

Theoretische Grundlagen

Elektronikmotoren werden im Ständer mit einer ein- oder mehrsträngigen (bis viersträngigen) Wicklung ausgeführt. Das Läuferfeld wird durch auf den Läufer aufgeklebte Permanentmagnete (häufig Selten- Erden- Materialien mit hoher Remanenzinduktion) erregt. Um ein zeitlich konstantes, bei vorgegebenen Feld- und Strombelagsamplituden größtmögliches Drehmoment zu erhalten, müssen die Richtungen von Läuferfeld und Ständerdurchflutung unabhängig vom Läuferdrehwinkel einen konstanten Winkel von $\pi/2$ einschließen. Um diese Orientierung von Ständerstrombelag und Läuferfeld zu erreichen, werden die Ständerwicklungsstränge in Abhängigkeit von der Läuferstellung umgeschaltet. Die Umschaltung erfolgt - anders als bei der Gleichstrommaschine - ohne Kollektor allein mit einer Ansteuerelektronik („elektronischer“ Kommutator). Da bei Elektronikmotoren kein mechanischer Kommutator erforderlich ist und ihr Betriebsverhalten dem einer Gleichstrommaschine ähnelt, werden sie auch als bürstenlose Gleichstrommotoren oder brushless dc motor bezeichnet. Da die zur elektronischen Kommutierung erforderliche Läuferdrehwinkelerfassung und die Ansteuerelektronik aufwendig und daher ebenso wie die Permanentmagnete teuer sind, sind die Einsatzgebiete für Elektronikmotoren vor allem höherwertige Geräte, wie zum Beispiel Geräte der Datenverarbeitung oder im Industriebereich Vorschubantriebe für Werkzeugmaschinen sowie Antriebe mit hohen Anforderungen an die Dynamik, wie zum Beispiel Roboterarme.

Durch die bürstenlose Ausführung zeichnet sich der Elektronikmotor durch die Vorteile der Asynchronmaschine (Wartungsarmut, Robustheit) aus, ohne deren Nachteile (Läuferverluste, Blindleistungsbedarf) aufzuweisen.

Wirkungsweise

Das Wirkprinzip entspricht dem einer Gleichstrommaschine. Beim Gleichstrommotor bleibt die räumliche Orientierung von Ständerfeld (= Erregerfeld) und Läuferstrombelag (= Ankerstrombelag) als Folge der Kommutierung zeitlich unverändert. Beim Elektronikmotor ist der Läufer mit Permanenterregung ausgeführt, so daß sich die Richtung des Läuferfeldes mit der Drehzahl ändert. Der „elektronische Kommutator“ muß unabhängig vom Läuferdrehwinkel eine konstante Verschiebung von $\pi/2$ ($\pi/2$ = „elektrischer“ Winkel, räumlicher Winkel = $\pi/2p$, allgemein: $\varphi_{el} = p \cdot \varphi_{mech}$) zwischen dem Läuferfeld und der Ständerdurchflutung gewährleisten (Bild 4.1).

Da die Umschaltung der Ständerspulen in Abhängigkeit von der Läuferstellung erfolgen muß, ist ein Läuferlagegeber erforderlich (beim untersuchten Versuchsmotor: Magnetgabelschranken), der die Läuferlage erfaßt und die Steuersignale für die Schalter (Transistoren) der Steuerelektronik liefert.

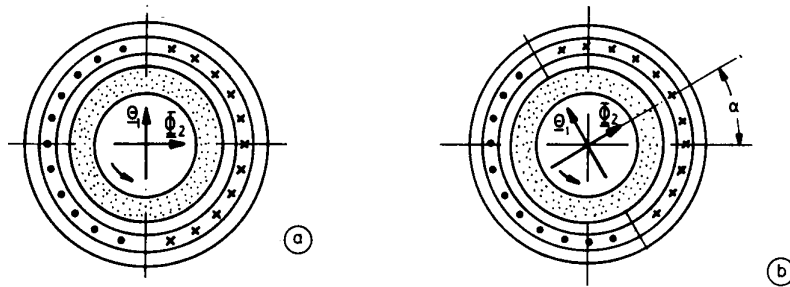


Bild 4.1 Räumliche Lage von Läuferflußzeiger Φ_2 und Ständerdurchflutungszeiger θ_1 ($2p = 2$, Läuferdrehwinkel: a) $\alpha = 0^\circ$, b) $\alpha = p \cdot n \cdot t_1 = 30^\circ$)
(Aus Stölting, H.- D., Beisse, A.: Elektrische Kleinmaschinen. Teubner Verlag, Stuttgart, 1987)

