

# 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 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 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 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:

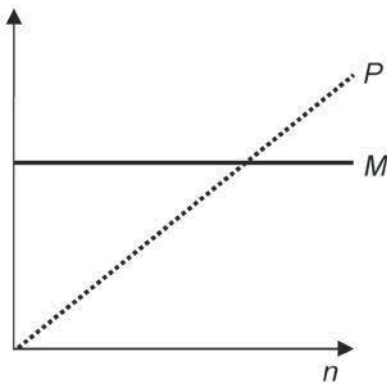
$$M = \text{konstant}$$

$$P \sim n$$

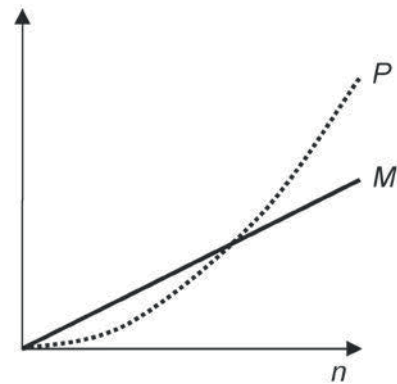
Diesen Verlauf haben Maschinen, die Arbeit gegen die Schwerkraft leisten – wie beispielsweise Fördermaschinen, Aufzüge oder Hebezeuge. Auch Maschinen, die reine Reibungsarbeit zu verrichten haben, folgen diesem Verlauf.

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

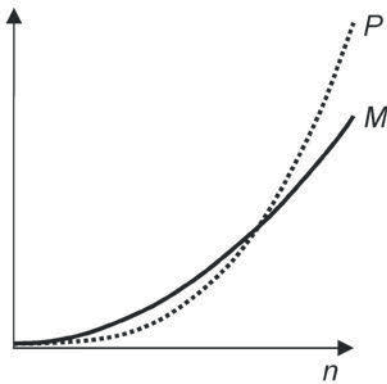
Auch die mittlere Last von Kolbenpumpen folgt dieser Charakteristik.



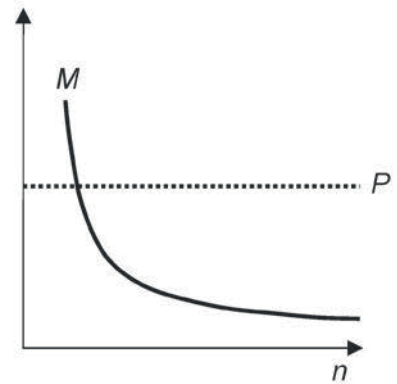
a)



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:

$$M \sim n^2$$

$$P \sim n^3$$

Lüfter, Kreiselpumpen, Verdichter, Zentrifugen 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 Abschnitt 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 Bemessungsbereiches belastet, bleibt die Drehzahl unverändert. Diese «starre» Kennlinie haben permanent als auch elektromagnetisch erregte Synchronmaschinen.

**Nebenschlussverhalten** (Bild 1.2b)

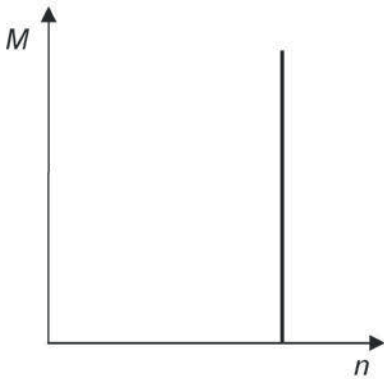
Bei Belastung fällt die Drehzahl gegenüber dem Leerlauf leicht ab. Dieses «harte» Verhalten zeigen Asynchron- und Gleichstrom-Nebenschlussmaschinen.

**Reihenschlussverhalten** (Bild 1.2c)

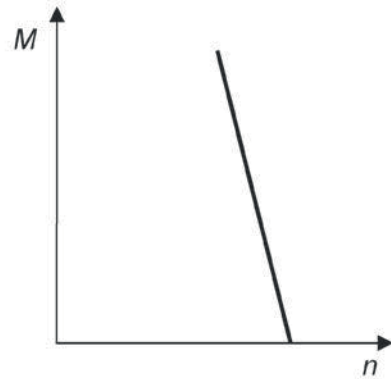
Das «weiche» Reihenschlussverhalten ist typisch für Maschinen, die einen hohen Drehzahlabfall bei steigender Drehmomentabgabe haben. Die Gleich- und die Wechselstrom-Reihenschlussmaschine sind typische Vertreter für dieses Verhalten.

**Doppelschlussverhalten** (Bild 1.2d)

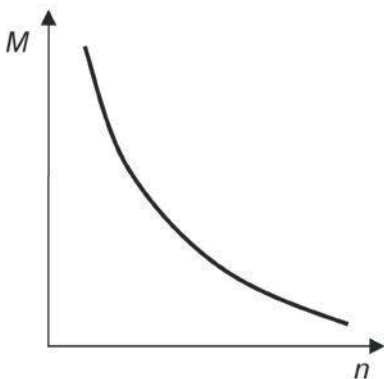
Eine Mischung aus Reihen- und Nebenschlussverhalten stellt das Doppelschlussverhalten dar. Die Gleichstrom-Doppelschlussmaschine, eine Kombination aus der Gleichstrom-Reihen- und der Gleichstrom-Nebenschlussmaschine, weist diese Charakteristik auf.



