	139
6.1	Drehzahlen und Geschwindigkeiten	139
6.2	Drehmomente und Kräfte	142
6.3	Arbeitspunkte der Anwendung	145
6.4	Externes Massenträgheitsmoment	145
6.5	Auswahl des Motors	145
6.5.1	Vorauswahl	146
6.5.2	Nachrechnung des ausgewählten Motors	147
7	Auswahl des Stellgerätes	149
7.1	Für Nenndaten des Motors	149
7.2	Für den tatsächlichen Strombedarf des Motors	151
7.3	Nach Kennlinie für Motor mit Stellgerät	156
7.4	Erforderliche Ausgangsfrequenz	156

8 Berechnung der Werte am Zwischenkreis	161
8.1 Leistungen	161
8.1.1 Effektive Zwischenkreisleistung	162
8.1.2 Mittlere Zwischenkreis-Einspeiseleistung	165
8.1.3 Mittlere Zwischenkreis-Rückspeiseleistung	166
8.1.4 Maximale Zwischenkreis-Einspeiseleistung	167
8.1.5 Maximale Zwischenkreis-Rückspeiseleistung	167
8.1.6 Maximale Zwischenkreisleistung	167
8.2 Energie	167
9 Auslegung der Netzversorgung und des Bremswiderstandes	169
10 Berechnung der Netzgrößen	177
10.1 Komponenten im Netzschlussstrang	177
10.2 Wirkleistung	179
10.3 Scheinleistung	180
10.4 Netzstrom	180
10.5 Netzkurzschlussleistung	181
11 Auslegung der Motorbremse	185
11.1 Allgemeines	185
11.2 Berechnung und Überprüfung der Bremsmomente	186
11.2.1 Erforderliches Bremsmoment für dynamisches Bremsen	186
11.2.2 Erforderliches Bremsmoment für statisches Bremsen	186
11.2.3 Auswahl und Überprüfung der Bremse hinsichtlich Bremsmoment	187
11.3 Berechnung und Überprüfung der Bremsenergie	187
11.3.1 Anfallende Bremsenergie bei dynamischen Bremsvorgängen	187
11.3.2 Überprüfung der Bremse hinsichtlich Bremsenergie	188
11.3.3 Möglichkeiten zur Reduzierung der Bremsenergie	189
11.4 Weitere Hinweise	192
12 Berechnungen rotativer Motoren bei direktem Netzbetrieb	195
12.1 Möglichkeiten zur Berechnung der Hochlaufzeit	195
12.1.1 Grafisch-rechnerische Bestimmung	195
12.1.2 Mit mittlerem Anlaufmoment	197
12.2 Auslegung verschiedener Anlauf- und Drehzahlstellverfahren	198
12.2.1 Stern-Dreieck-Anlauf	198
12.2.2 Anlauf mit variabler Spannung	200
12.2.3 Anlauf und Drehzahlstellung mit Läuferwiderständen	201
12.3 Verlustenergie bei Anlauf, Reversieren und Gegenstrombremsen	208
12.4 Zulässige Schalthäufigkeit für S1-Motoren	212
12.5 Berechnung der erforderlichen Motornennleistung bei verschiedenen Betriebsarten	213
12.5.1 S1-Motoren	213
12.5.2 S2-Motoren	217
12.5.3 S3-Motoren	218

13 Projektierungshinweise	221
13.1 Fehlervermeidung	221
13.2 Leistungssteigerung durch Betrieb an höherer Eckfrequenz	226
13.3 Energiespeicher für Netzspannungsausfall	228
13.4 Energiespeicher für dynamische Anwendungen	229
13.5 Lastpendeln	230
13.6 Rutschgrenze	231
13.7 Kippgrenze	232
13.8 Optimierung der Hochlauframpe	233
14 Energieeinsparung	237
15 Beispiele	241
15.1 Fahrtrieb mit Frequenzumrichter	241
15.2 Drehtrieb mit Frequenzumrichter	261
15.3 Linearmotor nach relativer Einschaltdauer	274
15.4 Wickelantrieb mit Asynchronmotor in Feldschwächung	279
15.5 Betrieb an 87-Hz-Eckfrequenz	285
15.6 Bewegungsablauf für eine mitlaufende Bearbeitung	287
15.7 Ruckbegrenzung	290
15.8 Auslegung mit Polynom 5. Ordnung	292
15.9 Anlasswiderstände für Schleifringläufermotor	293
15.10 Optimierung der Hochlauframpe	297
15.11 Formateinstellung mit Schrittmotor	300
16 Technischer Anhang	309
16.1 Grundbeziehungen physikalischer Größen	309
16.2 Einheiten und deren Umrechnungen	310
16.3 Physikalische Konstanten	314
Formelzeichen	315
Literaturverzeichnis	323
Stichwortverzeichnis	325

1 Einleitung

Einleitend werden die grundlegenden Zusammenhänge über das Drehmoment-Drehzahlverhalten von Motor und Arbeitsmaschine und der gezielten Beeinflussung der Motorcharakteristik durch verschiedene Stellmöglichkeiten gezeigt. Die Erläuterungen zu den Verlusten und der durch sie verursachten Erwärmung dienen dem notwendigen Grundverständnis für die thermische Auslegung. Die Darstellung möglicher Topologien des mechanischen Antriebsstrangs und die Übersicht zu den einzelnen Auslegungsschritten runden das notwendige Basiswissen ab.

1.1 Aufgaben der Antriebsauslegung

Die wesentliche Aufgabe der Antriebsauslegung besteht darin, einen Motor mit seiner Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie an die Kennlinie der anzutreibenden Arbeitsmaschine anzupassen. Es geht dabei um die folgenden Hauptkriterien:

- **Dynamische Beanspruchung**
Der Motor muss die geforderten Maximalmomente für kurzzeitige Überlastungen (Anlauf, Kurzzeitbetrieb, Bremsen usw.) in allen Betriebssituationen sicher aufbringen.
- **Thermische Beanspruchung**
Der Motor soll thermisch gut ausgelastet sein, darf sich aber nicht über seine zulässige Temperatur erwärmen.

Die Anpassungen können auf unterschiedliche Weise erfolgen. Man kann den natürlichen charakteristischen Drehmomentverlauf von Elektromotoren ausnutzen, durch Zwischenschaltung mechanischer Übertragungselemente eine Drehmomentanpassung vornehmen und/oder die Motorkennlinie durch elektrische Stellglieder entsprechend anpassen. Durch Letzteres ist man nicht mehr an die starren Kennlinien der verschiedenen Motorarten gebunden und kann in vielen Fällen die einfache wie auch robuste Asynchronmaschine einsetzen.

Dafür ist die Auswahl eines geeigneten Stellgerätes für den Motor erforderlich, das ebenfalls die dynamischen und thermischen Erfordernisse erfüllen muss.

Für die Beurteilung der Netzbelastung sind die Werte auf der Netzseite zu berechnen. Damit können Maßnahmen zur Reduzierung unzulässiger Beanspruchungen festgelegt und dafür erforderliche Komponenten ausgelegt werden.

1.2 Lastkennlinien von Arbeitsmaschinen

Die Lastkennlinie einer Arbeitsmaschine stellt ihren Drehmomentbedarf in Abhängigkeit der Drehzahl dar. Grundsätzlich lassen sich die Kennlinien in vier typische Verläufe einteilen. In der Praxis treten sie jedoch in den wenigsten Fällen in diesen idealisierten Formen auf. Das Überwinden der Haftreibung beim Übergang vom Stillstand in Bewegung hebt die Kennlinien im unteren Bereich beispielsweise an. Oftmals handelt es sich aber auch um eine Überlagerung der verschiedenen Grundformen, die noch von anderen Einflussfaktoren, wie zum Beispiel der Temperatur, abhängig sind.

Konstantes Drehmoment (Bild 1.1a)

Das Lastmoment ist von der Drehzahl unabhängig und die Leistung steigt proportional:

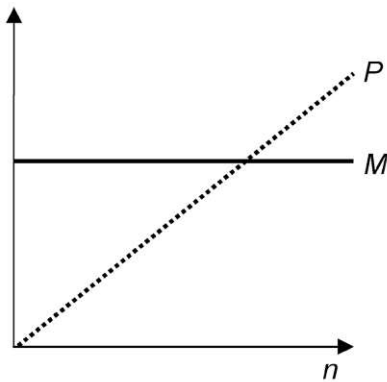
$$M = \text{konstant}$$

$$P \sim n$$

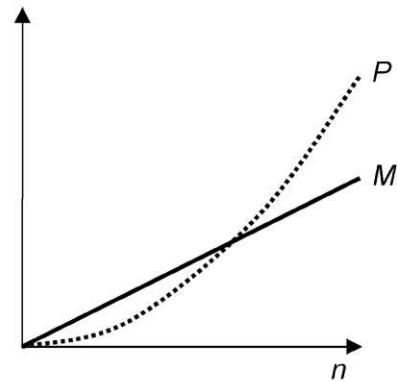
Diesen Verlauf haben Maschinen, die Arbeit gegen die Schwerkraft leisten – wie beispielsweise Fördermaschinen, Aufzüge oder Hebezeuge. Auch Maschinen, die reine Reibungsarbeit zu verrichten haben, folgen diesem Verlauf.

