

Kennlinien von Motoren und Arbeitsmaschinen

Wir wollen uns zunächst mit dem **statischen** Verhalten von Antriebssystemen beschäftigen. Im Gegensatz zum **dynamischen** Verhalten, wo wir Einschwingvorgänge zu beachten haben, betrachten wir also nur den eingeschwungenen Zustand. Wir fragen z.B. danach, welches Moment bei einem Pumpenantrieb bei einer bestimmten Drehzahl erforderlich ist, aber nicht nach dem zeitlichen Verlauf von Moment, Drehzahl, Strömen etc. beim Einschalten, beim Hochlaufen oder bei Belastungsänderungen.

1 Kennlinien von Arbeitsmaschinen

Das Moment, das eine Arbeitsmaschine benötigt, hängt oft gemäß einer statischen Kennlinie von der Drehzahl ab. Es gibt einige typische Lastkennlinien, die wir im Folgenden diskutieren wollen. In der Praxis werden diese Kennlinien häufig nicht in dieser reinen Form auftreten, sondern es werden Effekte wie Reibung, „Losbrechmomente“, etc. zu beachten sein.

1.1 Konstante Antriebsleistung

Bei einer Aufwickelmaschine sollen der Bandzug F und die Bahngeschwindigkeit v konstant gehalten werden. Dann ist wegen (1.1) auch die erforderliche Antriebsleistung konstant.

$$P = F \cdot v = M \cdot \omega \quad (1.1)$$

Für konstante Bahngeschwindigkeit muss die Winkelgeschwindigkeit der Haspel in Abhängigkeit vom aktuellen Radius des Wickels vorgegeben werden:

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (1.2)$$

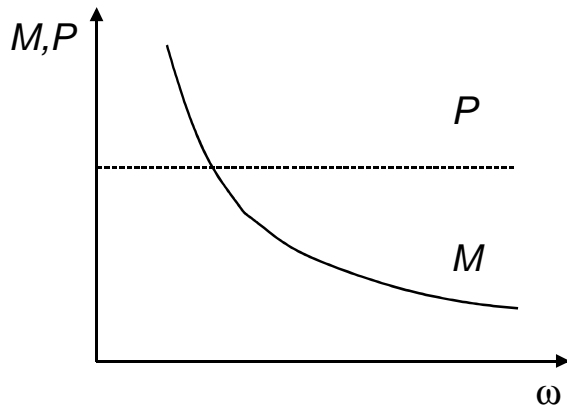
Für das Lastmoment gilt dann:

$$M = \frac{P}{\omega} \sim \frac{1}{\omega} \quad (1.3)$$

Erfordert also die Arbeitsmaschine eine konstante Antriebsleistung, so ist das erforderliche Antriebsmoment umgekehrt proportional zur Winkelgeschwindigkeit.

Bei dem hier angeführten Beispiel der Aufwickelmaschine handelt es sich genau genommen nicht um eine statische Kennlinie der Arbeitsmaschine, der Antriebsmotor muss hier ein geregelter Antrieb sein, dem ein Momentensollwert gemäß Gl. (1.3) vorgegeben wird. Das Bei-

spiel wurde hier dennoch aufgenommen, da es den wichtigen Fall beschreibt, dass ein Antriebsmotor mit zunehmenden Drehzahlen weniger Moment abgeben muss.



Ein ganz ähnlicher Fall wie beim Wickeln liegt bei einer Plandrehmaschine vor, wo für optimale Ergebnisse Schnittkraft F und Schnittgeschwindigkeit v konstante, vom Werkstoff abhängige Werte haben sollten (konstante Schnittleistung).

Bild 1 Konstante Antriebsleistung

1.2 Konstantes Lastmoment

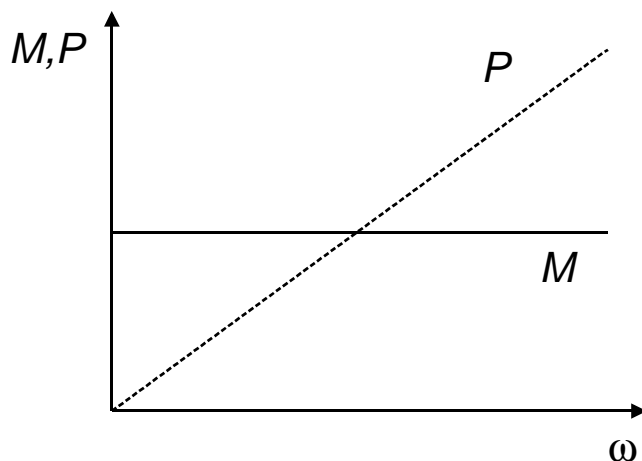
Bei Aufzügen, Kränen etc. wird das Drehmoment wegen $M = rF$ letztendlich von der Gewichtskraft

$$F = m g \quad (1.4)$$

bestimmt. Wenn r konstant ist, ist auch M konstant und es gilt:

$$P = \omega M \sim \omega \quad (1.5)$$

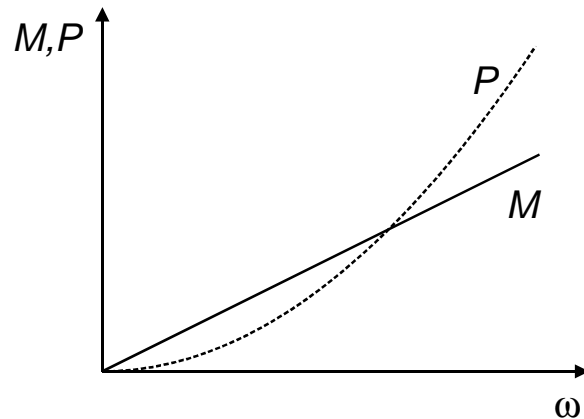
Die erforderliche Antriebsleistung wächst also linear mit der Winkelgeschwindigkeit bzw. der Drehzahl.