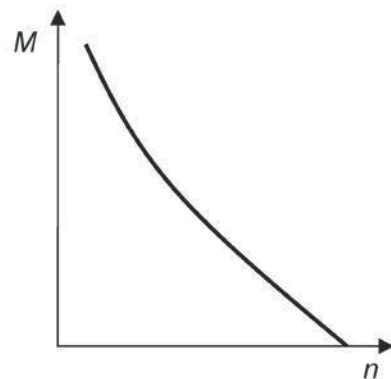
a)



b)



c)



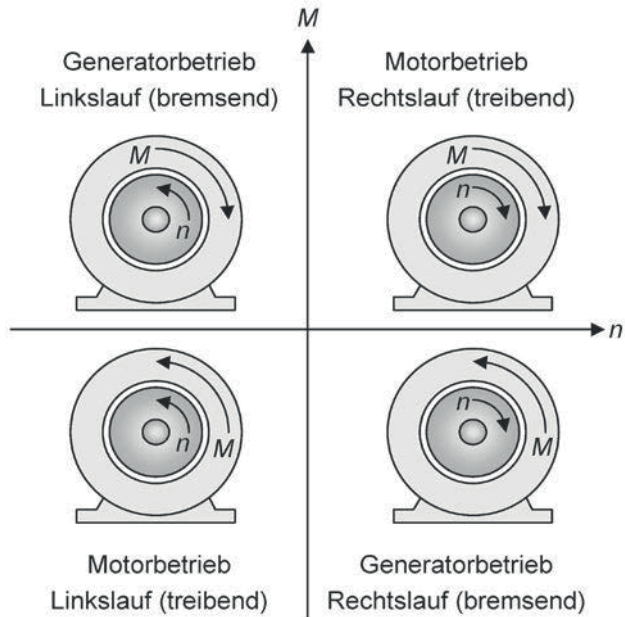
d)

**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  $S$ :

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

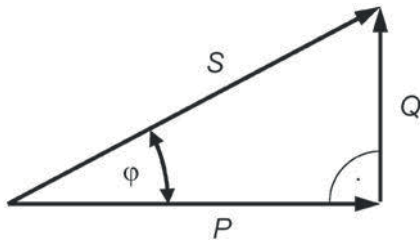
Wie in Bild 1.4 zu erkennen ist, setzt sich die Scheinleistung aus der zum Aufbau des Magnetfeldes notwendigen Blindleistung  $Q$ :

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

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 Verlustleistung:

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

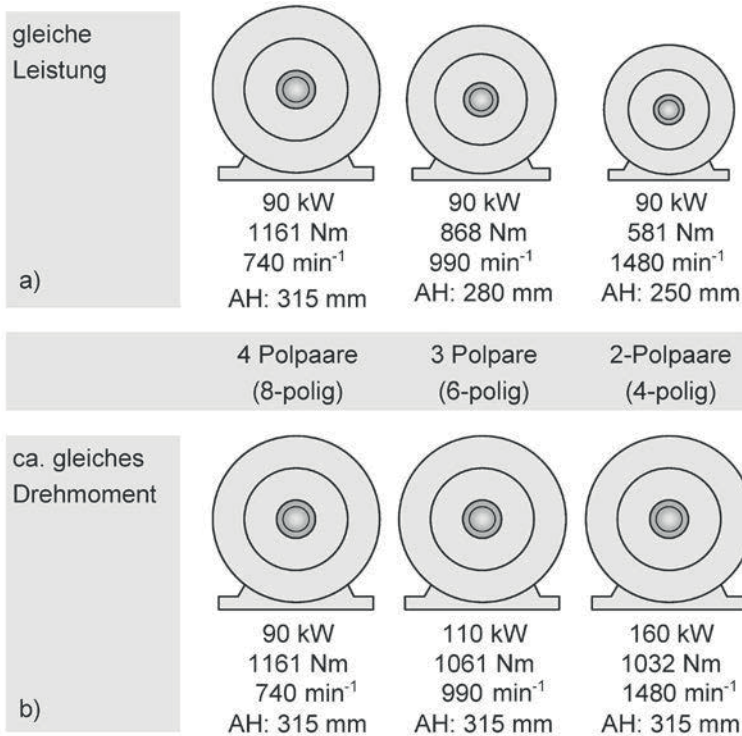
Als Drehfeldfrequenz oder Synchronfrequenz wird die Drehzahl des im Ständer des Motors umlaufenden Magnetfeldes bezeichnet. Sie ist alleine von der Frequenz der Spannung und von der Polpaarzahl des Motors abhängig:

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

Die mechanische Drehzahl des Läufers erreicht prinzipbedingt nicht die Drehfeldfrequenz und bleibt um die Schlupffrequenz, 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.