Bei Drehmaschinen, wenn bei gleichbleibenden Durchmesser und Schnittkraft in axialer Richtung gearbeitet wird (Längsdrehen), ist der Drehmomentbedarf ebenfalls konstant.

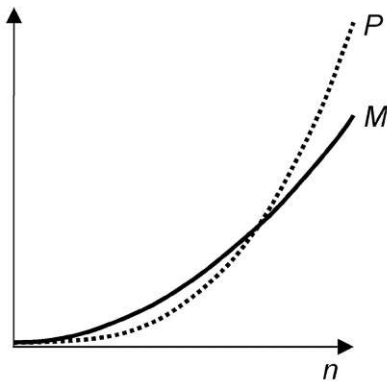
Auch die mittlere Last von Kolbenpumpen folgt dieser Charakteristik.



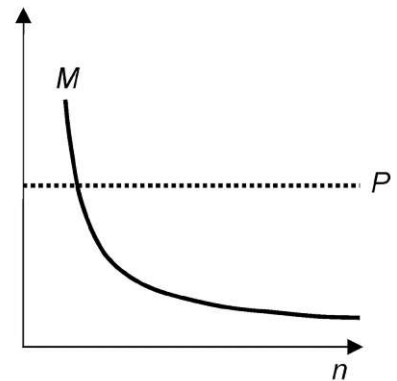
a)



b)



c)



d)

Bild 1.1 Lastkennlinien von Arbeitsmaschinen

a) konstant

b) linear steigend

c) quadratisch steigend

d) $1/n$ abfallend

Linear ansteigendes Drehmoment (Bild 1.1b)

Das Lastmoment steigt proportional mit der Drehzahl und die Leistung quadratisch:

$$M \sim n$$

$$P \sim n^2$$

Bei Maschinen mit geschwindigkeitsproportionaler Reibung bzw. Viskosereibung oder Kalandern für Papier-, Textil-, Kunststoff- und Gummifolien liegt dieser Verlauf vor.

Quadratisch ansteigendes Drehmoment (Bild 1.1c)

Das Lastmoment steigt quadratisch mit der Drehzahl und die Leistung kubisch:

$$M \sim n^2$$

$$P \sim n^3$$

Maschinen, die gegen Luft- oder Flüssigkeitswiderstände arbeiten müssen, wie beispielsweise Lüfter, Kreiselpumpen, Verdichter, Zentrifugen, Schiffsschrauben und Rührwerke haben diesen Drehmomentbedarf.

Abfallendes Drehmoment (Bild 1.1d)

Das Lastmoment fällt proportional $1/n$ (hyperbolisch) bei steigender Drehzahl und die Leistung bleibt konstant:

$$M \sim 1/n$$

$$P = \text{konstant}$$

Diese Abhängigkeit ist typisch für Maschinen zum Auf- oder Abwickeln von Papier, Blech, Folien usw., wenn die lineare Geschwindigkeit und Kraft am Umfang konstant ist, sich aber der Durchmesser ständig ändert.

Bei Drehmaschinen, wenn in radialer Richtung gearbeitet wird, ändert sich der Durchmesser ebenfalls. Zum Erreichen einer konstanten Schnittleistung wird die Drehzahl angepasst und es ergibt sich auch dieser Verlauf.

Eine weitere «Last» ist das erforderliche Drehmoment zum Beschleunigen und Verzögern von Massenträgheitsmomenten. Der Verlauf dieses Drehmomentes ergibt sich bei ungesteuerten Antrieben aus dem Drehmomentüberschuss des Motors zum Lastmoment und bei gesteuerten bzw. geregelten Antrieben ist er proportional zur Änderungsgeschwindigkeit der Drehzahl, der Beschleunigung (siehe Kapitel 1.4).

1.3 Kennlinien von Motoren

1.3.1 Allgemeines

Auch die Charakteristik der Motoren wird durch ihre Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie beschrieben. Sie lassen sich ebenfalls in vier typische Verläufe einteilen und zeigen, wie sich die Drehzahl bei einer bestimmten Belastung ändert.

Synchronverhalten (Bild 1.2a)

Wird der Motor mit unterschiedlich großen Drehmomenten innerhalb seines Bemessungsberei-

ches belastet, bleibt die Drehzahl unverändert. Diese «starre» Kennlinie haben permanent als auch elektromagnetisch erregte Synchronmaschinen.

Nebenschlussverhalten (Bild 1.2b)

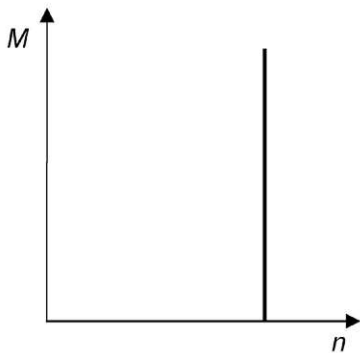
Bei Belastung fällt die Drehzahl gegenüber dem Leerlauf leicht ab. Dieses «harte» Verhalten zeigen Gleichstrom-Nebenschuss- und Asynchronmaschinen.

Reihenschlussverhalten (Bild 1.2c)

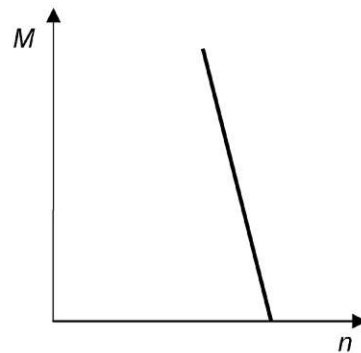
Das «weiche» Reihenschlussverhalten ist typisch für Maschinen, die einen hohen Drehzahlabfall bei steigender Drehmomentabgabe haben. Die Gleich- und die Wechselstrom-Reihenschlussmaschine sind typische Vertreter für dieses Verhalten.

Doppelschlussverhalten (Bild 1.2d)

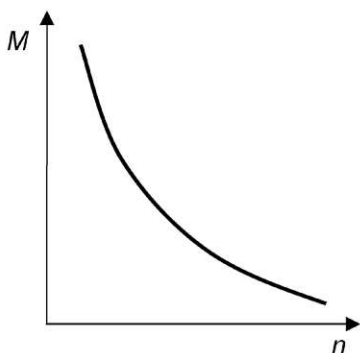
Eine Mischung aus Reihen- und Nebenschlussverhalten stellt das Doppelschlussverhalten dar. Die Gleichstrom-Doppelschlussmaschine, eine Kombination aus der Gleichstrom-Reihen- und der Gleichstrom-Nebenschlussmaschine, weist diese Charakteristik auf.



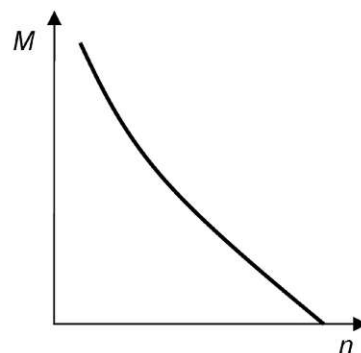
a)



b)



c)



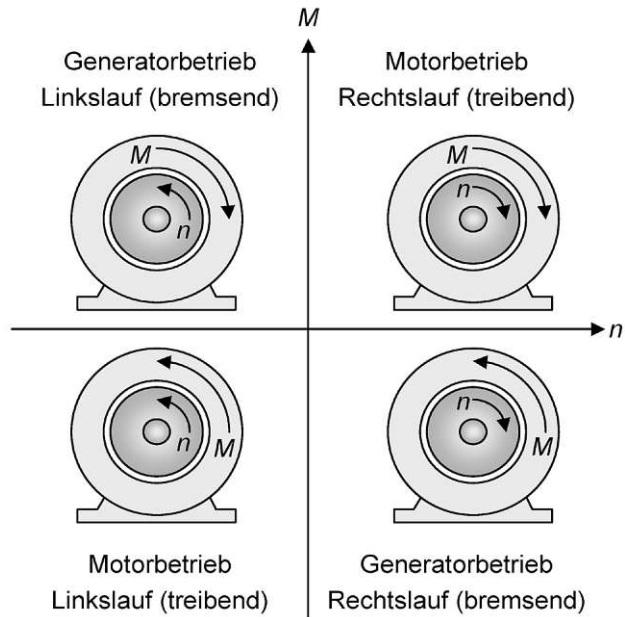
d)

Bild 1.2 Drehmomentkennlinien von Motoren

- a) Synchronverhalten
- b) Nebenschlussverhalten
- c) Reihenschlussverhalten
- d) Doppelschlussverhalten

Bild 1.3

Betriebsbereiche von Motoren
in den vier Drehmoment-Dreh-
zahl-Quadranten



Betriebsbereiche

Grundsätzlich kann ein Motor im Rechts- oder im Linkslauf betrieben werden. In Abhängigkeit davon, ob das Drehmoment des Motors gegen oder mit der aktuellen Drehrichtung des Läufers wirkt, arbeitet er im Generator- oder im Motorbetrieb. Bild 1.3 zeigt die sich ergebenden Betriebsbereiche in den vier Drehmoment-Drehzahl-Quadranten.