Weitere Beispiele für konstantes Moment sind Arbeitsmaschinen mit reiner Hub-, Reibungs- und Formänderungsarbeit wie Kolbenpumpen (mit gleichbleibendem Gegendruck), Fließbänder, Walzwerke, Vorschubantriebe etc.

Bild 2 Konstantes Lastmoment

1.3 Linear ansteigendes Lastmoment



Wenn das Lastmoment linear mit der Drehzahl wächst, so ist die Leistung dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit proportional.

Dieser Fall liegt z.B. vor bei geschwindigkeitsproportionaler Reibung (Kalander).

Bild 3 Linear ansteigendes Lastmoment

1.4 Quadratisch ansteigendes Lastmoment

Ein mit dem Quadrat der Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit wachsendes Lastmoment liegt vor, wenn Strömungswiderstände zu überwinden sind, also bei Lüftern, Kreiselpumpen, Zentrifugen etc.:

$$M \sim \omega^2$$

Die Leistung wächst dann kubisch mit ω :

$$P = \omega M \sim \omega^3$$

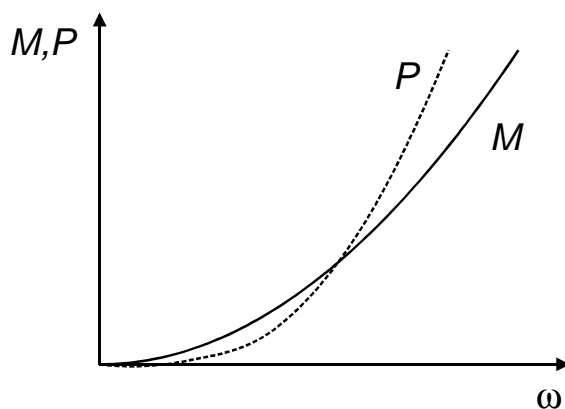


Bild 4 Quadratisch ansteigendes Lastmoment

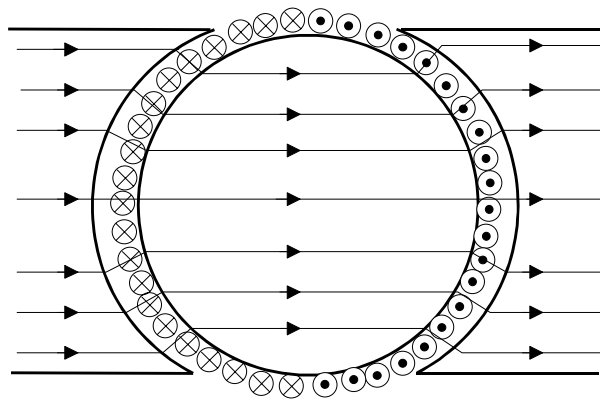
2 Kennlinien von Motoren

Wir betrachten nun die **statischen** Kennlinien der wichtigsten elektrischen Maschinen, d.h. wir fragen, welche Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit sich einstellt, wenn diese Maschinen mit einem bestimmten Moment belastet werden, oder welches Moment die Maschine in Abhängigkeit von der Drehzahl (Winkelgeschwindigkeit) abgibt.

Achtung: Dies gilt nur für unregelte Maschinen. Bei geregelten Antrieben kann Drehzahl oder Moment beliebig vorgegeben werden.

2.1 Fremderregte Gleichstrommaschine

In Bild 5 ist noch einmal das Prinzip des Elektromotors dargestellt.



Wenn wir bei der Maschine in Bild 5 durch einen „Kommutator“ dafür sorgen, dass bei einer Bewegung des Rotors die Leiter auf der rechten Seite stets von einem Strom aus der Zeichnungsebene heraus, und die Leiter auf der linken Seite von einem Strom in die Zeichnungsebene hinein durchflossen werden, so haben wir das Modell einer Gleichstrommaschine.

Bild 5 Prinzip des Elektromotors

Wir haben bereits den Zusammenhang zwischen Strom und Moment abgeleitet:

$$M = r \alpha z i l B$$

Der Fluß ϕ , der den Rotor in Bild 5 durchsetzt, ist proportional zur magnetischen Induktion B . Das Moment hängt deshalb nur von dem Produkt aus Fluß ϕ und Strom i , sowie einer Konstanten ab. Bezeichnen wir den „Ankerstrom“ mit I_A , so gilt:

$$M_i = c_m \cdot \phi \cdot I_A \quad (2.1)$$

Darin ist M_i das „innere“ oder „induzierte“ Moment. Infolge von Reibung und anderen Verlusten unterscheidet sich M_i von dem Moment an der Motorwelle.

Wir wollen nun überlegen, welche Spannung, wir an den „Bürsten“ abgreifen können. Wir können die Antwort mit Hilfe des Induktionsgesetzes finden, einfacher geht es mit der Überlegung, dass bei einer verlustfreien Maschine gelten muss:

$$P = \omega \cdot M_i = U_q \cdot I_A \quad (2.2)$$

Die induzierte Spannung oder Quellenspannung U_q , die an der verlustfreien Maschine anliegt, wird manchmal auch (etwas altmodisch) elektromotorische Kraft (EMK), bzw. auf englisch EMF genannt. Diese Spannung wird oft in der Literatur auch mit E bezeichnet. Eine andere übliche Bezeichnung dafür ist U_i .

Wenn wir (2.2) nach I_A auflösen und in (2.1) einsetzen erhalten wir:

$$U_q = c_m \cdot \phi \cdot \omega \quad (2.3)$$

Die Gleichungen (2.1) und (2.3) sind die Hauptgleichungen der elektrischen Maschine.

