

1. Einführung

1.1 Vor- und Nachteile der Nutzung elektrischer Energie

Die gesicherte Versorgung der Bevölkerung mit elektrischer Energie und eine rationelle und umweltschonende Anwendung ist eine der wichtigsten Aufgaben der Infrastruktur unserer Volkswirtschaft und eine Voraussetzung für ein Leben in geordneten sozialen Verhältnissen. Mit ihr beschäftigen sich heute mehr Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker als je zuvor. Dieser Trend wird sich voraussichtlich auch in Zukunft fortsetzen, weil die Sekundärenergieform "Elektrizität" gegenüber anderen Energieformen bedeutende Vorteile aufweist:

- Sie erlaubt es, im Grundsatz jede Primärenergiequelle auszunutzen und zwar unbeeinflusst davon ob es sich um fossile Energiestoffe (Kohle, Gas, Öl), Kernbrennstoffe oder um regenerative Energiequellen (Biomasse, Sonnenenergie, Geothermie, ect.) handelt.
- Sie läßt sich rasch, zuverlässig, sauber und verlustarm bis zum Endabnehmer verteilen und mit gutem Wirkungsgrad in alle Nutzenergieformen umwandeln. Solche vollständig umwandelbaren Energieteile werden in der Thermodynamik "Exergie", die nichtumwandelbaren "Anergie" genannt. Elektrische Energie ist fast reine Exergie.
- Sie ist einfach und genau zu messen, zu steuern und zu regeln.
- Sie ist für die Informationsverarbeitung (Computertechnik) praktisch unersetzlich.

Diesen Vorteilen stehen allerdings auch Nachteile gegenüber, die zu Restriktionen bei der Anwendung elektrischer Energie führen:

- Sie läßt sich nicht unmittelbar speichern. In jedem Augenblick muß von den Kraftwerken ebensoviel Leistung abgegeben werden wie die Endabnehmer fordern, zuzüglich eines Zuschlages für die im allgemeinen unter 10 % bleibenden Übertragungsverluste der Netze.
- Sie wird heute zum überwiegenden Teil durch Wärmekraftmaschinen erzeugt, die Wärme nur beschränkt in elektrische Energie umwandeln können. Nur in modernen Gas- und Dampfturbinen-(GuD)-Kraftwerken können Wirkungsgrade über 50 % verwirklicht werden.

- Ihre Übertragung ist an Leitungen gebunden. Freileitungen beeinflussen das Landschaftsbild, Erdkabel können bei großen Leistungen das Erdreich erwärmen und sind aufwendig zu installieren.
- Die erforderlichen Kraftwerke, Transport- und Verteilungsnetze sind sehr kapitalintensiv, insbesondere, wenn eine hohe Verfügbarkeit gewährleistet werden soll.

Der hohe Kapitalbedarf verlangt Bedarfsanalysen und langfristige Kraftwerks- und Netzplanung, wobei die wünschenswerte Einbindung von regenerativen Energiequellen berücksichtigt werden sollte.

Die Einbindung regenerativer Energiequellen stellt heute kein unlösbares technisches Problem dar. Es ist vielmehr eine Frage der Wirtschaftlichkeit und des politischen Willens der Beteiligten. Die heute existierenden, flächendeckenden Stromversorgungseinrichtungen bieten, durch die Energieverbundwirtschaft, die Möglichkeit die mit regenerativen Energiequellen erzeugte elektrische Energie anwenderfreundlich bis zum Endverbraucher zu verteilen. Aus diesem Grunde bringt die Anwendung der elektrischen Energie sehr gute Voraussetzungen mit, um den in künftigen Jahrzehnten notwendigen Übergang von den fossilen auf die regenerativen Energieträger wesentlich mitzugestalten.

1.2 Teilgebiete der elektrischen Energietechnik

Zur Energietechnik sind innerhalb der Elektrotechnik die Fachgebiete:

- Energieerzeugung
- Energietransport
- Energiespeicherung
- Energieverteilung
- Energieflußsteuerung
- Energienutzung
- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

zu rechnen.