Bild 4.2 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Magnetgabelschranke für zwei verschiedene Positionen der am Läufer befestigten Weicheisenblende:

links: Weicheisenblende außerhalb der Magnetgabel, Spannung der Hallsonde $U_H > 0$

rechts: Weicheisenblende in der Magnetgabel (magnetischer Kurzschluß), Spannung der Hallsonde $U_H = 0$

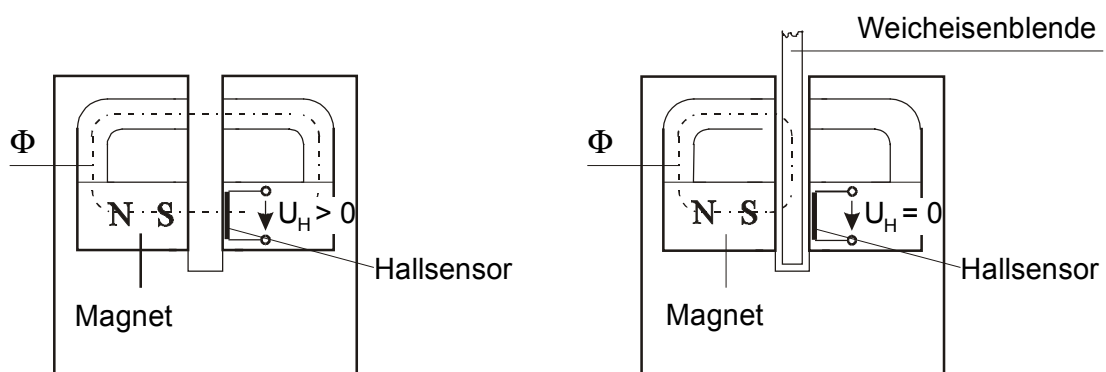
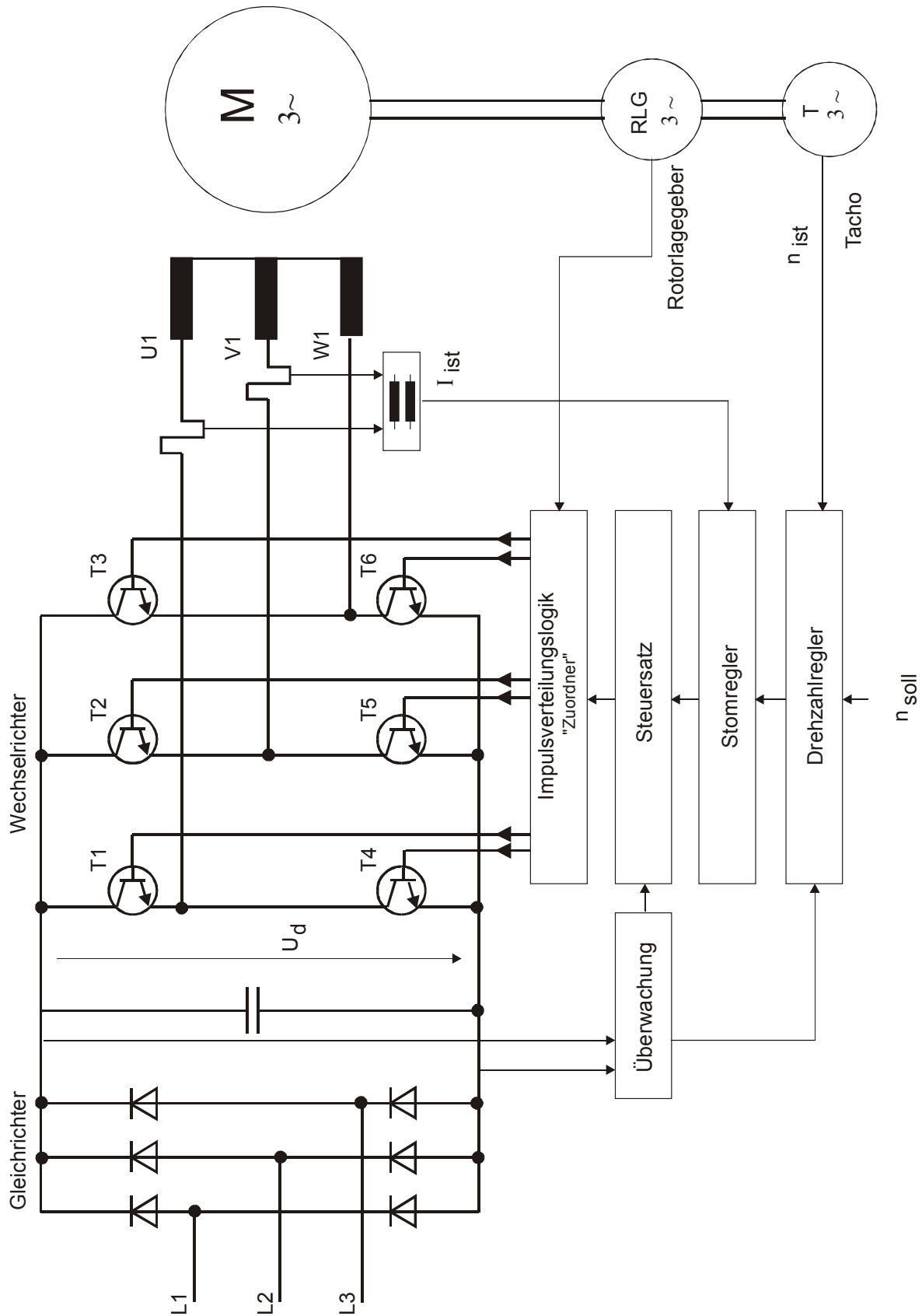