Im Generatorbetrieb geht die Energie von der Arbeitsmaschine zum Motor. Ist der Motor mit einem Netz verbunden, das in der Lage ist, die anfallende Energie aufzunehmen, kann einer der großen Vorteile von Elektromotoren ausgenutzt werden: Die überschüssige Energie wird anderen elektrischen Verbrauchern zur Verfügung gestellt. Prinzipiell ist das sowohl bei direkt am Netz betriebenen Motoren möglich, zum Beispiel während des Absenkens großer Lasten bei Kranantrieben, als auch im drehzahlvariablen Betrieb mit rückspeisefähigen Stellgliedern.

1.3.2 Drehstrom-Asynchronmotor

Hinweis

Berechnungstool auf [InfoClick!](#)

Seine Robustheit und die günstige Herstellung in genormten Baugrößen- und Leistungsabstufungen machen den Drehstrom-Asynchronmotor zu dem am meisten eingesetzten Antrieb im industriellen Umfeld. Durch die sich immer weiter entwickelnde Umrichtertechnik hat der Drehstrom-Asynchronmotor auch das breite Feld der drehzahlvariablen Antriebe erobert. Begünstigt wird dies auch dadurch, dass der Asynchronmotor mit vielfältigen Optionen ausgestattet werden kann und wartungsintensive mechanische Stromwender wie beispielsweise beim Gleichstrommotor nicht vorhanden sind.

Dem Netz entnimmt die Asynchronmaschine die Scheinleistung S :

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

Wie in Bild 1.4 zu erkennen ist, setzt sich die Scheinleistung aus der zum Aufbau des Magnetfeldes notwendigen Blindleistung Q :

$$Q = U \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot \sin\varphi$$

und der elektrischen Wirkleistung P :

$$P_{\text{elektr}} = U \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot \cos\varphi$$

zusammen.

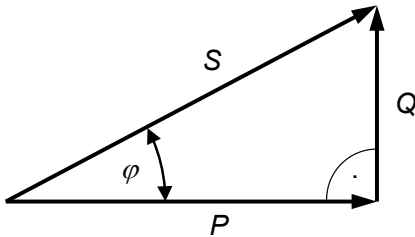


Bild 1.4

Leistungen beim
Drehstrom-Asynchronmotor

Die Blindleistung pendelt zwischen Motor und Netz hin und her und verrichtet keine Wirkarbeit.

Die an der Welle zur Verfügung stehende mechanische Leistung errechnet sich mit Hilfe des Wirkungsgrades zu:

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{elektr}} \cdot \eta$$

beziehungsweise aus dem Drehmoment und der Drehzahl:

$$P_{\text{mech}} = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

Somit ist die gesamte Verlustleistung:

$$P_v = P_{\text{elektr}} \cdot (1 - \eta)$$

In einfacher Weise kann noch die Aufteilung der gesamten Verlustleistung auf Ständer und Läufer ermittelt werden. Dafür wird zunächst die Luftspaltleistung berechnet. Sie ist der Leistungsanteil, der auf den Läufer übertragen wird:

$$P_{\text{Luftspalt}} = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{\text{syn}}$$

(n_{syn} wird im nächsten Absatz berechnet.)

Damit ist die Verlustleistung des Ständers:

$$P_{v_Ständer} = P_{\text{elektr}} - P_{\text{Luftspalt}}$$

und die des Läufers:

$$P_{v_Läufer} = P_{\text{Luftspalt}} - P_{\text{mech}}$$

Als Drehfeldfrequenz oder Synchronfrequenz wird die Drehzahl des im Ständer des Motors umlaufenden Magnetfeldes bezeichnet. Sie ist allein von der Frequenz der Spannung und von der Polpaarzahl des Motors abhängig:

$$n_{\text{syn}} [\text{min}^{-1}] = \frac{f \cdot 60}{p}$$

Die mechanische Drehzahl des Läufers erreicht prinzipbedingt nicht die Drehfeldfrequenz und bleibt um die Schlupfdrehzahl, die von der Belastung abhängig ist, zurück:

$$n = n_{\text{syn}} - n_{\text{Schlupf}}$$

Die Drehzahl des Läufers ist also asynchron zur Drehfeldfrequenz, was diesem Motortyp seinen Namen gibt.

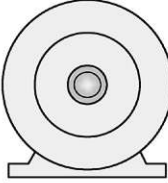
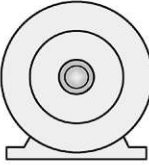
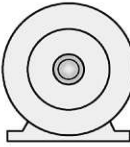
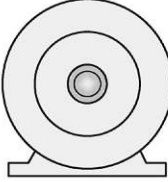
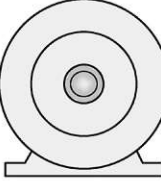
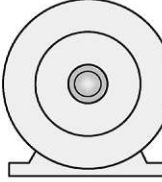
	4 Polpaare (8-polig)	3 Polpaare (6-polig)	2-Polpaare (4-polig)
gleiche Leistung			
P:	90 kW	90 kW	90 kW
M:	1161 Nm	868 Nm	581 Nm
n:	740 min⁻¹	990 min⁻¹	1480 min⁻¹
AH:	315 mm	280 mm	250 mm
a)			
ca. gleiches Drehmoment			
P:	90 kW	110 kW	160 kW
M:	1161 Nm	1061 Nm	1032 Nm
n:	740 min⁻¹	990 min⁻¹	1480 min⁻¹
AH:	315 mm	315 mm	315 mm
b)			

Bild 1.5 Beispielhafte Baugrößenverhältnisse von Drehstrom-Asynchronmotoren (AH = Achshöhe)

a) Motoren gleicher Leistung

b) Motoren gleichen Drehmomentes

Die Höhe der Schlupfdrehzahl ist eine kennzeichnende Größe des Asynchronmotors und wird auch als bezogene Größe zur Erleichterung für weiterführende Berechnungen als Schlupf angegeben:

$$s = \frac{n_{\text{syn}} - n}{n_{\text{syn}}}$$

Das Drehmoment, das an der Welle abgegeben werden kann, berechnet sich nach

$$M = \frac{P_{\text{mech}}}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

und bestimmt wesentlich die Baugröße des Motors (Bild 1.5a, b). Grund dafür ist die Abhängigkeit des Drehmoments von dem Durchmesser D und der Länge l des Magnetkreises:

$$M \sim (D^2, l)$$

Am häufigsten werden Motoren mit zwei Polpaaren eingesetzt. Bei Motoren mit einem Polpaar wirkt sich die doppelt so hohe Drehzahl in vielen Fällen mindernd auf die Lebensdauer nachgeschalteter Übertragungselemente aus und ist geräuschintensiver. Höherpolige Motoren bauen bei gleicher Leistung größer und bedeuten damit auch höhere Anschaffungskosten.

Die Kennlinie des Drehstrom-Asynchronmotors für Betrieb am Netz mit konstanter Spannung und Frequenz ist in Bild 1.6 dargestellt. Nach dem Zuschalten der Netzspannung entwickelt der Motor zum Zeitpunkt des Stillstands sein Anlaufmoment M_A und durchläuft dann das Sattelmoment M_S , das kleinste Drehmoment, welches zwischen Stillstand und der Drehzahl beim Kippmoment auftritt. Danach folgt das Kippmoment M_K – das höchste Drehmoment, das die Asynchronmaschine ohne plötzlichen Drehzahlabfall abgeben kann. Für den Leerlauf, also ohne äußere Last, läuft der Motor fast bis zur synchronen Drehzahl n_{syn} hoch.

Hinweis

Die Erklärung bzw. Begriffsbestimmung für Sattel- und Kippmoment ist für Motoren, bei denen das Drehmoment mit steigender Drehzahl kleiner wird (z.B. Stillstandsmotor, Bild 1.14), nicht gültig.

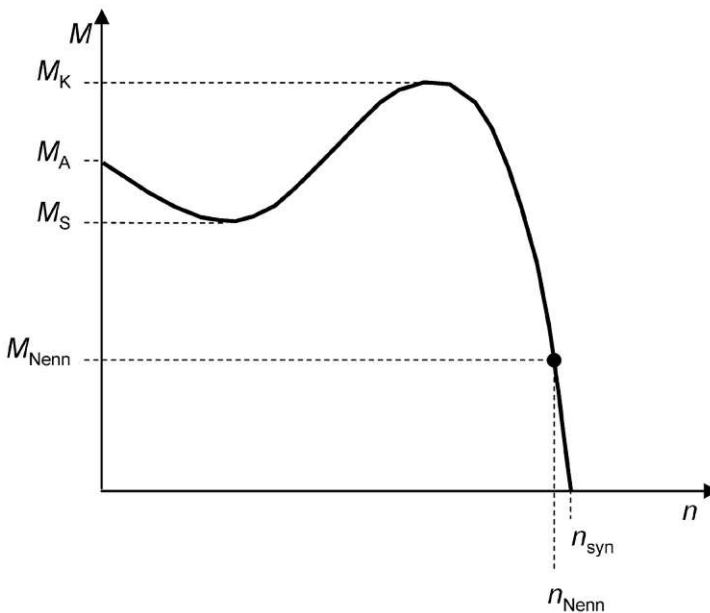


Bild 1.6 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie Drehstrom-Asynchronmotor

Die verschiedenen Betriebsbereiche der Asynchronmaschine, bei Betrieb am Netz mit fester Spannung und Frequenz, sind in Bild 1.7 sowohl für Rechtslauf (durchgehende Kennlinie) als auch für Linkslauf (gestrichelte Kennlinie) dargestellt.