**Bild 1.5** 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 häufig auch als bezogene Größe zur Erleichterung für weiterführende Berechnungen als Schlupf angegeben:

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

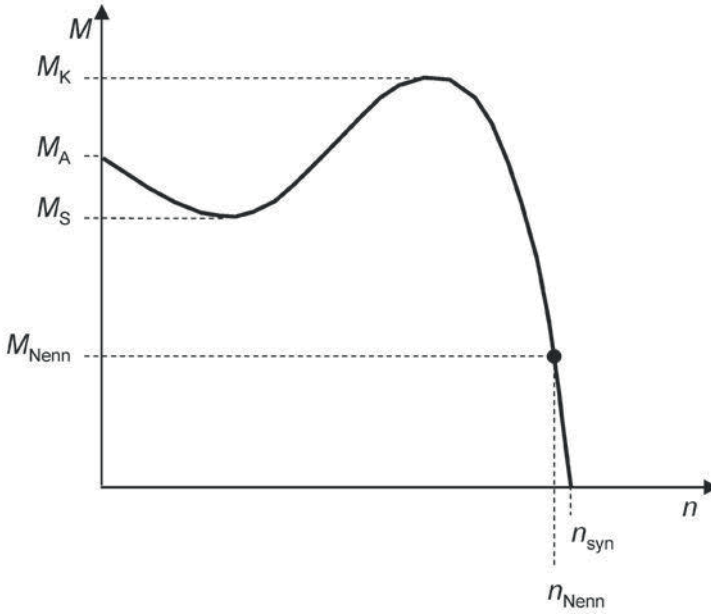
Am häufigsten werden Motoren mit 2 Polpaaren eingesetzt. Motoren mit einem Polpaar gleicher Leistung bauen zwar kleiner (Bild 1.5 a), ihre doppelt so hohe Drehzahl wirkt sich in vielen Fällen jedoch Lebensdauer-mindernd auf nachgeschaltete Übertragungselemente aus und ist geräuschintensiver. Höherpolige Motoren bauen bei gleicher Leistung größer und sind damit auch teurer. Sie haben in der Regel einen schlechteren Wirkungsgrad und Leistungsfaktor.

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

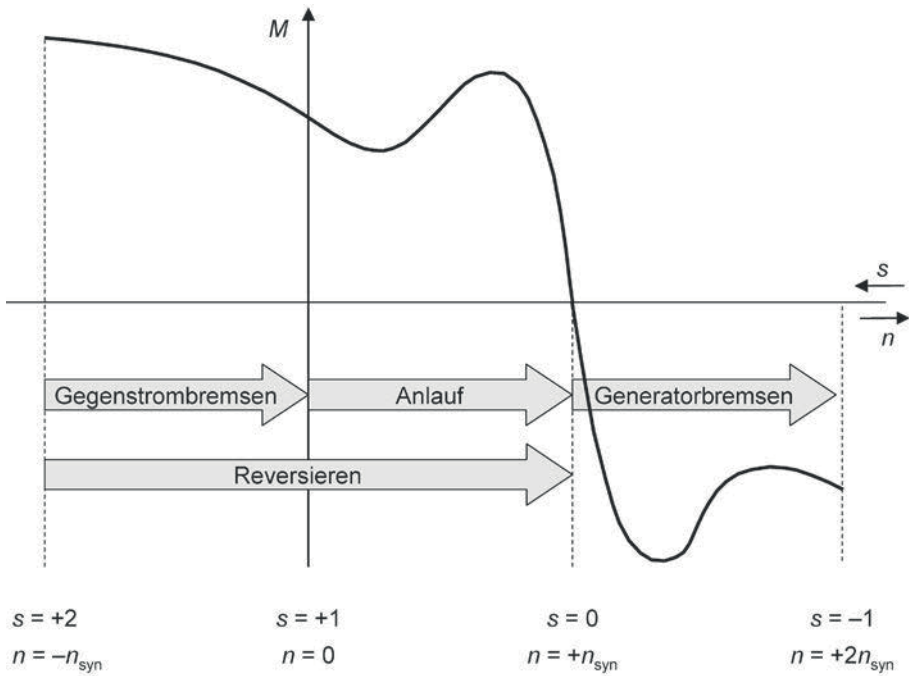
$$M = \frac{P_{\text{mech}}}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

und bestimmt wesentlich die Baugröße des Motors (Bild 1.5a, b).

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 sein Anlaufmoment  $M_A$  und durchläuft dann das Sattelmoment  $M_S$ . Danach folgt das Kippmoment  $M_K$  – das höchste Drehmoment, das die Asynchronmaschine ohne plötzlichen



**Bild 1.6** Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie Drehstrom-Asynchronmotor



**Bild 1.7** Betriebsbereiche der Drehstrom-Asynchronmaschine



Drehzahlabfall abgeben kann. Für den Leerlauf, also ohne äußere Last, läuft der Motor fast bis zur synchronen Drehzahl  $n_{\text{syn}}$  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.