Bild 4.2 Prinzipieller Aufbau einer Magnetgabelschranke zur Drehwinkelerfassung
links: Weicheisenblende außerhalb der Magnetgabel
rechts: Weicheisenblende in der Magnetgabel

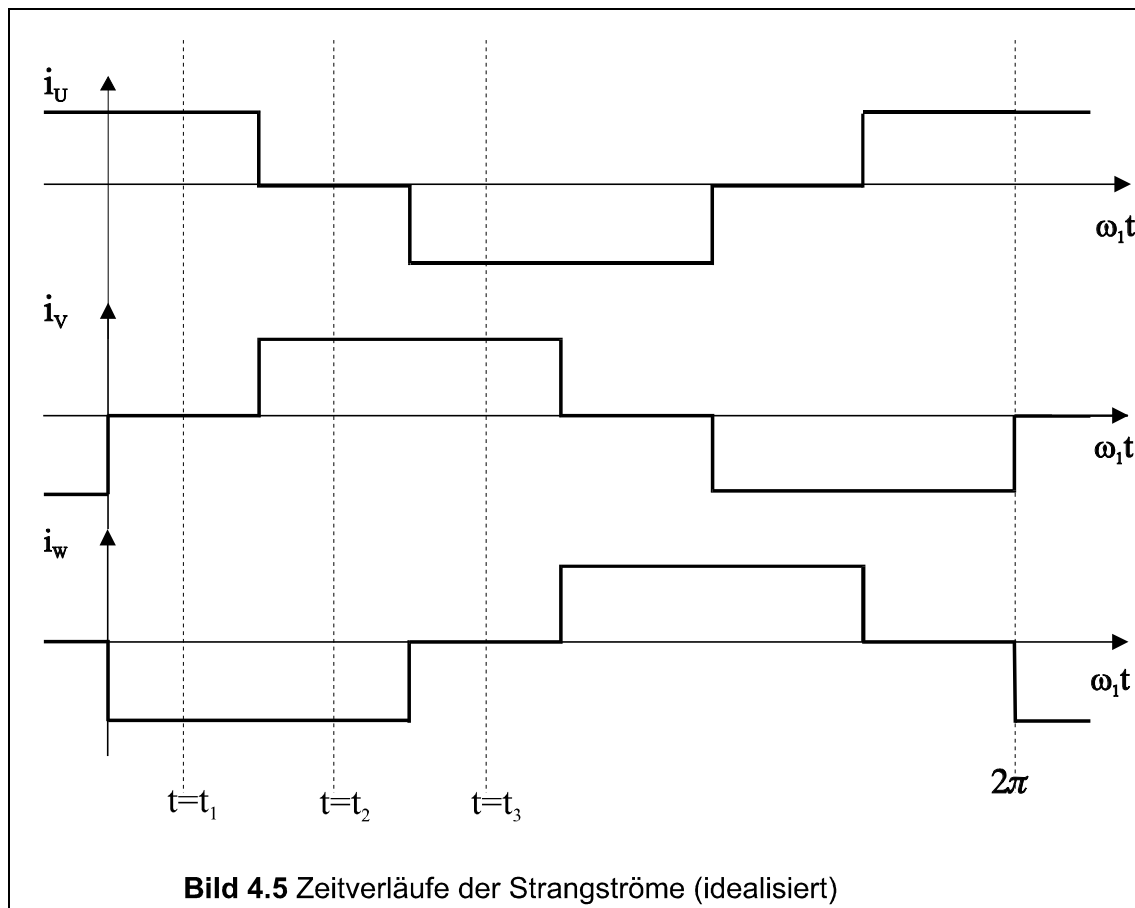
Die Spannungen der Hallsonden werden für die Bildung der Steuersignale für den Leistungsteil verwendet.