Der Motorbetrieb findet immer im Schlupfbereich von $s = 1$ bis (fast) $s = 0$ statt. In diesem Bereich wirkt das Lastmoment entgegen der Drehrichtung der Motorwelle. Als Beispiel für diesen Betriebsbereich sei das Anheben einer Last mit einer Seilwinde genannt.

Wirkt ein genügend großes Lastmoment in Drehrichtung des Motors, wird die Maschine davon über ihre Synchrongeschwindigkeit hinaus angetrieben. Sie geht in den negativen Schlupfbereich und arbeitet als Generator. Ein Beispiel dafür ist das Absenken einer Last mit einer Seilwinde.

Der Gegenstrombremsbetrieb findet statt, wenn die Richtung des Drehfeldes und somit auch des Drehmoments im Motor umgekehrt wird, während sich die Motorwelle noch in die entgegengesetzte Richtung dreht. Dieser Zustand wird erreicht, indem man den Motor vom Netz trennt, zwei Phasen der Zuleitung vertauscht und sofort wieder einschaltet. In diesem Moment beträgt der Schlupf ca. 2. Genutzt wird dieser Betriebsbereich zum Beispiel, um Antriebe mit großen Massenträgheitsmomenten schnell in den Stillstand zu bringen. Nach Erreichen des Stillstandes muss der Motor vom Netz getrennt werden, um nicht wieder in die entgegengesetzte Richtung anzulaufen.

Ist der Anlauf in die Gegenrichtung gewollt, bezeichnet man den Vorgang des Gegenstrombremsens mit anschließendem Anlauf als Reversierbetrieb.

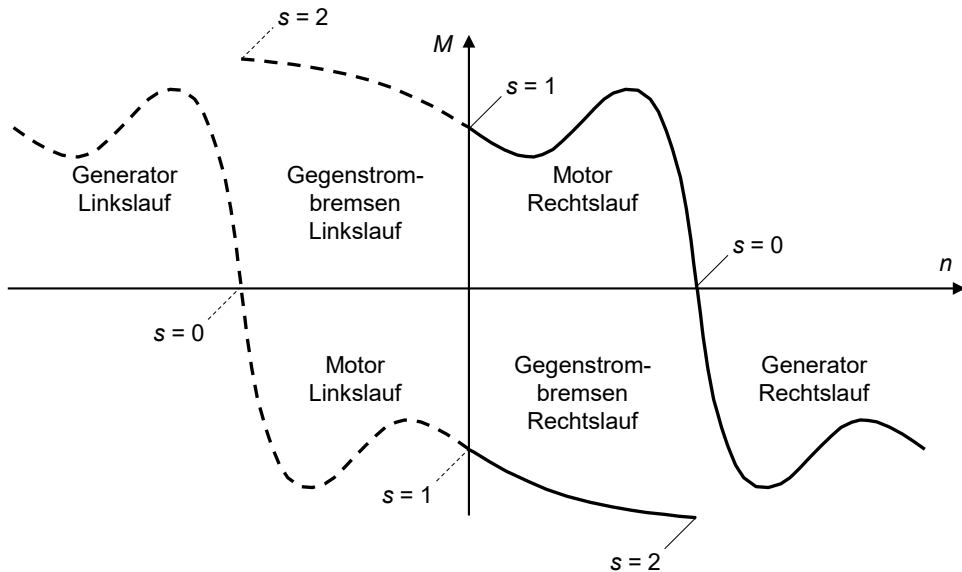


Bild 1.7 Betriebsbereiche der Drehstrom-Asynchronmaschine

Drehzahlstellen mit variabler Frequenz

Betrachtet man die Gleichung zur Berechnung der synchronen Drehzahl, kann man erkennen, dass durch Veränderung der Frequenz die Drehzahl zu verstellen ist.

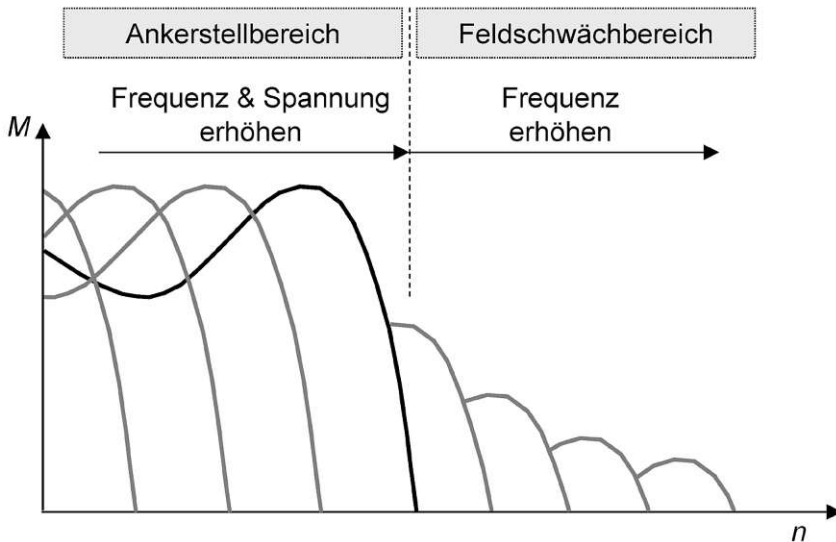


Bild 1.8 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie Drehstrom-Asynchronmotor bei Betrieb mit variabler Frequenz (und Spannung)

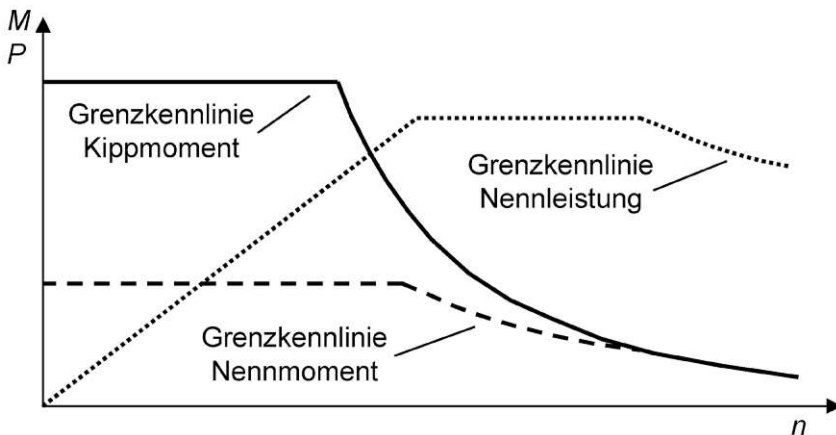


Bild 1.9 Grenzkennlinien Drehstrom-Asynchronmotor bei Betrieb mit variabler Frequenz (und Spannung)

Hinweis

Für elektronische Stellgeräte zum Steuern oder Regeln von Motoren mit variabler Spannung und Frequenz werden umgangssprachlich die Begriffe Frequenzumrichter (oder v. a. einfach nur Umrichter), Servoumrichter (oder v. a. Servoregler) oder Wechselrichter benutzt. Die Unterschiede liegen im topologischen Aufbau und in den Regelungseigenschaften der Geräte.

Dafür werden von Drehzahl Null bis zur Bemessungsdrehzahl die Spannung und die Frequenz gleichermaßen stufenlos angehoben. In diesem Bereich, auch Ankerstellbereich genannt, ist das

volle Bemessungs- und Kippmoment verfügbar. Der Schlupf steigt mit fallender Drehzahl bzw. Frequenz. Damit ist s proportional $1/f$ und die Schlupfdrehzahl bleibt in diesem Bereich in etwa konstant.

Eine Drehzahlerhöhung über die Bemessungsdrehzahl hinaus ist dann nur noch durch Frequenzerhöhung möglich, da die Spannung nicht weiter erhöht werden kann. In diesem Bereich, auch Feldschwächbereich genannt, sinkt das Kippmoment proportional $1/n^2$ und das Bemessungsmoment proportional $1/n$. Der Schlupf ist ab hier konstant, so dass die Schlupfdrehzahl größer wird, was sich in stärker abfallenden Kennlinien bemerkbar macht. Bild 1.8 zeigt die Kennlinien für die Frequenzstellung.

Verbindet man die Punkte des Kippmomentes und des Bemessungsmomentes aus Bild 1.8 über dem Drehzahlverlauf, ergeben sich die entsprechenden Grenzkennlinien wie in Bild 1.9 dargestellt.

Diese Darstellung erleichtert die Angabe des möglichen Stellbereiches eines Asynchronmotors für den Betrieb am Frequenzumrichter. Man kann erkennen, dass im Bereich höherer Drehzahlen die Grenzkennlinie des Kippmomentes ($\sim 1/n^2$) die des Nennmomentes ($\sim 1/n$) erreicht und zusätzlich begrenzt. Ab diesem Punkt wird auch vom erweiterten Feldschwächbereich gesprochen. Die Leistung sinkt dann proportional $1/n$.