Wir sehen also, dass bei konstantem Fluss das Moment dem Ankerstrom und die Quellenspannung der Winkelgeschwindigkeit proportional ist, wobei sich die gleiche Proportionalitätskonstante ergibt.

Achtung: Wir können Gl. (2.3) statt für die Winkelgeschwindigkeit auch für die Drehzahl angeben. Dann taucht der Faktor 2π auf bzw. wir bekommen eine andere Proportionalitätskonstante.

Die Quellenspannung U_q erscheint nur dann an den Ankerklemmen, wenn kein Strom fließt und somit keine ohmschen Verluste auftreten. Ansonsten gilt folgendes einfache Ersatzschaltbild:

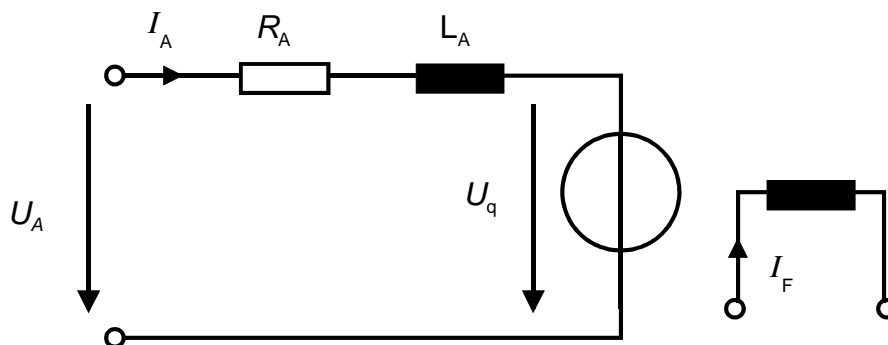


Bild 6 Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine

Darin ist R_A der Ankerwiderstand und L_A die Ankerinduktivität. Der Feldkreis interessiert uns zunächst nur insoweit, als wir feststellen, dass bei konstantem Feldstrom I_F auch der Fluss konstant ist.

Aus Bild 6 lesen wir folgende Beziehung ab:

$$U_A = R_A \cdot I_A + L_A \frac{dI_A}{dt} + U_q \quad (2.4)$$

Da wir uns zunächst nur für die **statische** Kennlinie der Gleichstrommaschine interessieren, ist der Ankerstrom konstant und die zeitliche Ableitung des Ankerstroms ist Null.

Wir lassen deshalb in (2.4) den Einfluss der Ankerinduktivität weg und setzen (2.1) und (2.3) ein:

$$U_A = R_A \cdot \frac{M_i}{c_m \cdot \phi} + c_m \cdot \phi \cdot \omega \quad (2.5)$$

Nach M_i aufgelöst:

$$M_i = \frac{c_m \cdot \phi}{R_A} \cdot U_A - \frac{(c_m \cdot \phi)^2}{R_A} \cdot \omega \quad (2.6)$$

Bei konstantem ϕ und konstantem U_A beschreibt (2.6) eine **Gerade**, wenn man M_i über ω aufträgt.

Führen wir das „Anzugsmoment“ M_A und die Leerlaufwinkelgeschwindigkeit ω_0 ein, so können wir schreiben:

$$M_i = M_A - M_A \cdot \frac{\omega}{\omega_0} \quad (2.7)$$

Dieser Verlauf ist in Bild 7 dargestellt.

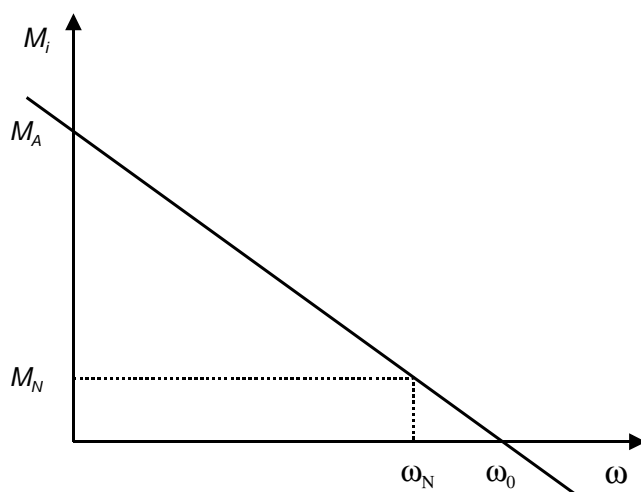


Bild 7 zeigt nur den prinzipiellen Verlauf¹, in Wirklichkeit verläuft die Kennlinie sehr viel steiler und der Wert M_A kann zumindest bei größeren Maschinen nicht angefahren werden. Wird die Maschine im Stillstand ($\omega = 0$) an Nennspannung angelegt, so entsteht (zumindest theoretisch) ein sehr großes Moment M_A , da die Nennspannung dann wegen $U_q = 0$ am Ankerwiderstand anliegt und einen sehr großen Strom treibt. Bei größeren Maschinen ist das unzulässig.

Bild 7 Kennlinie der Gleichstrommaschine

¹ Häufig wird auch die Drehzahl als Funktion des Moments dargestellt.

Wenn für eine Maschine die Bemessungswerte U_{AN} , I_{AN} und ω_N gegeben sind, so können wir daraus $c_m \cdot \phi$ berechnen. Wir setzen (2.3) in (2.4) ein, wobei wir die Ableitung wieder zu Null setzen:

$$U_A = R_A \cdot I_A + c_m \cdot \phi \cdot \omega \quad (2.8)$$

Gl. (2.8) gilt natürlich insbesondere auch für die Bemessungswerte:

$$U_{AN} = R_A \cdot I_{AN} + c_m \cdot \phi \cdot \omega_N \quad (2.9)$$

aufgelöst nach $c_m \cdot \phi$:

$$c_m \cdot \phi = \frac{U_{AN} - R_A \cdot I_{AN}}{\omega_N} \quad (2.10)$$

Für das praktische Rechnen ist das Hantieren mit der Geradengleichung (2.6) etwas unpraktisch. Meist kommen wir mit einfacheren Überlegungen ans Ziel.