Der Versuchsmotor ist mit einer sechspoligen, dreisträngigen Ständerwicklung ausgeführt, wobei der Versatz der Ständerwicklungsstränge $2\pi/3p = 2\pi/6$ beträgt. Zur Bildung der Steuersignale für die drei Ständerstränge sind drei Magnetgabelschranken erforderlich. Bild 4.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Steuerelektronik.

**Bild 4.3** Prinzipschaltbild der Steuerelektronik

Über einen B6- Gleichrichter wird der Zwischenkreis gespeist. Die Transistoren des Wechselrichters erhalten ihre Steuersignale durch den Läuferlagegeber. In Bild 4.4 (Seite 33) ist für drei verschiedene diskrete Läuferstellungen (Läuferflußlagen 90° , 150° , 210°) das Läuferfeld und die zugehörige Ständerwicklungsdurchflutung (Zonenplan und Strombelag) über der Ständerkoordinate x_1 dargestellt. Die Durchflutungen sind so eingezeichnet, daß sich der geforderte Winkel von $\pi/2$ zwischen Läuferflußzeiger und Ständerdurchflutungszeiger ergibt. In der rechten Bildhälfte sind die Strompfade im Prinzipbild der Wechselrichterschaltung durch dicke Linien markiert.

Werden die zu den einzelnen Läuferpositionen zugehörigen Ständerstrangströme über der Zeit aufgetragen, so ergeben sich die Zeitfunktionen nach Bild 4.5. Die drei diskreten Zeitpunkte für die Darstellung der räumlichen Feld- und Durchflutungsverteilung aus Bild 4.4 sind gekennzeichnet. Neben der gezeigten Ansteuerung mit blockförmigen Strömen ist die Speisung mit sinusförmigen Strömen üblich. Hierbei ist jedoch der Schaltungsaufwand höher.



Induzierte Spannung und Drehmoment- Drehzahl- Kennlinie

Der räumliche Feldverlauf des von den Permanentmagneten erregten Läuferfeldes ist nicht sinusförmig (siehe Bild 4.4), kann jedoch durch eine Fourierreihe, bestehend aus Grundwelle und Oberwellen, beschrieben werden. Die Maximum der Grundwelle des in

Bild 4.4 gezeichneten Läuferfeldes läuft mit dem Läufer im Luftspalt um. Die Grundwelle induziert in den Ständerwicklungssträngen Spannungen der Frequenz

$$(4.1) \quad f_1 = p \cdot n.$$

Im ständerfesten Koordinatensystem lautet daher die analytische Beschreibung des Läufergrundfeldes für $t_1 = 0$

$$(4.2) \quad b_{p2}(x_1, t) = B_{p2} \cdot \sin(px_1 - \omega_1 t) \quad \text{mit} \quad \omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi n_1 p,$$

B_{p2} : Grundwelle des Läuferfeldes.

Der Fluß pro Pol ist proportional zur Polfläche (Geometrie) und zur Läufergrundfeldamplitude.

$$(4.3) \quad \Phi = k_{\text{geo}} \cdot B_{p2}$$

Der Effektivwert der von dem Läufergrundfeld in einem Ständerstrang induzierten Spannung ergibt sich aus dem Induktionsgesetz zu

$$(4.4) \quad U_i = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_1 w_1 \xi_1 \Phi = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} p n w_1 \xi_1 \Phi$$

$$= K \cdot \Phi \cdot n$$

mit der Strangwindungszahl w_1 und dem Grundfeldwicklungsfaktor ξ_1 . Die Gleichung (4.4) für die induzierte Spannung entspricht der einer Gleichstrommaschine (vergl. Gl. (3.2)).