Hinweis

Siehe Berechnungsbeispiel in Kapitel 15.5.

Wird der Motor über ein an der Motorwelle angebautes Lüfterrad gekühlt, muss das Dauerdrehmoment im unteren Drehzahlbereich reduziert werden, da die Verlustwärme aufgrund der reduzierten Drehzahl des Lüfters nicht mehr voll abgeführt werden kann. Sind die Kühlverhältnisse im gesamten Drehzahlbereich gleich, wie dies mit Flüssigkeitskühlung oder mit einem Zusatzlüfter erreicht wird, ist keine Reduzierung notwendig. Das Dauerdrehmoment könnte im unteren Bereich sogar leicht angehoben werden, da die frequenzabhängigen Verluste dort kleiner werden. Da dieser Anteil gegenüber den Stromwärmeverlusten jedoch klein ist, wird die Anhebung meist nicht dargestellt.

Die Höhe des verfügbaren Drehmomentes im unteren Drehzahl- bzw. Frequenzbereich hängt auch vom Regelungsverfahren des Umrichters ab. Beim einfachsten Verfahren, der Drehzahlsteuerung durch Spannungs-/Frequenzregelung, kann der Motor dort nicht sein maximales Drehmoment entwickeln.

ACHTUNG

Bei schwerkraftbelasteten Achsen wie zum Beispiel Kranhubwerke, Winden, Hubantriebe in Portalen, kann mit einfacher Spannungs-/Frequenzregelung nicht sichergestellt werden, dass der Motor dann in allen Situationen die Last hebt bzw. bei Drehzahl Null hält.



Das hochwertigste Regelungsverfahren ist die feldorientierte Regelung mit Drehzahlerfassung an der Motorwelle und Rückführung des Signals in die Regelektronik des Stellgerätes. Hier kann der Motor auch im Stillstand sein maximales Drehmoment erzeugen.

Drehzahlstellen mit Polumschaltung

Eine weitere Drehzahlstellmöglichkeit, die sich aus der Gleichung zur Berechnung der Synchrondrehzahl ergibt, ist die Veränderung der Polzahl des Motors. Damit ist jedoch nur eine

stufige Drehzahlstellung möglich, weil die Polzahl nur 2 oder ganzzahlige Vielfache davon betragen kann.

Bei einem Drehzahlverhältnis von 1 : 2 wird der Motor mit einer Wicklung in Dahlanderschaltung ausgeführt. Davon abweichende Drehzahlverhältnisse werden mit zwei galvanisch getrennten Wicklungen realisiert. Es ist auch eine Kombination von Dahlanderschaltung und einer zusätzlichen Wicklung zur Realisierung von drei Drehzahlstufen möglich.

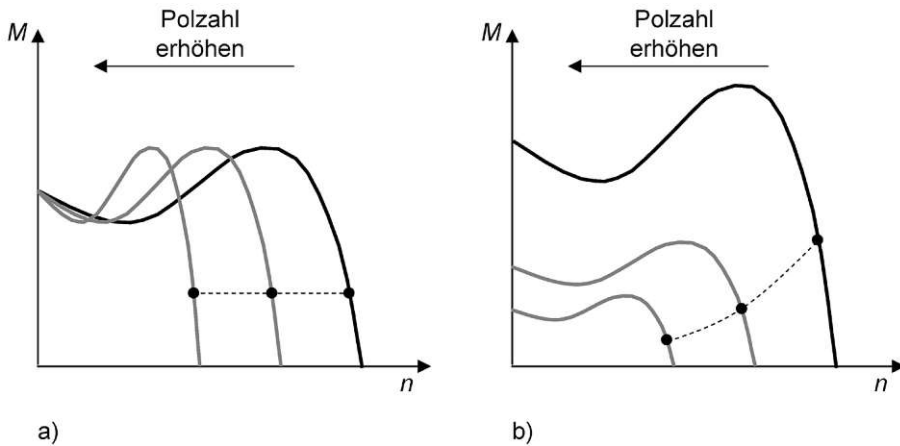


Bild 1.10 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie Drehstrom-Asynchronmotor bei Polumschaltung

a) gleiches Nennmoment in jeder Drehzahlstufe

b) quadratisch steigendes Nennmoment in den Drehzahlstufen

Für Antriebsaufgaben mit konstantem Gegenmoment (Fahr- und Hubantriebe) stehen Motoren mit konstantem Nennmoment bei jeder Drehzahlstufe zur Verfügung (Bild 1.10a). Für die Arbeitsmaschinen, die einen mit der Drehzahl quadratisch steigenden Drehmomentbedarf haben, gibt es Motorausführungen, deren Nennmoment diesem Verlauf angepasst ist (Bild 1.10b).

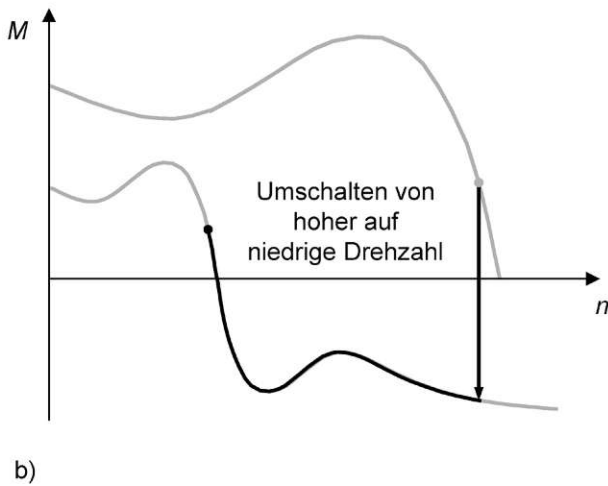
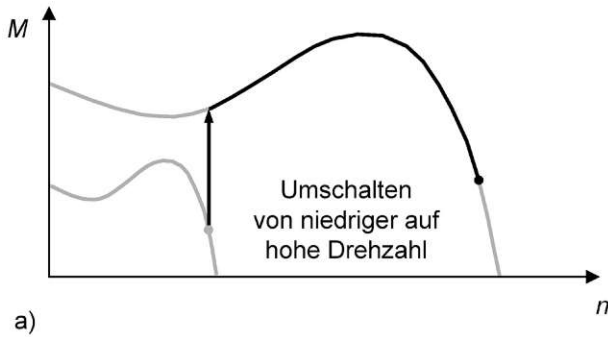
Beim Umschalten zwischen den Drehzahlen kommt es zu Drehmomentstößen. Das Umschalten von der niedrigen auf die hohe Drehzahl ist meist weniger kritisch, da der Motor dann mit der hohen Drehzahl nicht mehr sein hohes Anlaufmoment entwickeln kann (Bild 1.11a). Bei der Umschaltung von der hohen auf die niedrige Drehzahl kann es jedoch zu hohen generatorischen Bremsmomenten kommen (Bild 1.11b).

Um die hohen generatorischen Bremsmomente zu mindern, wird auch von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, die niedrige Drehzahl nur zweiphasig zuzuschalten. Dadurch entstehen geringere Momente. Danach erst wird die dritte Phase wieder zugeschaltet.



ACHTUNG

Bei Anlagen, in denen eine Gewichtslast wirkt, kann dies aus Sicherheitsgründen jedoch nicht gemacht werden. Durch die verminderten Drehmomente könnte die Last unter Umständen nicht gehalten werden.

**Bild 1.11**

Drehmomentverläufe beim Umschalten zwischen den Drehzahlen

a) niedrige auf hohe Drehzahl (= hohe auf niedrige Polzahl)

b) hohe auf niedrige Drehzahl (= niedrige auf hohe Polzahl)

Drehzahlstellen mit variabler Spannung

Bei der Asynchronmaschine besteht eine quadratische Abhängigkeit des Drehmoments von der Spannung, wenn die Frequenz konstant bleibt:

$$M \sim \left(\frac{U}{U_{\text{Nenn}}} \right)^2$$

Dieser Zusammenhang bietet eine eingeschränkte Möglichkeit zur Drehzahlstellung.

Wie in der Kennlinie in Bild 1.12a zu erkennen ist, wirkt sich eine Spannungsänderung nicht bzw. sehr geringfügig auf die Leerlaufdrehzahl aus. Je höher die Belastung ist, umso größer ist jedoch der Drehzahlunterschied zwischen zwei Kennlinien unterschiedlicher Spannung.

Bei Maschinen mit großem Kippschlupf tritt dieser Effekt stärker in Erscheinung. Da eine Drehzahlstellung nicht von Drehzahl Null an möglich ist, findet dieses Verfahren nur begrenzt Anwendung und eignet sich insbesondere für Strömungsmaschinen, die eine quadratische Abhängigkeit des Drehmomentes von der Drehzahl haben (Bild 1.12b).

Die Spannungsstellung kann auch für einen Sanftanlauf benutzt werden, um das Drehmoment langsam zu steigern. Damit wird die Mechanik von zu großen Drehmomentstößen entlastet und der Anlaufstrom reduziert. (Siehe dazu auch Kapitel 12.2.2.)