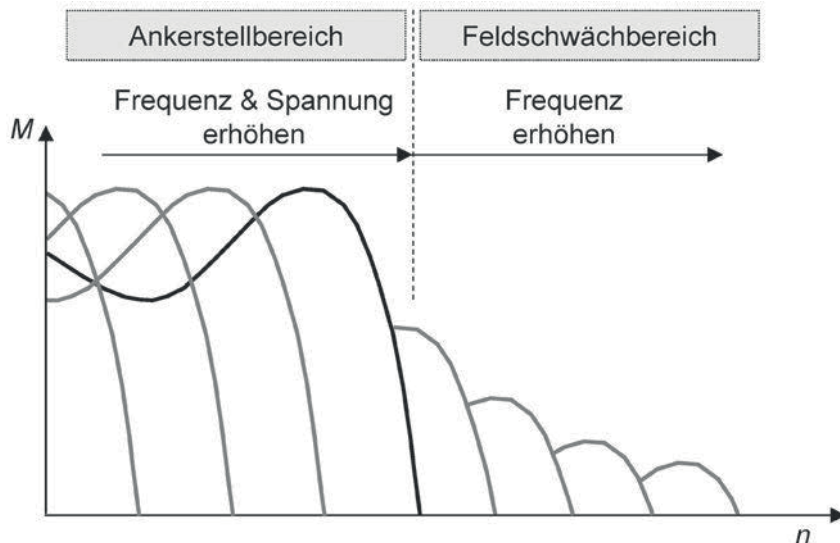
In seinen verschiedenen Ausprägungen, zum Beispiel durch unterschiedliche Ausführungen des Kurzschlusskäfigs im Läufer oder durch die Verwendung verschiedener Magnetbleche im Läufer, kann die Drehmoment-Drehzahlkennlinie des Asynchronmotors von der beispielhaft in Bild 1.6 dargestellten Kennlinie abweichen. Dadurch wird zum Beispiel ein anderes Verhalten im Anlauf oder bei Laständerungen bewirkt.

Die verschiedenen Betriebsbereiche bzw. -zustände der Asynchronmaschine zeigt Bild 1.7. Im Drehzahlbereich von null bis (fast) zur Synchrondrehzahl ist der normale Anlauf als Motor dargestellt. Würde der Motor von seiner Arbeitsmaschine über die Synchrondrehzahl hinaus angetrieben, arbeitet die Asynchronmaschine im Generatorbetrieb. Dies ist zum Beispiel beim Absenken von Lasten mit Seilwinden der Fall.

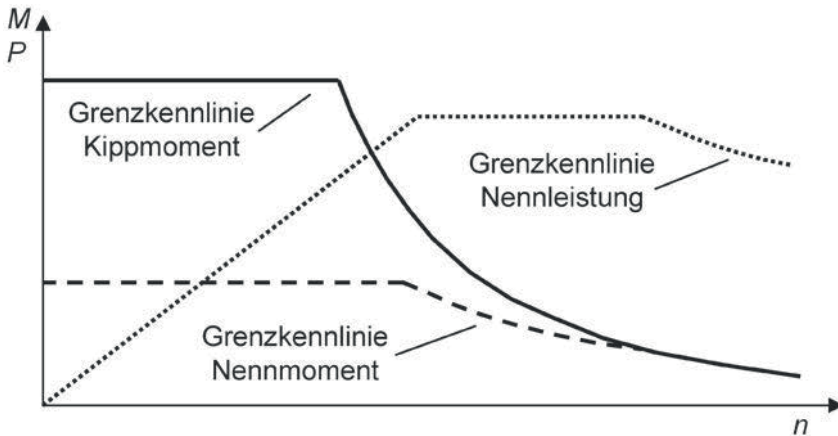
Trennt man den laufenden Asynchronmotor vom Netz, vertauscht zwei Phasen der Zuleitung und schaltet ihn wieder ein, reversiert man den Motor. Der Reversiervorgang besteht aus dem Gegenstrombremsen bis zur Drehzahl Null und einem anschließenden Hochlauf in die entgegengesetzte Richtung.

#### 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 einfach nur Umrichter), Servoumrichter (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 Frequenzumrichterbetrieb. 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 Abschnitt 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 Bereich hängt auch vom Regelverfahren 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.

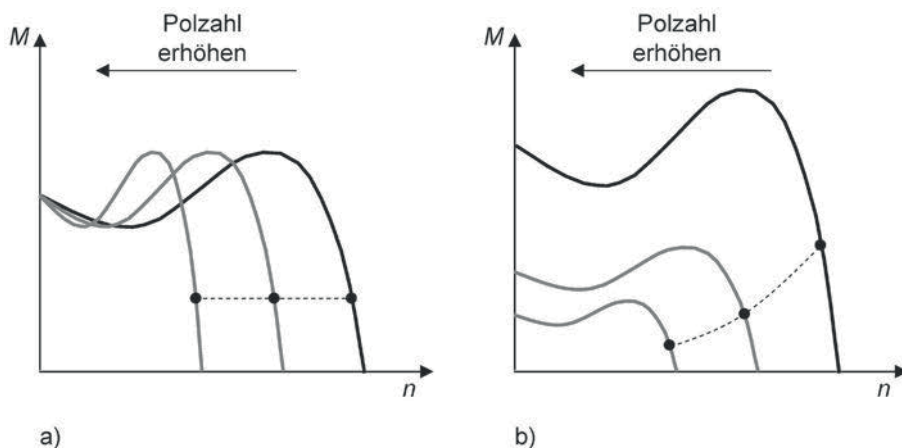


Das hochwertigste Regelungsverfahren ist die feldorientierte Regelung mit Drehzahlerfassung an der Motorwelle und Rückführung des Signals in die Regelelektronik des Stellgerätes. Hier kann der Motor auch im Stillstand sein maximales Drehmoment erzeugen.