Läuft die Maschine mit ihrer Bemessungsspannung und mit ihrer ideellen Leerlaufdrehzahl, d.h. sie gibt kein Moment ab, und es liegt auch keine innere Reibung in der Maschine vor, so würde auch kein Strom fließen und es gilt:

$$U_{AN} = c_m \cdot \phi \cdot \omega_0 \quad (2.11)$$

Da kein Strom fließt, ist die Ankerspannung gleich der Quellenspannung.

Andererseits gilt bei Bemessungsbetrieb für die Quellenspannung:

$$U_{qN} = c_m \cdot \phi \cdot \omega_N \quad (2.12)$$

Aus (2.11) und (2.12) erhält man:

$$\frac{\omega_0 - \omega_N}{\omega_0} = \frac{U_{AN} - U_{qN}}{U_{AN}} = \frac{I_{AN} \cdot R_{AN}}{U_{AN}} \quad (2.13)$$

2.2 Reihenschlussmotor

Es gibt auch Gleichstrommaschinen, bei denen der Ankerstrom auch durch die (entsprechend dimensionierte) Erregerwicklung fließt. Solche Maschinen nennt man Reihenschluss- oder Hauptschlussmaschinen.

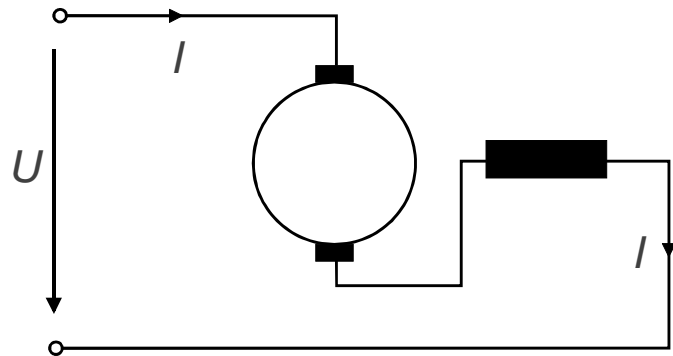


Bild 8 Reihenschlussmotor

Es gilt:

$$M \sim B I \quad (2.14)$$

Im linearen Teil der Magnetisierungskennlinie gilt:

$$B \sim I \quad (2.15)$$

also

$$M \sim B^2 \sim I^2 \quad (2.16)$$

Wegen (2.3) gilt:

$$U_q \sim B \cdot \omega \quad (2.17)$$

und mit $R = 0$:

$$U \sim B \cdot \omega \quad (2.18)$$

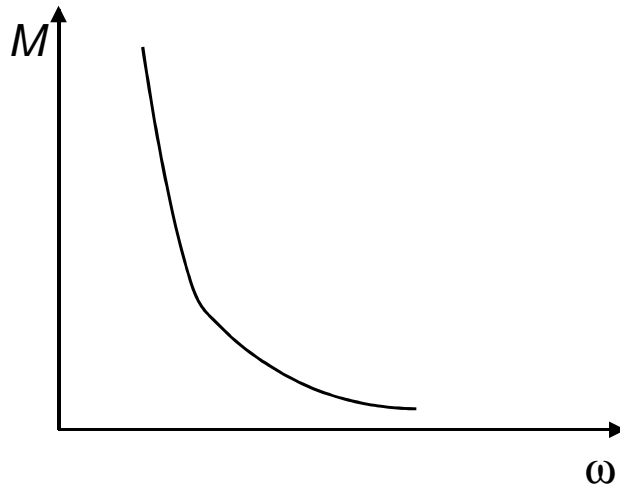
oder

$$B \sim \frac{U}{\omega} \quad (2.19)$$

(2.19) in (2.16) eingesetzt ergibt:

$$M \sim \frac{U^2}{\omega^2} \quad (2.20)$$

Bild 9 zeigt diesen Zusammenhang:



Die Kennlinie zeigt einen stark nichtlinearen Zusammenhang. Die Reihenschlussmaschine „geht bei Entlastung durch“. Es gibt keinen Übergang vom Motor zum Generatorbetrieb durch Vorzeichenwechsel des Drehmomentes. Bei entsprechender Ausführung ist die Reihenschlussmaschine auch für Einphasen-Wechselstrom geeignet.

Bild 9 Kennlinie der Reihenschlussmaschine

2.3 Asynchronmaschine

Bild 10 zeigt das bekannte Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine:

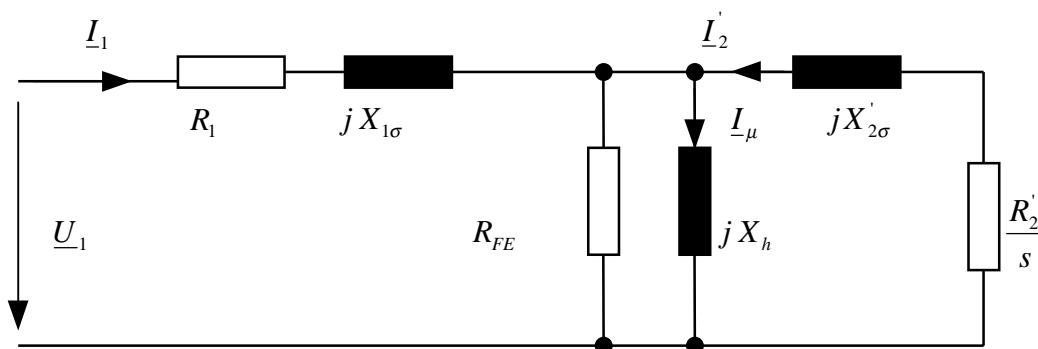


Bild 10 Stationäres Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

Darin sind Ströme und Spannungen komplexe Effektivwerte, die Spannung \underline{U}_1 ist die Phasenspannung. \underline{I}_2' , $X_{2\sigma}'$ und R_2'/s sind auf die Statorseite umgerechnete Rotorgrößen..