Darüber hinaus ermöglicht die Einstellung einer variablen Spannung die Absenkung der Leerlaufverluste des Motors. Wird er über einen längeren Zeitraum nicht belastet, muss aber eingeschaltet bleiben, kann während der Leerlaufzeit die Spannung abgesenkt werden. Durch den geringeren Leerlaufstrom werden die Stromwärmeverluste ($\sim I^2$) reduziert, insbesondere aber durch die Spannungsabsenkung die Eisenverluste ($\sim U^2$).

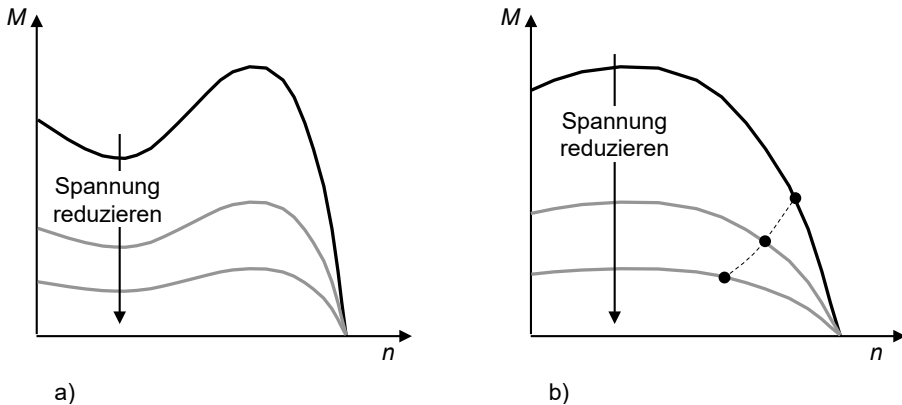


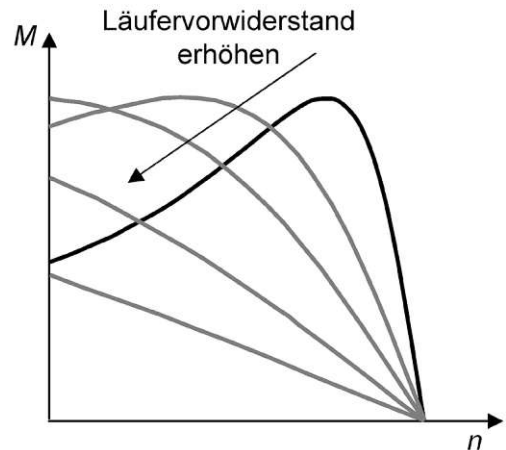
Bild 1.12 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie Drehstrom-Asynchronmotor bei Betrieb mit variabler Spannung

a) «normale» Kennlinie bei Spannungsabsenkung

b) Kennlinie eines Motors mit großem Kippschlupf und eingezeichnete Kennlinie einer Pumpe

Bild 1.13

Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie Drehstrom-Asynchronmotor mit Schleifringläufer bei Betrieb mit veränderbaren Läuferwiderständen



Drehzahlstellen mit Läuferwiderständen

Hinweis

Siehe Berechnungsbeispiel in Kapitel 15.9.

Eine weitere Möglichkeit der Drehzahlstellung ist bei der Ausführung des Asynchronmotors als Schleifringläufer gegeben. Hier hat der Läufer keinen geschlossenen Kurzschlusskäfig, sondern eine Wicklung, deren Ende über drei Schleifringe nach außen geführt ist. Vergrößert man bei einem Schleifringläufer den Strangwiderstand des Läuferkreises durch zusätzliche äußere Läuferwiderstände, ergeben sich neue Werte für den Kippschlupf.

Bild 1.13 zeigt, wie sich die Kennlinie durch Vergrößerung des Widerstandswertes neigt. Damit besteht die Möglichkeit, nicht nur die Drehzahl für einen bestimmten Lastfall einzustellen, sondern auch auf den Anlauf des Motors gezielt Einfluss zu nehmen. In Kapitel 12.2.3 wird noch auf die Berechnung der Zusatzwiderstände für Anlauf und Drehzahlstellen eingegangen.

Hinweis:

Für Zusatzwiderstände, die nur zum Anlauf benötigt werden, ist u.a. der Begriff Anlasswiderstand gängig. Werden sie vorrangig zur Drehzahlstellung benutzt, wird u.a. der Begriff Schlupfwiderstand verwendet.

Eine besondere Ausführungsform des Asynchronmotors sei an dieser Stelle noch erwähnt: der Stillstandsmotor, für den auch der Begriff Drehfeldmagnet verwendet wird. Seine Besonderheit ist, dass er bei Nennspannung und Nennfrequenz im Stillstand betrieben werden kann, somit kurzschlussfest ist und dort sein größtes Drehmoment entwickelt. Es gibt diese Ausführung als Kurzschluss- und als Schleifringläufermotor.

Hinweis:

Stillstandsmotoren kann man sich wie eine mechanische Drehfeder mit konstantem Drehmoment und unendlichem Drehwinkel vorstellen.

Stillstandsmotoren mit der Drehmomentcharakteristik einer Dreieckskennlinie (Bild 1.14) eignen sich aufgrund ihres mit der Drehzahl abfallenden Drehmomentes z.B. als Wickelantriebe, eingesetzt unter anderem als Aufwickelantrieb an der Kabeltrommel des Schleppkabels an Schienenkranen. Der Motor wird immer mit Drehsinn in Aufwickelrichtung betrieben. Beim Abwickeln wird ihm durch die Fahrbewegung des Krans eine Drehzahl entgegen seines Drehsinns (Gegenstrombremsbetrieb) aufgezwungen.

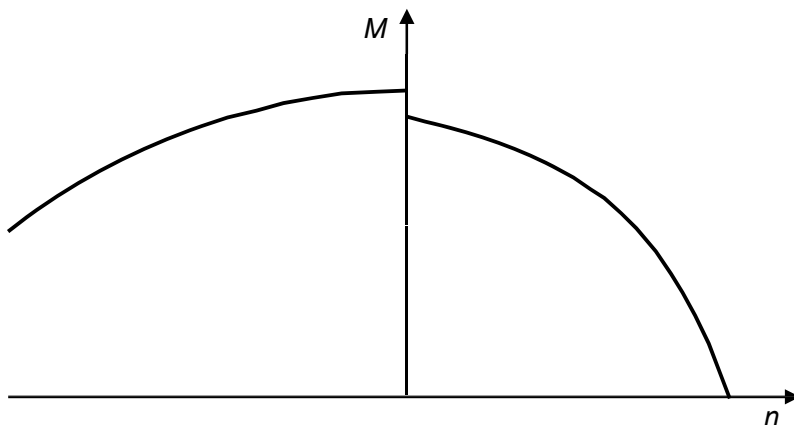


Bild 1.14 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie eines Stillstandsmotors mit Charakteristik Dreieckskennlinie (Bereich der Gegenstrombremsung mit dargestellt)

Die Drehmomentcharakteristik von Motoren mit Rechteckkennlinie (Bild 1.15) wird beispielsweise in Anwendungen genutzt, wo eine Mechanik nach einem kurzen Fahrweg gegen einen festen Anschlag gehalten werden soll.

Bei der Ausführung mit Schleifringläufer sind immer Widerstände im Läuferkreis zugeschaltet. Die Drehmomentkennlinie fällt vom Stillstand bis in den Bereich der Synchrondrehzahl nahezu linear ab (siehe Bild 1.13). Durch Kombination mit verschiedenen Läuferzusatzwiderständen kann das Stillstandsrehmoment in Stufen eingestellt und somit an verschiedene Erfordernisse angepasst werden.

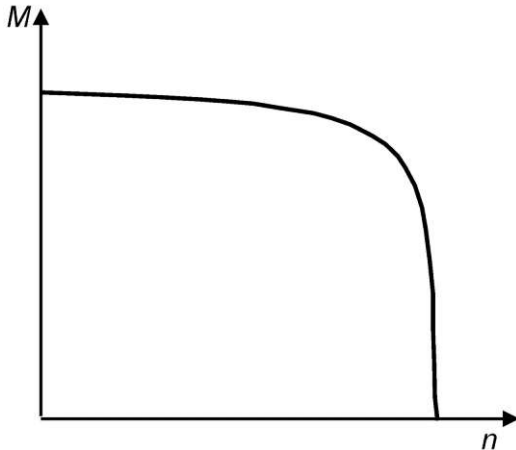


Bild 1.15

Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie eines Stillstandsmotors mit Charakteristik Rechteckkennlinie

1.3.3 Drehstrom-Synchronmotor

Hinweis

Berechnungstool auf [InfoClick!](#)

Die Synchronmaschine deckt den größten Leistungsbereich von wenigen Watt bis in den Gigawattbereich ab. Das wesentliche Merkmal des Synchronmotors ist seine belastungsunabhängige Drehzahl, die immer synchron mit der Drehfelddrehzahl ist und dem Motor seinen Namen gab.

Das Magnetfeld des Läufers wird entweder mit einer Erregerwicklung erzeugt oder ist in Form von Permanentmagneten bereits in die Maschine eingebaut.