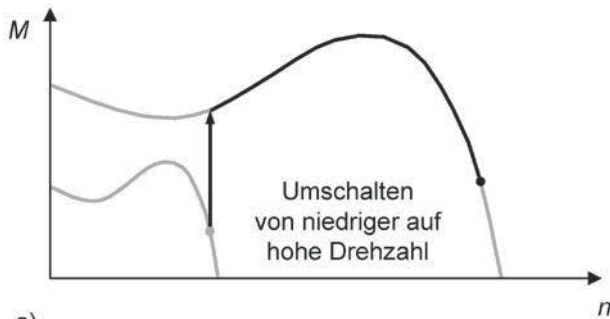
## Drehzahlstellen mit Polumschaltung

Eine weitere Drehzahlstellmöglichkeit, die sich aus der Gleichung zur Berechnung der Synchrodrehzahl 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.

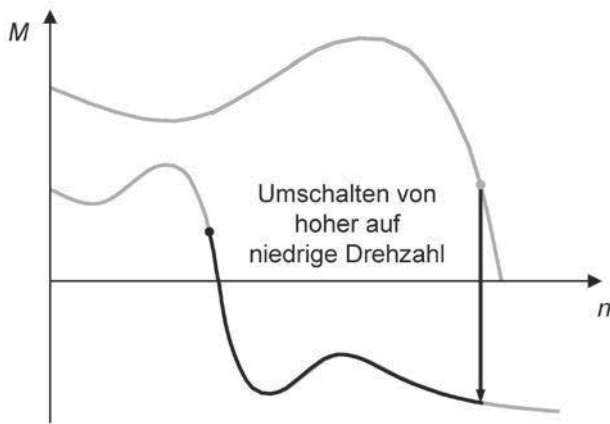
Bei einem Drehzahlverhältnis von 1 : 2 wird der Motor mit einer Wicklung in Dahlanderschaltung ausgeführt. Davon abweichende Drehzahlverhältnisse werden mit zwei galvanisch getrennten Wicklungen realisiert. Es ist auch eine Kombination von Dahlanderschaltung und einer zusätzlichen Wicklung zur Realisierung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



**Bild 1.10** Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie Drehstrom-Asynchronmotor bei Polumschaltung  
a) mit ca. konstantem Nennmoment  
b) mit quadratisch steigendem Nennmoment



a)



b)

**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)

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. 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.

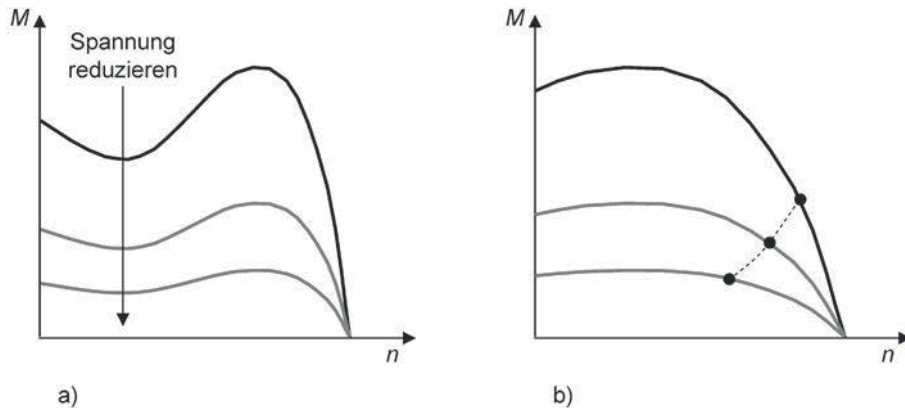
### Drehzahlstellen mit variabler Spannung

Die quadratische Abhängigkeit des Drehmomentes von der Spannung bei der Asynchronmaschine bietet eine eingeschränkte Drehzahlstellmöglichkeit. Wie in der Kennlinie in Bild 1.12a zu erkennen ist, wirkt sich eine Spannungsänderung nicht bzw. sehr geringfügig auf die Leerlauf-

drehzahl aus. Je höher die Belastung ist, umso größer ist 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 und damit die Mechanik von zu großen Drehmomentstößen zu entlasten.