Die Größe s ist der Schlupf, der folgendermaßen definiert ist:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (2.21)$$

Darin ist ω die mechanische Winkelgeschwindigkeit² und ω_0 ist die Winkelgeschwindigkeit, die der Synchron- oder Leerlaufdrehzahl³ entspricht. Zwischen ω_0 und der Kreisfrequenz (Winkelgeschwindigkeit) der Netzspannung

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad (2.22)$$

besteht dabei folgender Zusammenhang:

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{p} \quad (2.23)$$

Darin ist p die Polpaarzahl der Asynchronmaschine.

Achtung: Das Ersatzschaltbild (Bild 10) der Asynchronmaschine beschreibt nur das stationäre Verhalten im eingeschwungenen Zustand mit sinusförmigen Strömen und Spannungen. Wir dürfen daraus keine Rückschlüsse auf das dynamische Verhalten der Maschine ziehen.

Wir vernachlässigen in dem Ersatzschaltbild nun R_1 und R_{FE} . Mit

$$X_1 = X_h + X_{1\sigma} \quad (2.24)$$

und

$$X_2 = X_h + X'_{2\sigma} \quad (2.25)$$

lesen wir folgende Gleichungen ab:

$$\underline{U}_1 = jX_1 \cdot \underline{I}_1 + jX_h \cdot \underline{I}'_2 \quad (2.26)$$

² Die mechanische Winkelgeschwindigkeit wird oft auch mit Ω bezeichnet.

³ wird oft auch synchrone Winkelgeschwindigkeit ω_s genannt.

$$0 = jX_h \cdot \underline{I}_1 + \left(\frac{R_2'}{s} + j \cdot X_2 \right) \cdot \underline{I}_2' \quad (2.27)$$

Wir lösen (2.26) nach \underline{I}_1 auf:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{jX_1} - \underline{I}_2' \cdot \frac{X_h}{X_1} \quad (2.28)$$

Dies in (2.27) eingesetzt ergibt:

$$0 = \frac{X_h}{X_1} \cdot \underline{U}_1 - j \frac{X_h^2}{X_1} \cdot \underline{I}_2' + \left(\frac{R_2'}{s} + jX_2 \right) \cdot \underline{I}_2' \quad (2.29)$$

$$-\underline{U}_1 \cdot \frac{X_h}{X_1} = \underline{I}_2' \cdot \left(\frac{R_2'}{s} + jX_2 \cdot \left(1 - \frac{X_h^2}{X_1 \cdot X_2} \right) \right) \quad (2.30)$$

Mit dem totalen Streufaktor

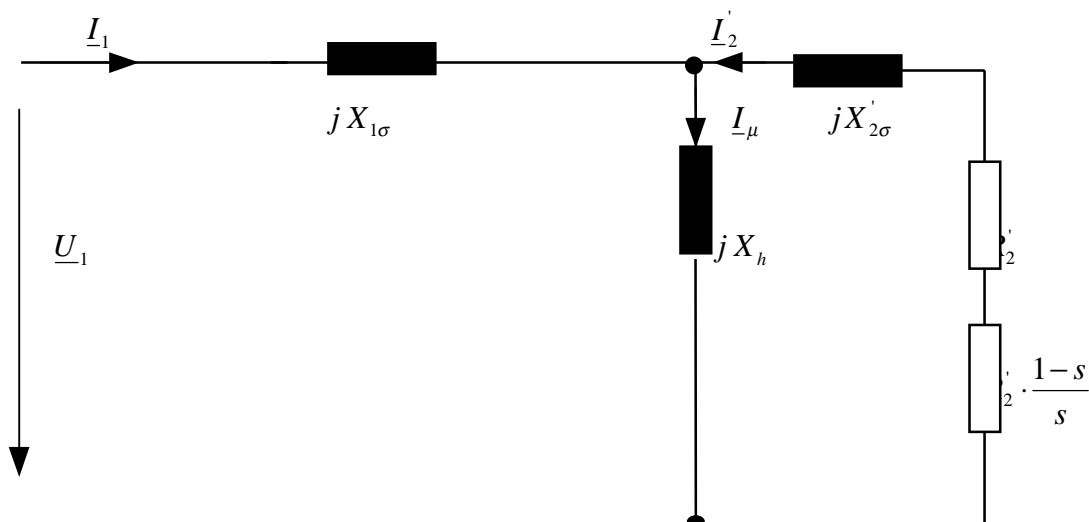
$$\sigma = 1 - \frac{X_h^2}{X_1 \cdot X_2} \quad (2.31)$$

in (2.30) eingesetzt folgt:

$$\underline{I}_2' = - \frac{\underline{U}_1 \cdot X_h / X_1}{R_2' / s + j\sigma X_2} \quad (2.32)$$

Im Ersatzschaltbild Bild 10 können wir R_2'/s wie folgt aufspalten:

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + R_2' \cdot \frac{1-s}{s} \quad (2.33)$$

Bild 11 Aufspaltung von R_2'/s

Die in R_2' umgesetzte Leistung entspricht nun den ohmschen Verlusten im Rotor und die in $R_2' \cdot (1-s)/s$ umgesetzte Leistung der mechanischen Leistung.