Um den Stoff auf eine 3 SWS-Vorlesung zu beschränken, wird hier die Energietechnik aus der Sicht der Anwendung behandelt. Dabei stehen die Koppelprozesse mit der Umwandlung in mechanische Energie im Vordergrund der Betrachtung. Das Bild 1.1 zeigt, daß damit auch ein Querschnitt durch alle Teilgebiete der elektrischen Energietechnik gegeben werden kann. Eine Vertiefung kann aufbauend auf diese Vorlesung in jede Richtung erfolgen.

Teilgebiete der Elektrischen Energietechnik									
Elektr. Energie	-Erzeugung	-Transport	-Verteilung	-Speicherung	-Flußsteuerung	-Nutzung	-EMV		
Feldtheorie	X	X	X	X			X		X
Leitungstheorie		X	X						X
Netzwerktheorie	X	X	X		X				X
Maschinen	X					X			
Transformatoren	X	X	X						
Elektrische Antriebe	X				X	X			X
Energieelektronik		X	X	X					X
Elektrowärme					X	X			
Hochspannungstechnik	X	X	X						X
Elektrizitätswirtschaft	X	X	X	X	X	X			
Lichttechnik					X	X			X
Elektrochemie				X	X	X			X

Bild 1.1: Verknüpfung der Teilgebiete der elektrischen Energietechnik mit den Wissensgebieten

1.3 Anforderungen an die Antriebstechnik

Im einzelnen werden gefordert:

- Durch gesteigerte Produktionsgeschwindigkeit, höhere Reisegeschwindigkeit bei elektrischen Bahnen, zunehmende Automatisierung und das Bestreben nach sparsamerem Energieverbrauch werden in zunehmendem Maße regelbare elektrische Antriebe mit Energierücklieferung benötigt.
- guter Wirkungsgrad ($\eta > 0,8$) geregelter Antriebe und elektrischer Maschinen
- hohe Gleichlaufgenauigkeit (z.B. bei Papier und Textilmaschinen)
- hochgenaue Zugregelung (z.B. Haspel bei Walzgeräten)
- hohe Positioniergenauigkeit und exakte Bahntreue (z.B. bei Robotern)
- höchste Gleichförmigkeit und Konstanz im Bereich kleinster Drehzahlen. (z.B. bei Radioteleskopen)
- lange Lebensdauer und geringe Wartung (z.B. bei Lokomotiven 30 Jahre)
- hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit (z.B. Revisionsintervalle bei U- und S-Bahnen 500 000 km)
- einfache Inbetriebnahme und Reparatur

Um Antriebskonzepte zu entwerfen, die diesen Anforderungen genügen ist neben der grundlegenden Kenntnis der elektrischen Maschinen eine sorgfältige Analyse von

- Arbeitsmaschine und Prozeß,
- leistungselektronischen Stellgliedern und dem Netz,
- Regelungsstruktur und Regelgrößen elektrischer und nicht elektrischer Größen, Istwerterfassung (z.B. Sensortechnik)

notwendig.

1.4 Arten elektrischer Antriebe

Man unterscheidet folgende Arten elektrischer Antriebe:

1. Antriebe mit fester bzw. umschaltbarer Drehzahl (Netzbetrieb) ohne Stromrichter werden über Schaltgeräte direkt ans Netz geschaltet.
2. Regelbare Antriebe
 - Gleichstromantriebe
Bild 1.2 zeigt ein Strukturbild eines regelbaren Gleichstromantriebs
 - Drehfeldantriebe
Bild 1.3 zeigt ein Strukturbild eines regelbaren Drehfeldantriebes
3. Antriebssysteme

Moderne Bearbeitungsprozesse erfordern zu ihrer Realisierung mehrere elektrische Antriebe, die koordiniert und gesteuert werden müssen (Bild 1.4, Bild 1.5).