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

a) «normale» Kennlinie bei Spannungsabsenkung

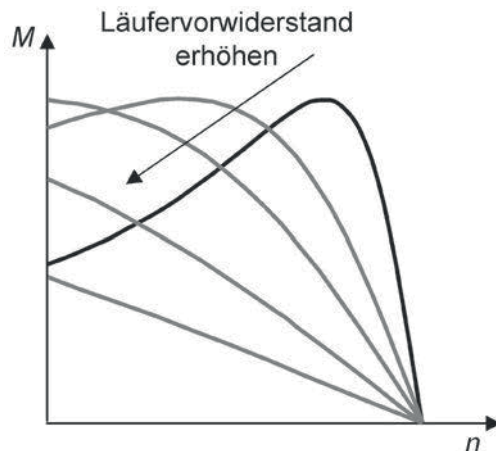
b) Kennlinie eines Motors mit großem Kippschlupf und eingezeichnete Kennlinie einer Pumpe

#### Hinweis

Für elektronische Stellgeräte zum Steuern von Motoren mit variabler Spannung werden umgangssprachlich die Begriffe Sanftanlaufgerät, Spannungssteller, Sanftstarter oder Softstarter benutzt.

#### Bild 1.13

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



## Drehzahlstellen mit Läuferwiderständen

### Hinweis

Siehe Berechnungsbeispiel in Abschnitt 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. Ändert man bei einem Schleifringläufer den Läuferwiderstand durch zusätzliche äußere Läuferwiderstände, ergeben sich neue Werte für den Kipp-schlupf.

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 Motor gezielt Einfluss zu nehmen. In Abschnitt 12.2.3 wird noch auf die Berechnung der Widerstände für Drehzahlstellen und Anlauf eingegangen.

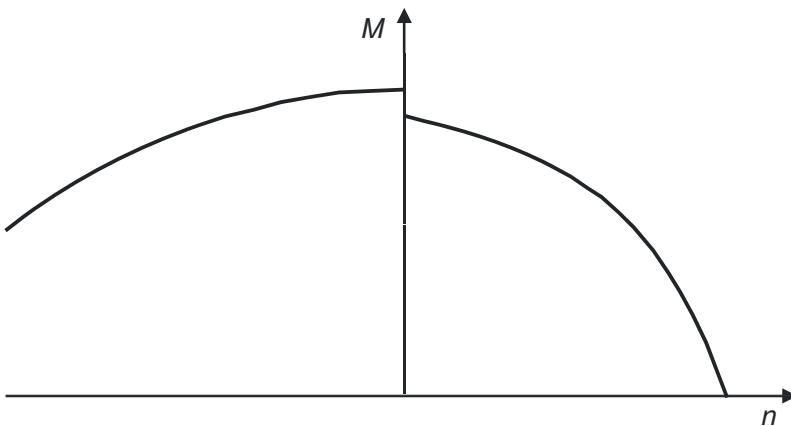
Eine besondere Ausführungsform des Asynchronmotors sei an dieser Stelle noch erwähnt: der Stillstandsmotor, für den auch der Begriff Drehfeldmagnet verwendet wird. Seine Besonderheit ist, dass er bei Nennspannung und Nennfrequenz im Stillstand betrieben werden kann, somit kurzschlussfest ist und dort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



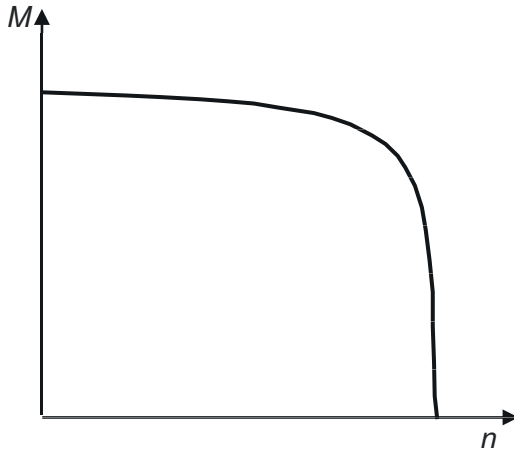
### DEFINITION

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

Stillstandsmotoren mit der Drehmomentcharakteristik einer Dreieckkennlinie (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. Stillstandsmotoren gibt es in der Ausführung mit Kurzschluss- und Schleifringläufer.



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

**Bild 1.15**

Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie eines Stillstandsmotors mit Charakteristik Rechteckkennlinie

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.

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

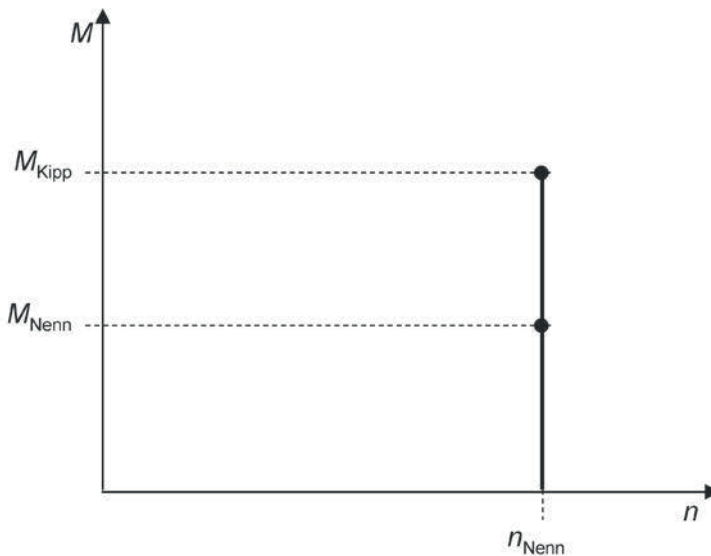
$$P_{\text{V}} = P_{\text{elektr}} \cdot (1 - \eta)$$

Die mechanische Drehzahl des Motors ist gleich der synchronen Drehfelddrehzahl:

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

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.