Für die aufgenommene Wirkleistung gilt (\underline{U}_1 ist die Phasenspannung!):

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad (2.34)$$

Wenn wir die Verluste im Stator vernachlässigen, wird diese Wirkleistung über den Luftspalt in den Rotor übertragen. Diese Luftspaltleistung P_δ ist die im Rotor umgesetzte Leistung (mechanische Leistung und Rotorverluste):

$$P_\delta = 3 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot I_2'^2 \quad (2.35)$$

Für die mechanische Leistung gilt:

$$P_{mech} = 3 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot R_2' \cdot I_2'^2 \quad (2.36)$$

Damit gilt:

$$P_{mech} = P_{\delta} \cdot (1-s) \quad (2.37)$$

$$P_{\delta} = \frac{P_{mech}}{1-s} = \frac{M_i \cdot \omega}{1 - \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} = \frac{M_i \cdot \omega}{\frac{\omega_0 - \omega_0 + \omega}{\omega_0}} \quad (2.38)$$

also:

$$P_{\delta} = M_i \cdot \omega_0 \quad (2.39)$$

Aus (2.32) erhalten wir:

$$I_2' = \frac{U_1 \cdot X_h / X_1}{\sqrt{(R_2'/s)^2 + (\sigma X_2)^2}} \quad (2.40)$$

Wenn wir (2.39) nach M_i auflösen und dann (2.35) und (2.40) einsetzen, erhalten wir:

$$M_i = \frac{P_{\delta}}{\omega_0} = \frac{3}{\omega_0} \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot \frac{U_1^2 \cdot X_h^2 / X_1^2}{(R_2'/s)^2 + (\sigma X_2)^2} \quad (2.41)$$

$$M_i = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot X_h^2 / X_1^2}{\omega_0 \cdot \left(\frac{R_2'}{s} + \frac{s \cdot (\sigma X_2)^2}{R_2'} \right)} \quad (2.42)$$

Das Moment ist also offensichtlich nichtlinear vom Schlupf s abhängig. Wir wollen nun untersuchen, wo dieser Verlauf Extremwerte (Minima bzw. Maxima) hat. Da, wo dies der Fall ist, muss die Ableitung von M nach s bekanntlich Null werden.

$$\frac{dM_i}{ds} = \left(- \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot X_h^2 / X_1^2}{\omega_0 \cdot \left(\frac{R_2'}{s} + \frac{s \cdot (\sigma X_2)^2}{R_2'} \right)^2} \right) \cdot \left(- \frac{R_2'}{s^2} + \frac{(\sigma X_2)^2}{R_2'} \right) = 0 \quad (2.43)$$

Wir erkennen, dass der zweite Faktor in (2.43) Null wird für:

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sigma X_2} \quad (2.44)$$

Der Wert s_k , für den das Moment ein Maximum, das sogenannte **Kippmoment** M_k annimmt, heißt **Kippschlupf**.

Wir ziehen in (2.42) den Ausdruck σX_2 vor die Klammer im Nenner und setzen für $R_2'/\sigma X_2$, das nun zweimal (einmal invertiert) in der Klammer steht, den positiven Wert von (2.44) ein:

$$M_i = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot X_h^2 / X_1^2}{\omega_0 \cdot \sigma X_2 \cdot \left(\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} \right)} \quad (2.45)$$

Setzen wir in (2.45) $s = s_k$ ein, so erhalten wir das Kippmoment:

$$M_k = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot X_h^2 / X_1^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \sigma \cdot X_2} \quad (2.46)$$

beziehungsweise mit (2.32) und mit $X_x = \omega_1 \cdot L_x$:

$$M_k = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot p \cdot L_h^2 / L_1^2}{2 \cdot \omega_1^2 \cdot \sigma \cdot L_2} \quad (2.47)$$

Dabei ist p die Polpaarzahl und ω_1 ist die Kreisfrequenz der Netzspannung. Wir erkennen, dass das Kippmoment proportional zum Quadrat der Netzspannung und umgekehrt proportional zum Quadrat der Netzfrequenz ist.

Wir dividieren (2.45) durch (2.46) und erhalten die **Kloß'sche Gleichung**:

$$\frac{M_i}{M_k} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (2.48)$$

Es ist bemerkenswert, dass unter den getroffenen Voraussetzungen das Kippmoment nicht vom Rotorwiderstand R_2' abhängt. Lediglich der Schlupf, bei dem das Kippmoment auftritt, hängt gemäß (2.44) von R_2' ab.

Wenn wir (2.48) für verschiedene Werte von s_k auftragen, erhalten wir folgenden Verlauf:

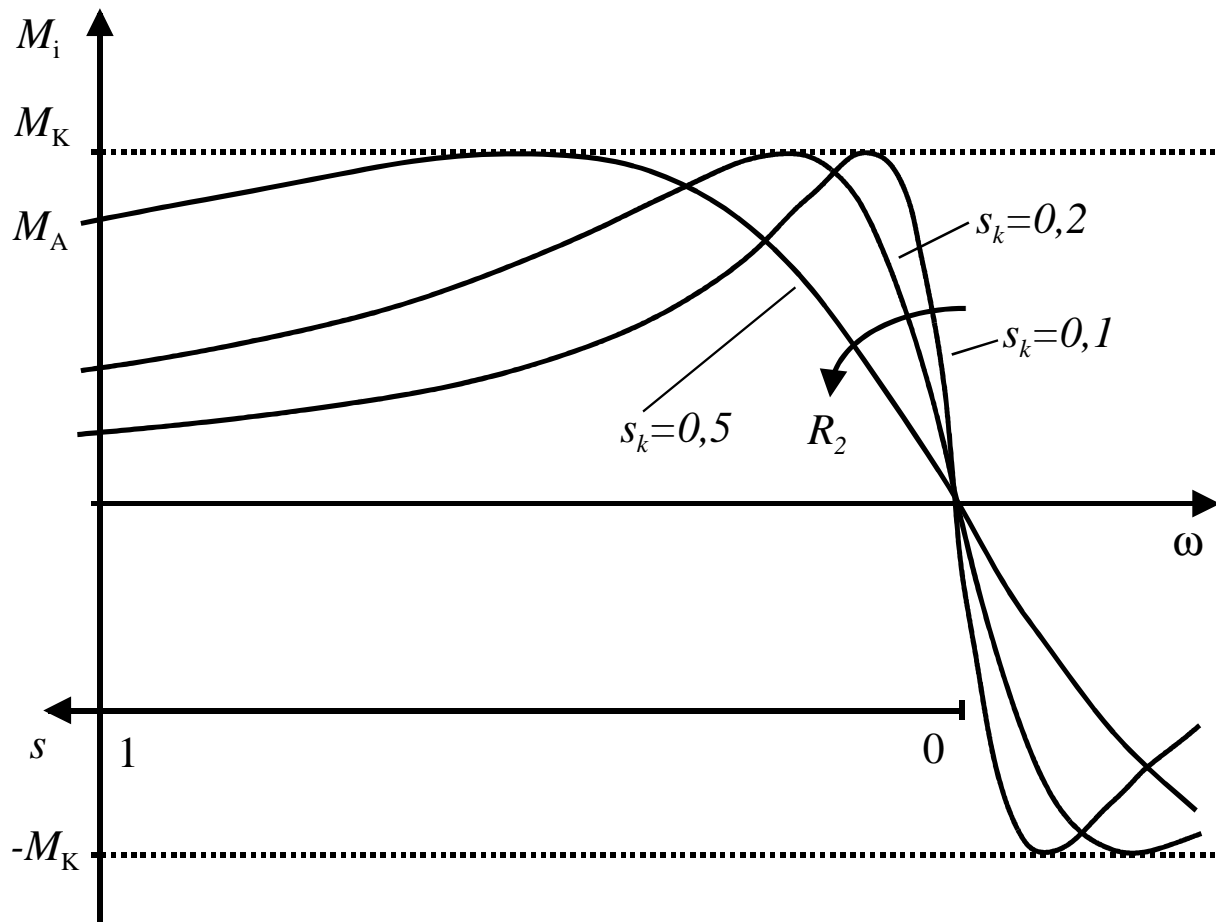


Bild 11 Drehmoment-Kennlinie der Asynchronmaschine

Hier erkennen wir auch, was die beiden Werte von (2.44) bedeuten: Bei beiden Werten stellt sich ein Extremwert ein; einer im Motorbetrieb und einer im Generatorbetrieb.

Durch Ändern von R_2' können wir (2.44) s_k einstellen und damit den Verlauf der Kurve in Bild 11 verändern. Dies geschieht beim **Schleifringläufer**-Motor dadurch, dass veränderliche Widerstände in den Läuferkreis geschaltet werden können. Dies war von Bedeutung, als man noch keine Leistungselektronik (Frequenzumrichter) zum Betrieb von Asynchronmaschinen zur Verfügung hatte. Insbesondere kann man zum Anlaufen den Kipp-Punkt weit nach links schieben und hat dann ein größeres Anzugsmoment M_A zur Verfügung.

Diesen Effekt kann man auch beim Kurzschlussläufer-Motor in gewissen Grenzen dadurch erzielen, dass die Läufernuten (Hochstabläufer etc.) entsprechend geformt werden, so dass infolge von Stromverdrängungseffekten R_2' frequenzabhängig wird: Bei stillstehendem Motor ist die Frequenz des Läuferstroms ω_2 hoch und damit R_2' groß; es ergibt sich eine Kennlinie für großes R_2' . Mit wachsender Drehzahl nimmt die Läuferfrequenz und damit R_2' ab; wir

erhalten eine Kennlinie für kleines R_2' . Die Kennlinie für einen Stromverdrängungsläufer entspricht also beim Anlaufen der einer ASM mit großem R_2' (großes M_A) und im Nennbetrieb der einer ASM mit kleinem R_2' .

2.4 Synchronmaschine

Die Drehmoment-Kennlinie der Synchronmaschine ist in Bild 12 idealisiert dargestellt:

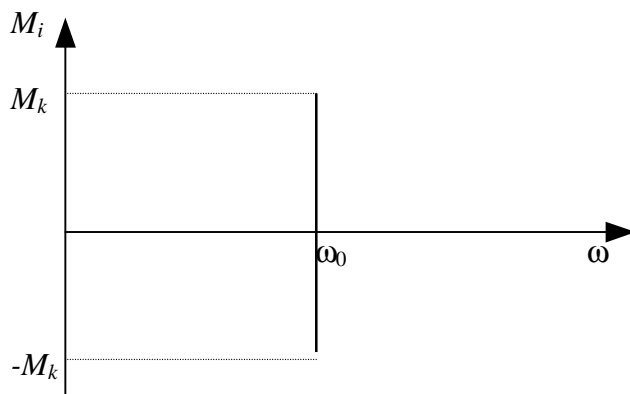


Bild 12 Idealisierte Drehmoment-Kennlinie der Synchronmaschine

Bei der Synchronmaschine hängt das abgegebene Moment vom Polradwinkel ab. Die Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit ändert sich unter Belastung nicht und entspricht unter Berücksichtigung der Polpaarzahl exakt der Kreisfrequenz von Ständerstrom bzw. Ständerspannung. Je nach Belastung arbeitet die Synchronmaschine als Motor oder Generator.