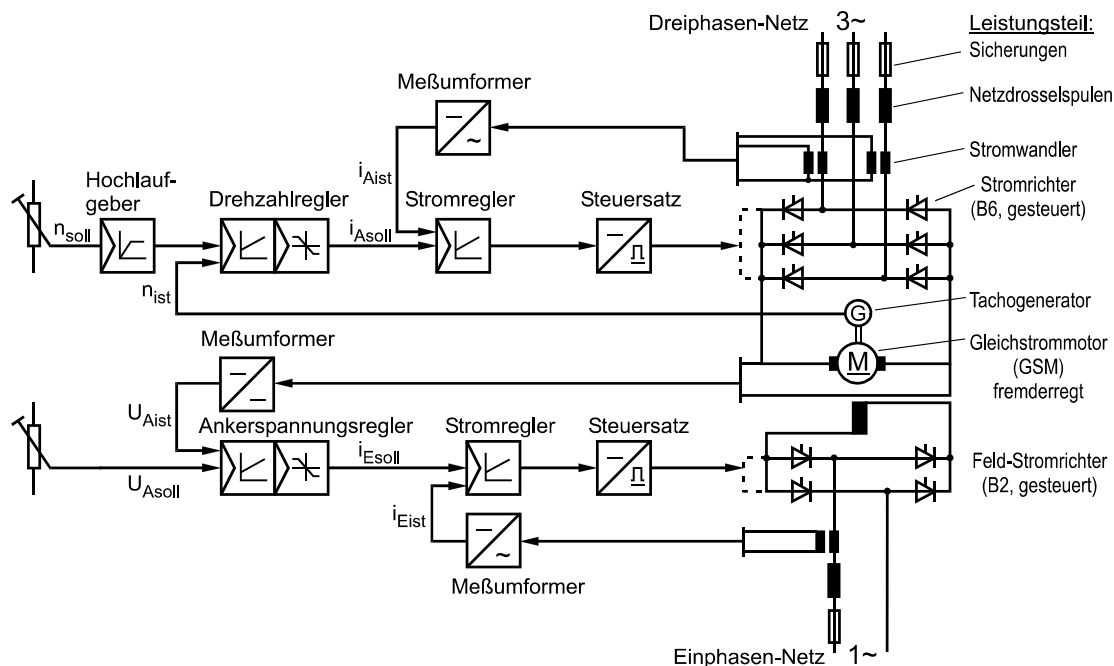


Bild 1.2: Beispiel für ein Strukturbild der Regeleinrichtung und Prinzipbild des Leistungsteils eines Gleichstromantriebes