### 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.

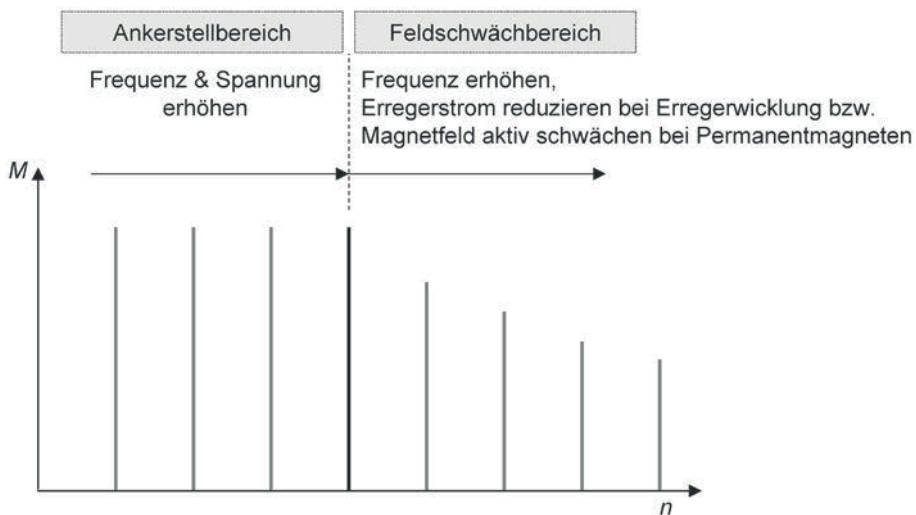
Auch hier kann die Ausgangsspannung des Umrichters nicht weiter erhöht werden, sondern nur noch die Frequenz. Zusätzlich muss aber der Strom in der Erregerwicklung zurückgenommen werden. Bei einem Permanentmagnet-erregten Synchronmotor wird dazu ein Strom zur Schwächung des Magnetfeldes aktiv in die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

### ACHTUNG

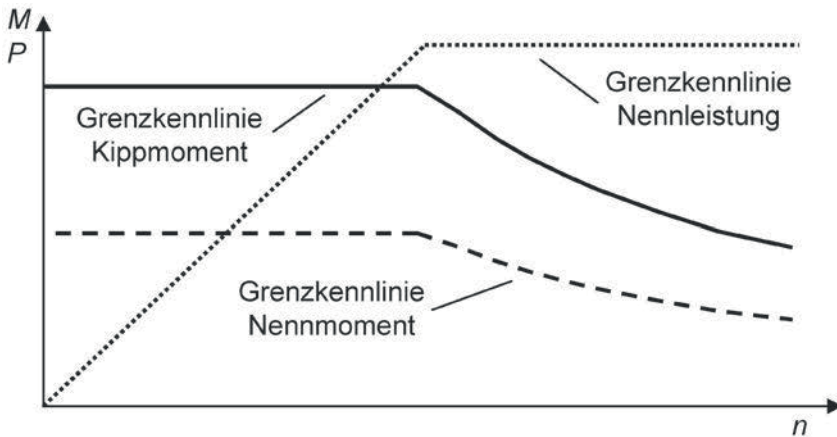
Wird der Synchronmotor im Feldschwächbereich betrieben und das Stellgerät fällt aus, kann er aufgrund seiner hohen Drehzahl und des nun nicht mehr geschwächten Magnetfeldes hohe Spannungen erzeugen. Diese müssen durch spannungsbegrenzende Maßnahmen abgebaut werden, damit das Stellgerät nicht geschädigt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

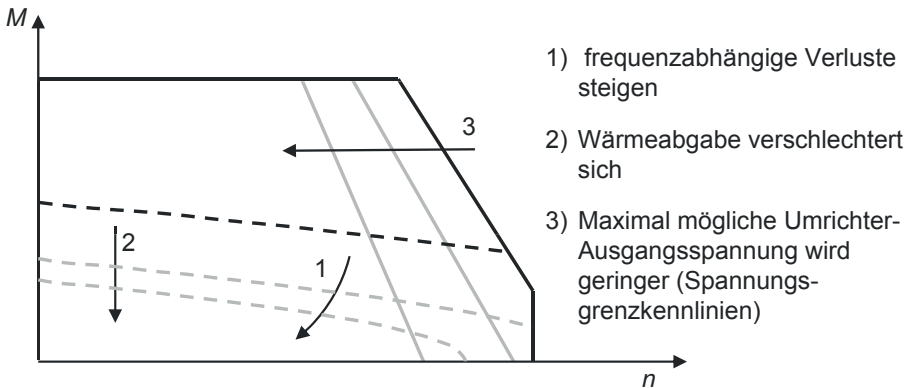


**Bild 1.17** Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie Drehstrom-Synchronmotor bei Betrieb mit variabler Frequenz



**Bild 1.18** Grenzkennlinien Drehstrom-Synchronmotor bei Betrieb mit variabler Frequenz

- Maximaldrehmoment ohne Begrenzung
- Maximaldrehmoment mit Begrenzung
- - - Dauerdrehmoment ohne Begrenzung
- - - Dauerdrehmoment mit Begrenzung



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

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 Abschnitt 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.