Die aufgenommene Leistung ergibt sich zu:

$$P_{\text{elektr}} = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi + U_{\text{err}} \cdot I_{\text{err}}$$

Bei einem Permanentmagnet-erregten Synchronmotor entfällt der Anteil $U_{\text{err}} \cdot I_{\text{err}}$.

Je nachdem, ob der Motor über- bzw. untererregt ist, kann er folgende Zustände bezüglich des Blindleistungsbedarfs bzw. -verbrauchs annehmen:

- Untererregt
Der Erregerstrom ist kleiner als der Nennerergerstrom. Die Maschine nimmt induktive Blindleistung auf und gibt kapazitive Blindleistung ab.
- Nennererregt
Der Erregerstrom ist gleich dem Nennerergerstrom. Die Maschine nimmt weder Blindleistung auf noch gibt sie Blindleistung ab.
- Übererregt
Der Erregerstrom ist größer als der Nennerergerstrom. Die Maschine nimmt kapazitive Blindleistung auf und gibt induktive Blindleistung ab.

Bei einem Permanentmagnet-erregten Synchronmotor bestimmt die Auslegung der Magnete, mit welchem Leistungsfaktor der Motor im Betrieb läuft. In der Regel wird er so ausgelegt, dass der Motor, abgesehen von einem geringen Blindstromanteil der Statorspulen (Induktivitäten), nur Wirkleistung beziehen muss. Dies bedeutet weniger Stromaufnahme als beim Asynchronmotor, da der Anteil zur Erzeugung des Magnetfeldes entfällt.

Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades ergibt sich die mechanisch verfügbare Leistung des Synchronmotors zu:

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{elektr}} \cdot \eta$$

beziehungsweise aus Drehmoment und Drehzahl:

$$P_{\text{mech}} = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

Die Verlustleistung ist somit:

$$P_{\text{V}} = P_{\text{elektr}} \cdot (1 - \eta)$$

Die mechanische Drehzahl des Motors ist gleich der synchronen Drehfelddrehzahl und allein von der Frequenz der Spannung sowie der Polpaarzahl des Motors abhängig:

$$n [\text{min}^{-1}] = n_{\text{syn}} = \frac{f \cdot 60}{p}$$

Das Drehmoment ergibt sich aus der allgemeinen Beziehung:

$$M = \frac{P_{\text{mech}}}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

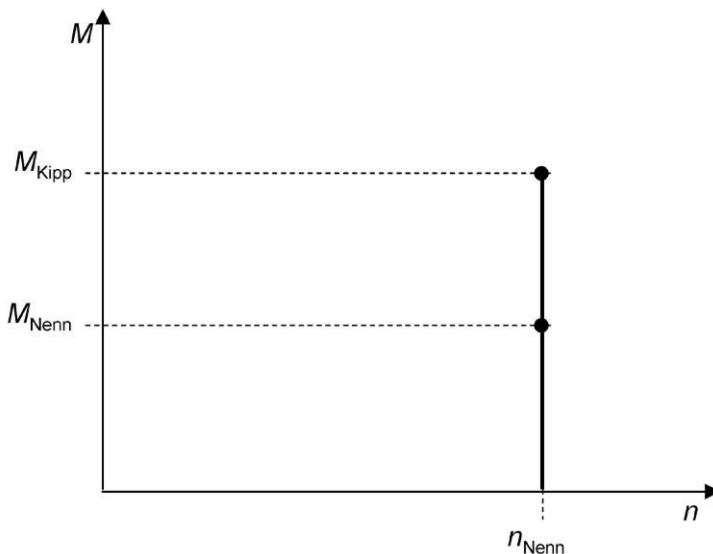


Bild 1.16 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie Drehstrom-Synchronmotor

Für Betrieb mit konstanter Spannung und Frequenz ist die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie in Bild 1.16 dargestellt.

Im Bereich vom Leerlauf bis zum Kippmoment ist die Drehzahl konstant. Wird der Motor über das Kippmoment hinaus belastet, fällt er außer Tritt und bleibt stehen.

Bei der Synchronmaschine besteht eine lineare Abhängigkeit des Drehmoments von der Spannung, wenn die Frequenz konstant bleibt:

$$M \sim U$$

Gegenüber dem Asynchronmotor ist der Synchronmotor somit weniger empfindlich gegen Spannungsschwankungen.

Drehzahlstellen mit variabler Frequenz

Die einzige Möglichkeit, einen Synchronmotor drehzahlvariabel zu betreiben, ist die Frequenzstellung. Bild 1.17 zeigt dafür die Kennlinien. Der Feldschwächbetrieb ist mit dem Synchronmotor ebenfalls möglich. Im Gegensatz zu einem Asynchronmotor, bei dem sich der Feldschwächbereich praktisch «automatisch» ergibt, wenn die Ausgangsspannung nicht weiter erhöht werden kann, sondern nur noch die Frequenz, muss er beim Synchronmotor aktiv eingeleitet werden.

Auch hier kann die Ausgangsspannung des Umrichters nicht weiter erhöht werden, sondern nur noch die Frequenz. Zusätzlich muss aber der Strom in der Erregerwicklung zurückgenommen werden. Bei einem Permanentmagnet-erregten Synchronmotor wird dazu ein Strom zur Schwächung des Magnetfeldes aktiv in die Maschine eingeprägt.



ACHTUNG

Wird der Synchronmotor im Feldschwächbereich betrieben und das Stellgerät fällt aus, kann er aufgrund seiner hohen Drehzahl und des nun nicht mehr geschwächten Magnetfeldes hohe Spannungen erzeugen. Diese müssen durch spannungsbegrenzende Maßnahmen abgebaut werden, damit das Stellgerät nicht geschädigt wird.

Die Grenzkennlinien für das Maximal- und das Dauerdrehmoment des frequenzgeregelten Synchronmotors ergeben sich aus Bild 1.17 wieder durch Verbindung der einzelnen Punkte des Kipp- und des Dauerdrehmomentes und sind in Bild 1.18 dargestellt.

Aus den Grenzkennlinien ist zu erkennen, dass beim Synchronmotor sowohl das Kipp- als auch das Nennmoment im Feldschwächbereich proportional $1/n$ ist.

In den Datenblättern der Motoren, insbesondere bei Synchron-Servomotoren, weichen die Grenzkennlinien vom idealen Verlauf in Bild 1.18 ab.

Da diese Motoren schon in ihrem Grunddrehzahlbereich, also bereits ohne Ausnutzung des Feldschwächbetriebes, für einen sehr hohen Stellbereich mit entsprechend hohen Frequenzen ausgelegt sind, begrenzen die frequenzabhängigen Verluste die Dauerdrehmomentkennlinie bei den höheren Drehzahlen immer stärker, was an der abfallenden Kurve in Bild 1.19 erkennbar ist. Da die Synchron-Servomotoren auch sehr oft im kleinsten Drehzahlbereich mit gleichbleibenden Kühlverhältnissen betrieben werden, sind auch da die frequenzabhängigen Verluste zugunsten des Dauerdrehmomentes berücksichtigt, was in der Regel bei den Asynchronmaschinen nicht der Fall ist (siehe Kapitel 1.3.2).

Unterschiedliche An- bzw. Einbausituationen bieten dem Motor mehr oder weniger Möglichkeiten, seine Verlustwärme abzuführen. Demzufolge kann er, zum Beispiel bei guter Wärmeabfuhrmöglichkeit, auch mit höheren Dauerdrehmomenten betrieben werden.

Eine weitere Limitierung der Kennlinien kann aufgrund der maximal möglichen Ausgangsspannung des Stellgerätes erfolgen. Mit zunehmender Drehzahl wird die in der Motorwicklung induzierte Gegenspannung immer größer. Um den für das Drehmoment erforderlichen Strom in den Motor einzuprägen, steht die Differenz zwischen Umrichter-Ausgangsspannung zur induzierten Gegenspannung zur Verfügung. Je geringer die maximal mögliche Ausgangsspannung ist, umso geringer ist dadurch der Drehzahl- bzw. Drehmomentbereich.

Wie die Kennlinie letztendlich genau aussieht, hängt auch wesentlich von den mechanischen und elektromagnetischen Eigenschaften des Motors und den elektrischen Eigenschaften des Stellgerätes ab.