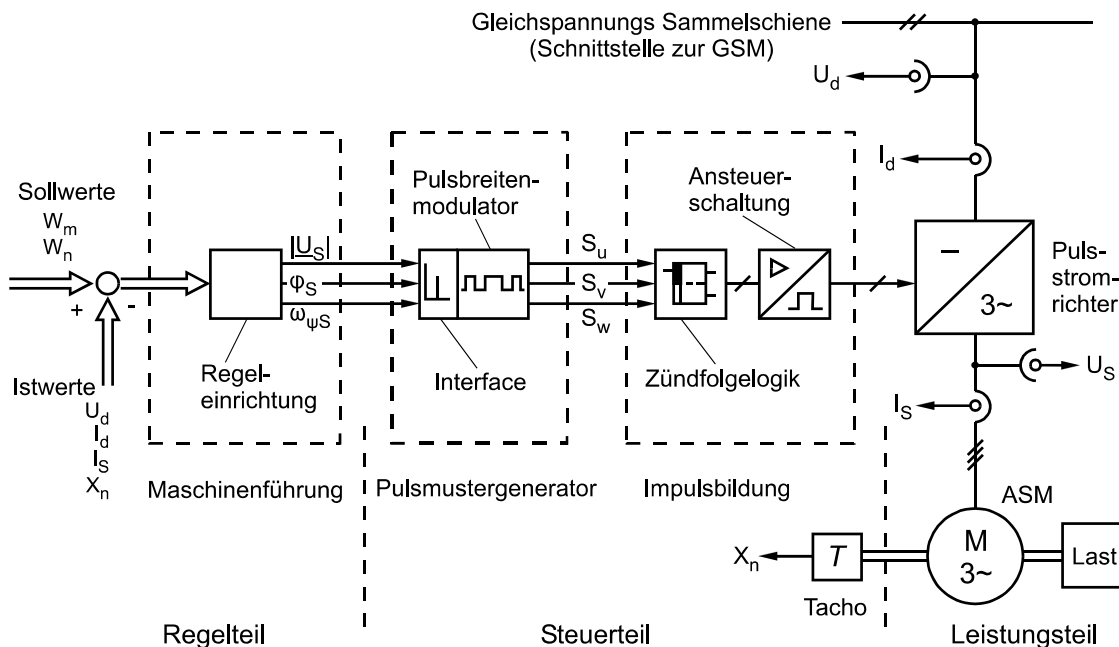


Bild 1.3: Beispiel für ein Blockschaltbild eines regelbaren Antriebes mit Asynchronmaschine (ASM) und Pulsstromrichter (PSR)

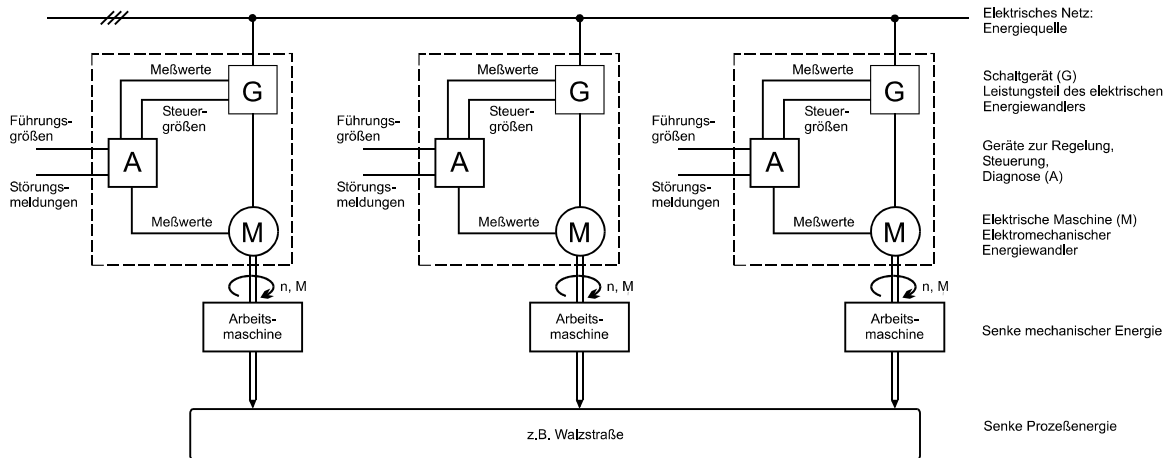


Bild 1.4 Beispiel für ein Schaltungskonzept eines Mehrmotoren-Antriebssystems zur Produktautomatisierung

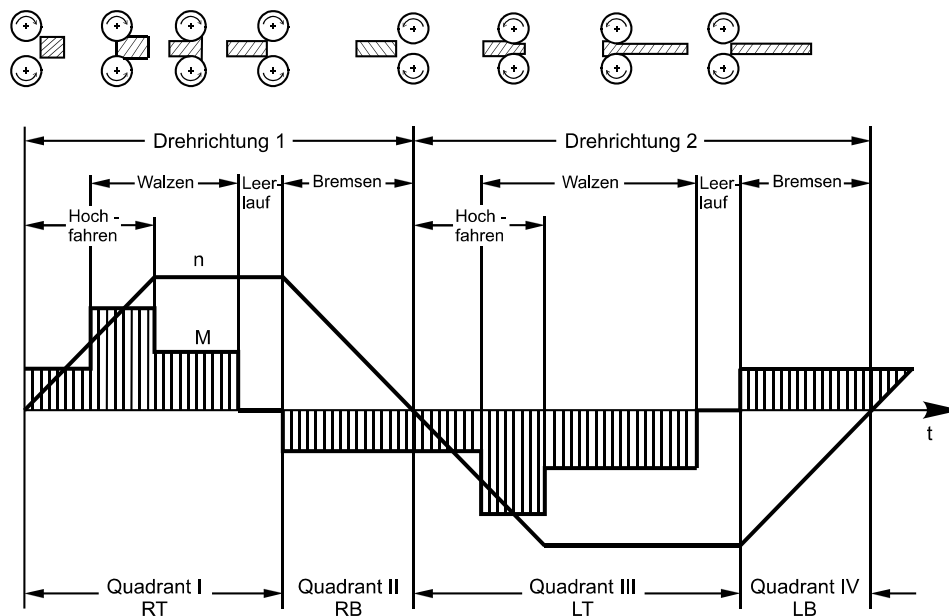


Bild 1.5: Beispiel eines Vierquadrantenantriebs (Walzstraße)
 Zeitverläufe von Drehzahl (n) und Drehmoment (M) im Reversierbetrieb