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 Gleichstrom-Nebenschlussmotor (fremderregt)

Die Gleichstrom-Nebenschlussmaschine konnte schon frühzeitig durch Leonardumformer drehzahlvariabel betrieben werden. Ein Leonardsatz besteht aus einem am Drehstromnetz angeschlossenen Asynchronmotor, der einen Gleichstromgenerator antrieb. Durch die Einstellung der Erregung des Gleichstromgenerators konnte er eine variable Gleichspannung erzeugen, die dann den zu steuernden Gleichstrommotor versorgte. Drehrichtungsumkehr und Energierückspeisung in das Netz waren damit ebenfalls möglich.

Die Stromrichtertechnik hat diese Art der Drehzahlstellung jedoch weitestgehend abgelöst.

Seitdem die Frequenzumrichter mit immer leistungsfähigeren Steuereinheiten ausgestattet werden können, ist auch der Asynchronmotor durch ausgefeilte Rechenmodelle sehr gut regelbar und löst zunehmend den Gleichstrommotor ab.

Die Leistungsaufnahme eines fremderregten Gleichstrom-Nebenschlussmotors setzt sich aus der Ankerleistung zur Erzeugung des Drehmomentes und der Erregerleistung zur Erzeugung des Magnetfeldes zusammen:

$$P_{\text{elektr}} = P_{\text{Anker}} + P_{\text{err}} = U_{\text{Anker}} \cdot I_{\text{Anker}} + U_{\text{err}} \cdot I_{\text{err}}$$

Die an der Motorwelle verfügbare mechanische Leistung ergibt sich mit dem Wirkungsgrad 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:

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

Die Leerlaufdrehzahl des Motors ist:

$$n_0 [\text{min}^{-1}] = \frac{U_{\text{Anker}}}{c \cdot \Phi} \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi}$$

Bei Belastung mit einem bestimmten Drehmoment  $M$  geht die Leerlaufdrehzahl um einen belastungsabhängigen Anteil zurück.

Die allgemeine Drehmoment-Drehzahlbeziehung lautet:

$$n [\text{min}^{-1}] = \left( \frac{U_{\text{Anker}}}{c \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{Anker}}}{(c \cdot \Phi)^2} \cdot M \right) \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi}$$

Der Anteil  $c \cdot \Phi$  kann aus den Nenndaten der Maschine berechnet werden:

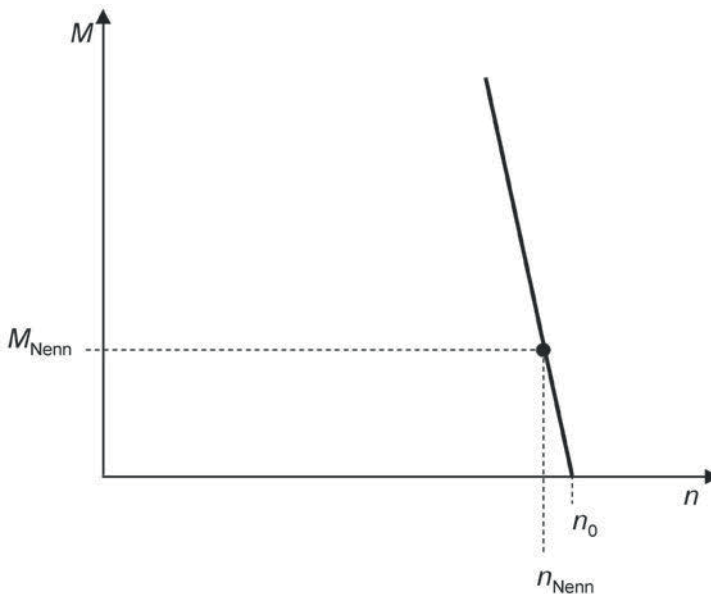
$$c \cdot \Phi = \frac{M}{I_{\text{Anker}}}$$

wobei  $c$  eine Maschinenkonstante und  $\Phi$  der magnetische Fluss ist.

Das Drehmoment, das der Motor in seinem Nennpunkt entwickeln kann, berechnet sich nach:

$$M_{\text{Nenn}} = \frac{P_{\text{Nenn\_mech}}}{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{Nenn}}}$$

Bild 1.20 zeigt die Kennlinie des Gleichstrom-Nebenschlussmotors bei Betrieb an konstanter Ankerspannung und konstanter Erregung.



**Bild 1.20** Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie Gleichstrom-Nebenschlussmotor