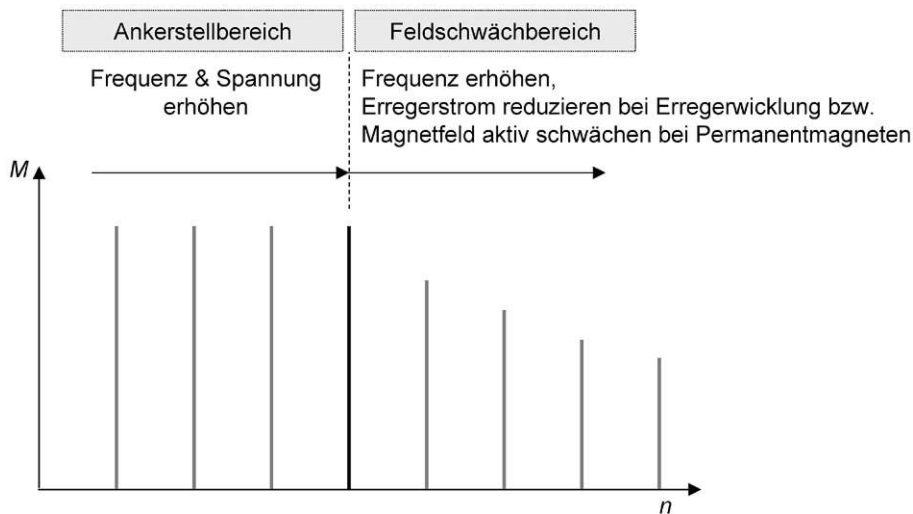


Bild 1.17 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie Drehstrom-Synchronmotor bei Betrieb mit variabler Frequenz

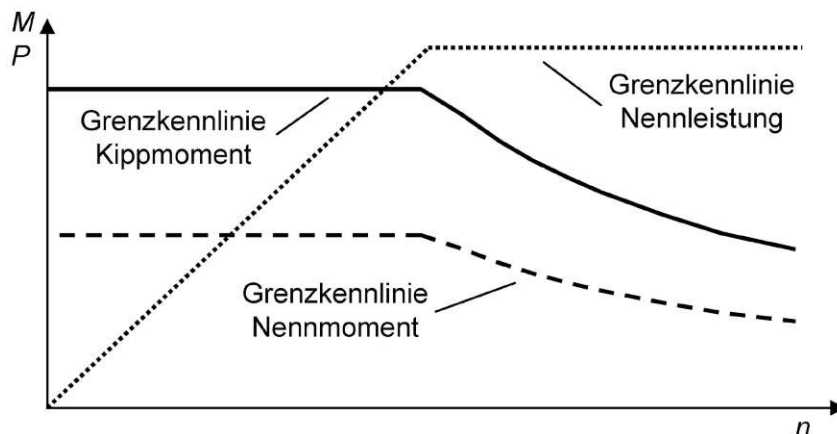


Bild 1.18 Grenzkennlinien Drehstrom-Synchronmotor bei Betrieb mit variabler Frequenz

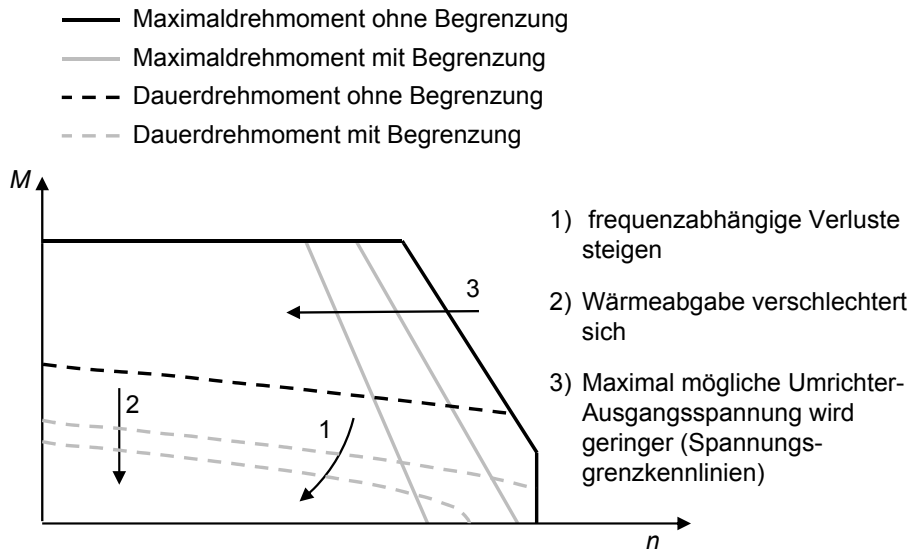


Bild 1.19 Grenzkennlinien Drehstrom-Synchronservomotor bei Betrieb mit variabler Frequenz und Limitierung der Drehmomente und Drehzahlen (ohne Feldschwächbereich)

Bei einem Linearmotor fällt die Dauerkraft-Kennlinie mit steigender Geschwindigkeit in der Regel nicht so stark ab wie bei einem rotativen Motor, da er wesentlich geringere frequenzabhängige (und somit geschwindigkeitsabhängige) Verluste hat. Verglichen mit der Umfangsgeschwindigkeit am Rotor eines rotativen Motors hat der Linearmotor geringere Geschwindigkeiten.

1.3.4 Schrittmotor

Der Schrittmotor ist eine Sonderbauform des Synchronmotors.

Bezüglich seiner Drehbewegung unterscheidet sich diese Sonderbauform im Wesentlichen dadurch, dass sich das vom Stator erzeugte magnetische Feld in der Maschine nicht kontinuierlich weiterbewegt, sondern inkrementell fortschreitet.

Durch Umpolung der angelegten Gleichspannung an den Wicklungssträngen des Stators ändert sich die magnetische Polung der als Zähne ausgeprägten Ständerpole quasi sprunghaft. Der Rotor, ebenfalls mit ausgeprägten Zähnen am Umfang, wird dadurch in seine nächste magnetische Vorzugsrichtung gezogen. Diese Bewegung wird als Schritt bezeichnet, was diesem Motorprinzip seinen Namen gibt.

Der Winkel, um den sich der Rotor pro Spannungs- bzw. Stromimpuls weiterdreht, ist der Schrittwinkel α_s . Er berechnet sich aus den konstruktiven Motordaten mit der Anzahl der Wicklungsstränge m und der Polpaarzahl p_R des Rotors zu:

$$\alpha_s = \frac{360^\circ}{2 \cdot p_R \cdot m}$$

Wenn die Anzahl der Schritte pro Umdrehung, die Schrittzahl z , gegeben ist, kann man den Schrittwinkel auch aus:

$$\alpha_s = \frac{360^\circ}{z}$$

berechnen.

Aus dem Wirkprinzip ist zu erkennen, dass zum Betrieb des Schrittmotors immer ein Stellgerät (Schrittmotortreiber) benötigt wird. Es erzeugt entsprechend dem Bestromungsmuster die Spannungs- bzw. Stromimpulsfolge für die einzelnen Stränge der Statorwicklung. Die Anzahl dieser Impulse pro Zeit ist die Schrittfrequenz f_s . Aus der Schrittfrequenz und dem Schrittwinkel ergibt sich die Drehzahl n entsprechend:

$$n[\text{min}^{-1}] = \frac{f_s \cdot \alpha_s \cdot 60}{360^\circ}$$

Bei richtiger Auslegung auf seine Antriebsaufgabe folgt der Rotor durch seine magnetische Zwangsstellung jedem vorgegebenen Impuls synchron mit seinem Schrittwinkel und es entstehen keine Schrittlverluste. Damit lassen sich die Drehzahl und die Position des Antriebs direkt aus der vorgegebenen Schrittfrequenz und den motorspezifischen Daten ableiten.

Hier wird der große Vorteil des Schrittmotors deutlich: Für die Positions- und Geschwindigkeitsermittlung ist keine Positionserfassung am Motor und keine entsprechende Auswertung im Stellgerät notwendig. Diese Tatsache und seine relativ einfache Ansteuerung machen ihn sowohl für viele Positionieraufgaben als auch zur Realisierung von synchronisierten Bewegungen zu einer günstigen Alternative gegenüber drehzahlvariablen Antrieben mit Asynchron- oder Synchronmotoren, welche aufwendiger zu steuern und zu regeln sind.

Hinweis:

Können mechanische Störgrößen nicht ausgeschlossen werden, so muss, um Schrittlverluste auszuschließen bzw. das Nicht-Erreichen einer Position überhaupt gemeldet zu bekommen, der Motor mit einem Geber und entsprechender Rückführung zum Schrittmotortreiber ausgestattet werden. Bei Betrieb ohne Geber wird empfohlen, eine Drehmomentreserve von ca. 20...30 % einzuplanen.

Die prinzipielle Kennlinie eines Schrittmotors ist in Bild 1.20 dargestellt und soll nachfolgend erläutert werden.

Betriebsgrenzmoment M_B

Der gesamte mögliche Drehmoment-Schrittfrequenzbereich wird durch den Verlauf des Betriebsgrenzmoments M_B beschrieben. Im (bestromten) Stillstand kann der Motor gegen ein von außen einwirkendes Moment mit dem Haltemoment M_H entgegenwirken.

Mit ansteigender Schrittfrequenz sinkt das verfügbare Drehmoment, was im Wesentlichen darauf zurückzuführen ist, dass die Wicklungsinduktivität die Stromanstiegsgeschwindigkeit begrenzt. Der Strom erreicht in den kürzer werdenden Zeitabschnitten pro Schritt immer geringere Werte, weshalb weniger Drehmoment zur Verfügung steht. Schließlich erreicht das Betriebsgrenzmoment bei der maximalen Betriebsfrequenz $f_{B0\max}$ sein Minimum.

Alle unter der Betriebsgrenzmoment-Kennlinie liegenden Drehmoment-Schrittfrequenz-Wertepaare können dauerhaft genutzt werden.

ACHTUNG

Kennlinien für Schrittmotoren werden oftmals auch mit logarithmischer Skalierung der Achse für die Schrittfrequenz bzw. für die Drehzahl dargestellt.