1.5 Grundgleichungen des elektrischen Antriebs

1.5.1 Leistungsbilanz

Die Leistungsbilanz eines elektrischen Antriebs zeigt Bild 1.6

$$P_{el} = P_{vst} + P_{vM} + P_L + \frac{dW_m}{dt} + \frac{dW_{kinM}}{dt} + \frac{dW_{kinL}}{dt} \quad (1.1)$$

- P_{el} zugeführte elektrische Leistung
 P_{vst} Verluste des Stellgliedes
 P_{vM} Verluste der Maschine
 P_L Leistung der Last

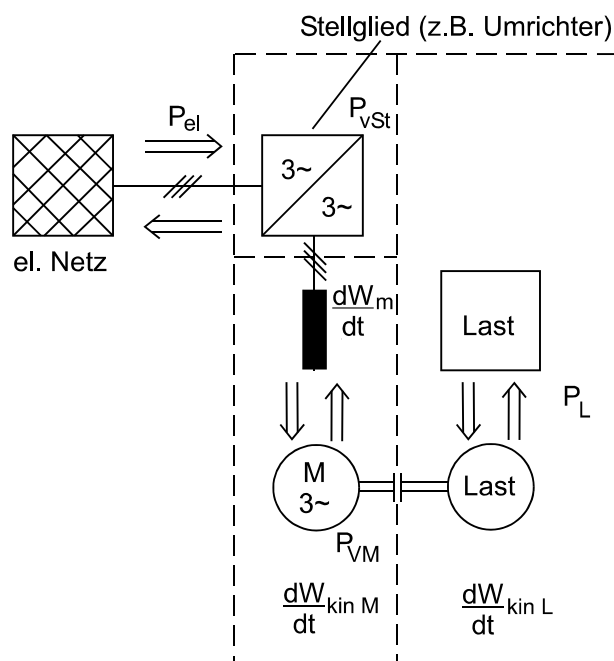


Bild 1.6: Leistungsfluß im elektrischen Antrieb

Unter der Leistung eines Elektromotors versteht man die an der Welle abgegebene mechanische Leistung.

$$P_{mech} = P_M = m_W \cdot \omega = 2\pi \cdot m_W \cdot n$$

1.5.2 Wirkungsgrad

Wirkungsgrad:

(mit $dW/dt = 0$, $P_v = P_{vM} + P_{vst}$)

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{\text{abgegebene Leistung an der Welle}}{\text{elektrische Leistung aus dem Netz}} \\ &= \frac{P_{mech}}{P_{el}} = \frac{P_{el} - P_v}{P_{el}} = 1 - \frac{P_v}{P_{el}}\end{aligned}\quad (1.3)$$

1.5.3 Momentenbilanz

Momentenbilanz (Bild 1.7):

$$\frac{P_{el} - P_{vst} - P_{vM} - \frac{dW_m}{dt}}{\omega} - \frac{P_L}{\omega} - \frac{P_B}{\omega} = 0 \quad (1.4)$$

Die Normierung auf das Nennmoment M_N ergibt:

$$m_M(t) - m_L(t) - m_B(t) = 0$$

(Kleinbuchstaben bezeichnen dimensionslose Größen)

Die Bewegungsgleichungen für die rotierende Masse $J = \frac{d\omega}{dt} / M_N$ lauten beim Treiben:

$$m_M(t) = m_L(t) + J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (1.6)$$

Bremsen:

$$J \cdot \left| \frac{d\omega}{dt} \right| = m_L(t) - m_M(t) \quad (1.7)$$

Die Anlaufzeit beträgt:

$$t_A = \int_{t=0}^{t=t_A} dt = \int_{\omega=0}^{\omega_N} \frac{J}{m_M - m_L} d\omega \tag{1.8}$$