Bei realen Synchronmaschinen überlagern sich noch asynchrone Effekte, so dass auch bei anderen Drehzahlen ein Moment entsteht (asynchroner Hochlauf, Dämpferwicklung).

Die Synchronmaschine wird oft als Generator eingesetzt. Das geht von der Lichtmaschine im Kfz bis zum Kraftwerksgenerator.

In der Antriebstechnik werden Synchronmaschinen mit Permanentmagnet-Erregung gern in der Servo-Technik eingesetzt (kleines Trägheitsmoment). Dabei gibt es sowohl Varianten mit sinusförmigem als auch mit blockförmigem Verlauf der Induktion über dem Umfang. Die letztgenannte Variante wird auch als bürstenlose Gleichstrommaschine (Brushless-DC-Motor) bezeichnet. Diese hat vor allem wegen der relativ einfachen Signalverarbeitung eine große Verbreitung gefunden.

Auch bei großen Leistungen (z.B. Kesselspeisepumpe) werden Synchronmaschinen als Motor eingesetzt.

3 Stabilität des Arbeitspunktes

Wird eine **ungeregelte** elektrische Maschine mit einer Arbeitsmaschine gekoppelt, so wird sich im allgemeinen stationär ein Arbeitspunkt (Drehzahl und Moment) einstellen, der durch den Schnittpunkt der Momentenkennlinien von Motor und Arbeitsmaschine gegeben ist. Wir müssen aber prüfen, ob der/die Schnittpunkt(e) einen stabilen Betrieb erwarten lassen. Bild 13 zeigt die entsprechenden Überlegungen:

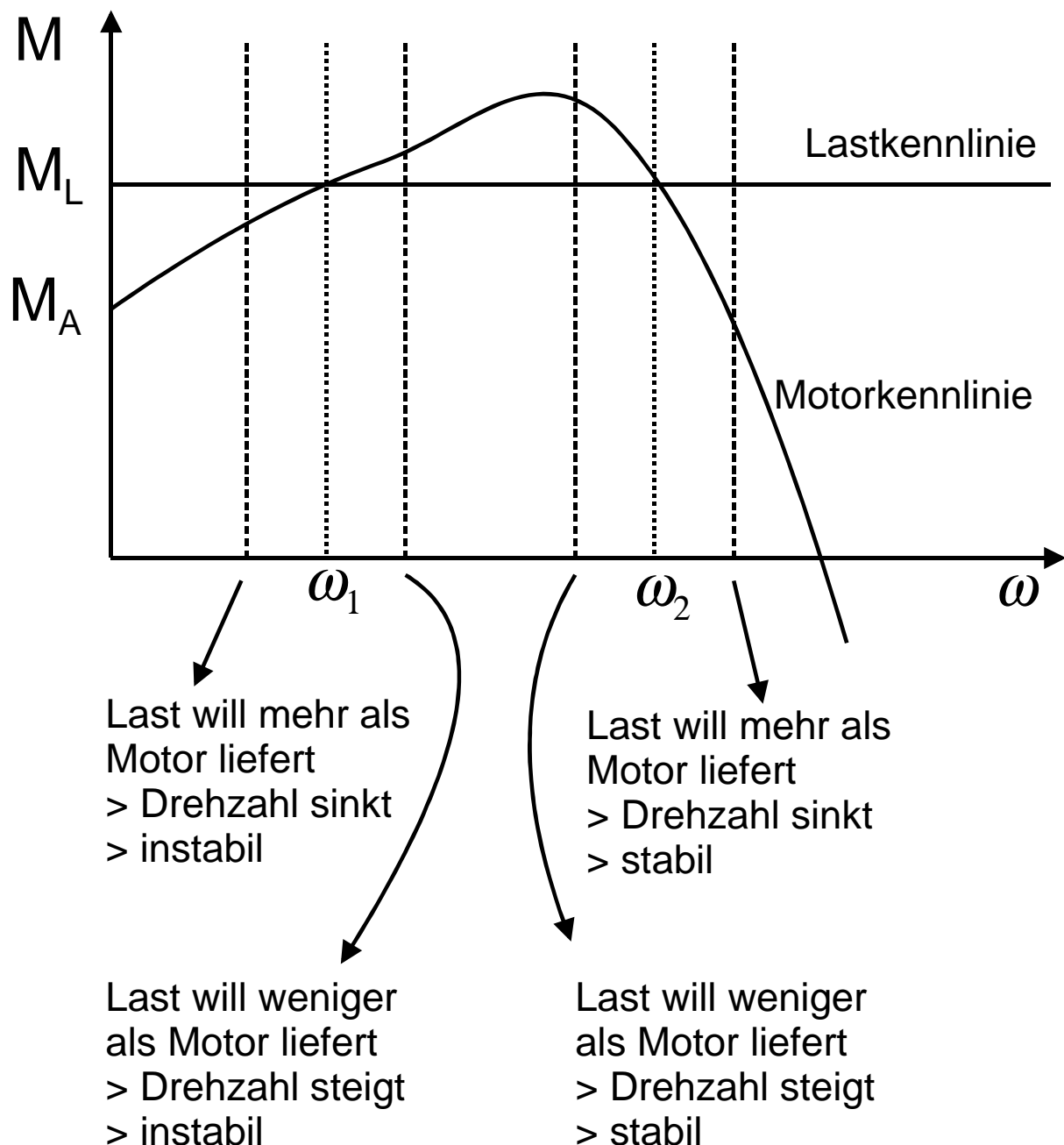


Bild 13 Zur Stabilität des Arbeitspunktes