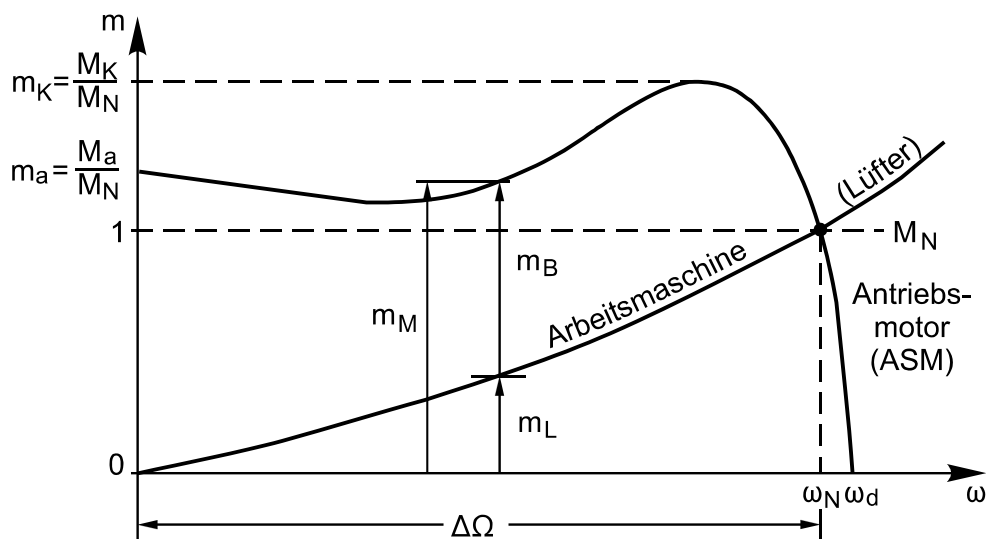


Bild 1.7 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie von Kraft- und Arbeitsmaschine

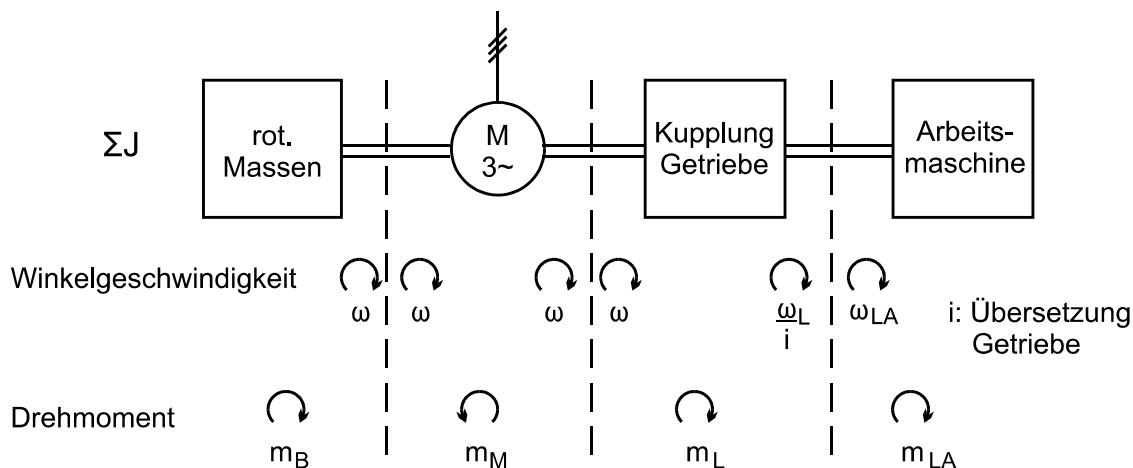


Bild 1.8 Momentenbilanz beim elektrischen Antrieb

1.6 Die Drehmomentkennlinie von Arbeitsmaschinen

1.6.1 Statische Kennlinien

Beispiele für die Drehmomentkennlinien von Arbeitsmaschinen:

- 1.) Drehzahlunabhängiges Lastmoment
 (Hebezeuge, Aufzüge, Winden, Krananlagen, Fließbänder, Rolltreppen, Werkzeugmaschinen, Mühlen)
- 2.) Linear ansteigendes Lastmoment
 (Kalander, Fahrtriebe, Wirbelstrombremse)
- 3.) Quadratisch ansteigendes Lastmoment
 (Lüfter, Propeller, Kreiselpumpe, Rührwerke)
- 4.) Hyperbolisch fallendes Lastmoment
 (Aufwickelmaschine, Haspel, Schleifmaschinen, Fahrzeuge)

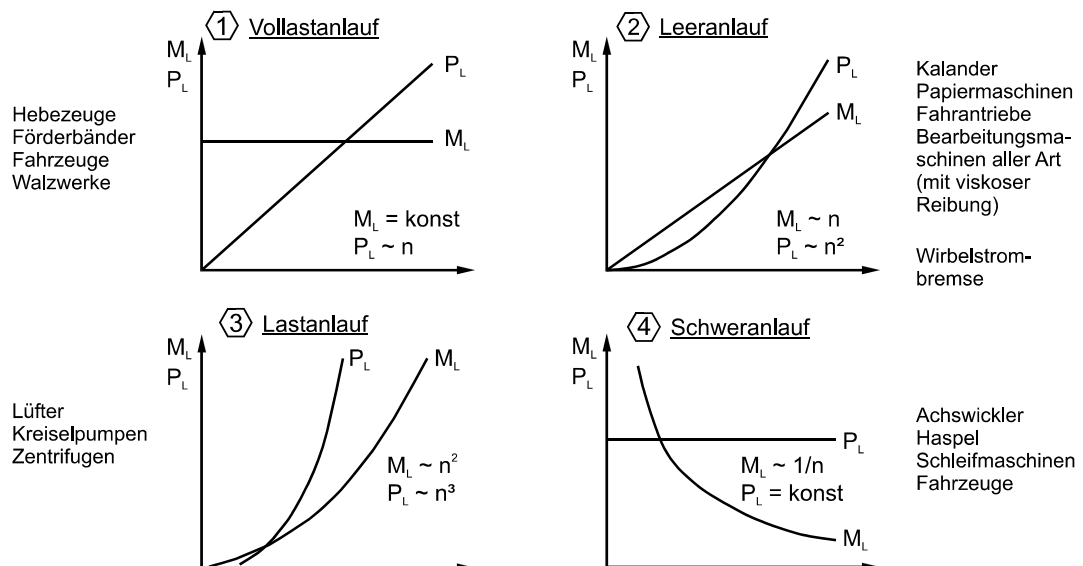


Bild 1.9: Typische Kennlinien von Arbeitsmaschinen

1.6.2 Stabilität des Arbeitspunktes

Nach Gleichung (1.6) ist im stationären Betrieb, bei $\dot{\omega} = 0$, das Motormoment gleich dem Lastmoment ($m_M - m_L = 0$).

Drehmomentgleichgewicht herrscht an den Schnittpunkten der Drehmomentkennlinien.

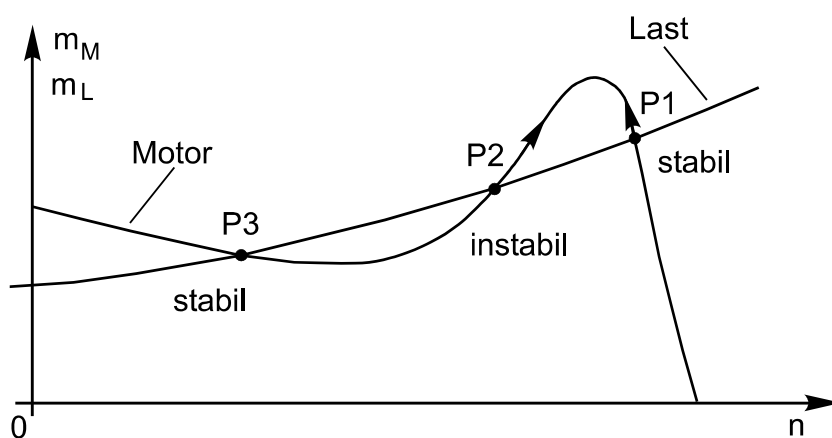


Bild 1.10 Stabile und instabile Betriebspunkte

Die Gleichgewichtslage (Ruhelage) der Drehmomente kann stabil oder instabil sein. Ob der betrachtete Schnittpunkt der Drehmomentkennlinien eine stabile Gleichgewichtslage darstellt, ersieht man aus dem Verhalten des Antriebs bei einer kleinen Auslenkung aus der Ruhelage. Kehrt er in diese Ruhelage zurück, so ist dieser Betriebspunkt stabil; sonst ist er instabil. Bedingung für einen stabilen Betriebspunkt:

$$\frac{dm_M}{dn} < \frac{dm_L}{dn} \quad (1.9)$$

1.6.3 Drehzahl-Drehmoment-Diagramm (Vierquadrantenbetrieb)

Die möglichen Betriebsarten eines Antriebes sind durch die vier Quadranten des Drehzahl-Drehmoment-Diagrammes gekennzeichnet.

Ordnet man dem Rechtslauf und Triebbetrieb positive Vorzeichen zu, so ergeben sich die in Bild 1.11 gezeigten Zuordnungen.

- Einquadrantenantrieb,
Betrieb im I. oder III. Quadranten,
Treiben mit gleichbleibender Dreh- und Momentenrichtung;
- Zweiquadrantenantrieb,
a- Betrieb im I. und II. oder III. und IV. Quadranten,
Treiben und Bremsen bei gleichbleibender Drehrichtung und wechselnder Momentenrichtung
b- Betrieb im I. und IV. oder II. und III. Quadranten,
Treiben und Bremsen bei wechselnder Drehrichtung und gleichbleibender Momentenrichtung;
- Vierquadrantenantrieb,
Betrieb in allen vier Quadranten,
Treiben und Bremsen bei wechselnder Dreh- und Momentenrichtung

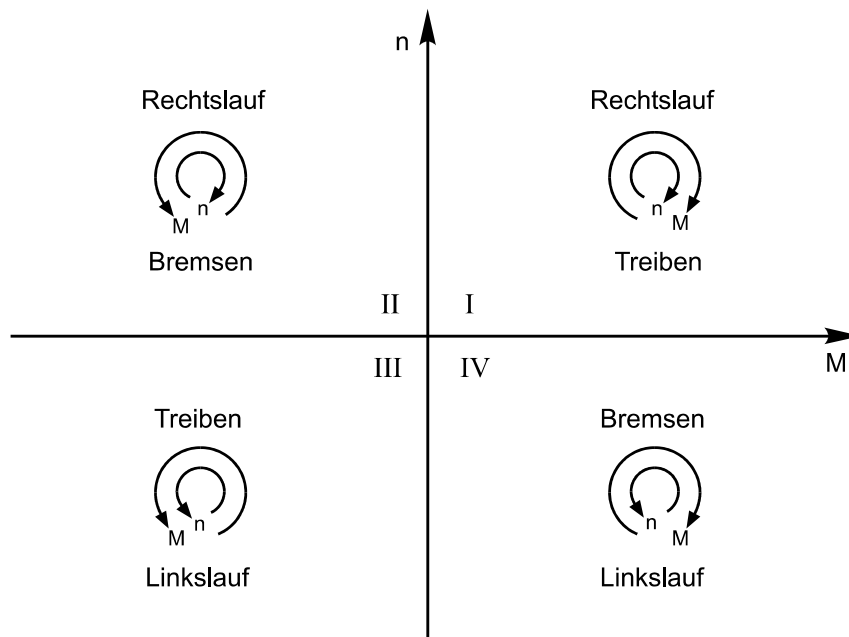


Bild 1.11 Drehzahl-Drehmoment-Diagramm

S8803 Elektrische Energietechnik

- Deckblatt und Inhaltverzeichnis
- Kapitel 1
- Kapitel 2
- Kapitel 3
- Kapitel 4 Seite 1 bis 10
- Kapitel 4 Seite 11 bis 46
- Kapitel 5 und Literatur