Mit dem Zusammenhang zwischen Ständerfrequenz und Drehzahl nach Gl. (4.1) lautet die Konstante K

$$(4.5) \quad K = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} p w_1 \xi_1.$$

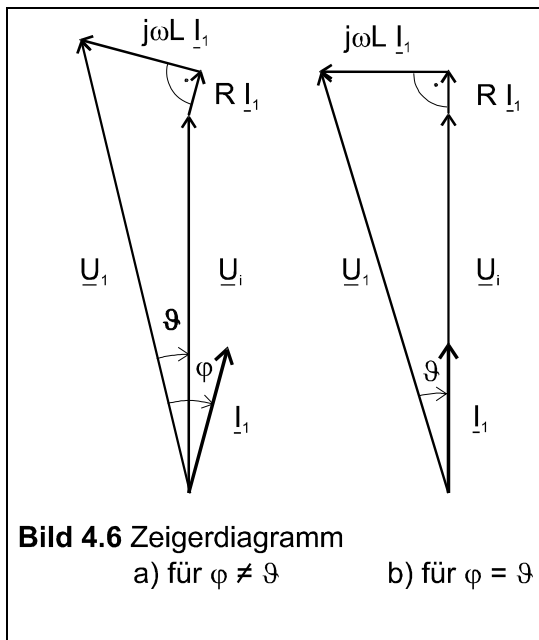
Da der Fluß nach Gl. (4.3) nur von den geometrischen Abmessungen und der Amplitude des Läufergrundfeldes abhängig ist, ist er bei permanenterregten Motoren unabhängig von den Betriebsdaten konstant. Daher folgt aus Gl. (4.4), daß die induzierte Spannung proportional zur Drehzahl sein muß. Diese Änderung der Grundschiwingung der Ausgangsspannung des Wechselrichters wird durch Pulsbreitenmodulation erreicht (prinzipielle Darstellung des Ausgangssignals siehe Versuch 7). Mit der induzierten Spannung nach Gl. (4.4), dem Ständerwicklungswiderstand R , der Induktivität eines Ständerstranges L sowie dem Ständerstrangstrom I_1 lautet die Spannungsgleichung für einen Ständerstrang

$$(4.6) \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_i + R \cdot \underline{I}_1 + j\omega L \cdot \underline{I}_1.$$

Der Spannungsgleichung (4.6) entspricht das in Bild 4.6 gezeigte Zeigerdiagramm. Der Winkel zwischen der induzierten Spannung \underline{U}_i und der Klemmenspannung \underline{U}_1 (Polradwinkel) ist mit ϑ bezeichnet (Bild 4.6a: Phasenverschiebung zwischen \underline{U}_i und \underline{I}_1 : $\varphi \neq \vartheta$, Bild 4.6b: Phasenverschiebung zwischen \underline{U}_1 und \underline{I}_1 : $\varphi = \vartheta$, \underline{I}_1 in Phase zu \underline{U}_i). Das Zeigerdiagramm ähnelt dem eines belasteten Transformators: die Spannungen \underline{U}_1 und \underline{U}_i unterscheiden sich um ein rechtwinkliges Dreieck mit den Katheten $R I_1$ und $j\omega L I_1$.

Aus der Spannungsgleichung (4.6) folgt die Wirkleistungsgleichung (4.7),

$$(4.7) \quad m_1 U_1 I_1 \cos \varphi = m_1 I_1^2 R + m_1 U_i I_1 \cos(\varphi - \vartheta).$$



Die aufgenommene Leistung setzt sich zusammen aus den Stromwärmeverlusten

$$P_{Cu} = m_1 R I_1^2$$

und der mechanischen Leistung

$$P = m_1 U_i I_1 \cos(\varphi - \vartheta).$$

Die Eisen- und Reibungsverluste wurden hierbei vernachlässigt. Aus der mechanischen Leistung kann das Drehmoment berechnet werden.

$$(4.8) \quad M = \frac{P}{2\pi n_1} = \frac{m_1 U_i I_1 \cos(\varphi - \vartheta)}{2\pi n_1}$$

Bei gegebenem Strom I_1 ist das abgegebene Drehmoment maximal, wenn I_1 in Phase zu \underline{U}_i ist ($\varphi = \vartheta$).

Wie bei der Gleichstrommaschine ist das Drehmoment bei konstantem Winkel zwischen Läuferflußzeiger und Ständerdurchflutungszeiger proportional zu den Amplituden von Läuferfeld (B_{p2}) und Ständerstrombelag (\hat{A}_1),

$$M \sim B_{p2} \cdot \hat{A}_1,$$

und kann daher wegen $B_{p2} \sim \Phi$, $\hat{A}_1 \sim I_1$ in der Form

$$M = k_2 \cdot \Phi \cdot I_1$$

ausgedrückt werden. Der Proportionalitätsfaktor zwischen Drehmoment und Strom,

$$(4.9) \quad m_s = M / I_1 = k_2 \cdot \Phi$$

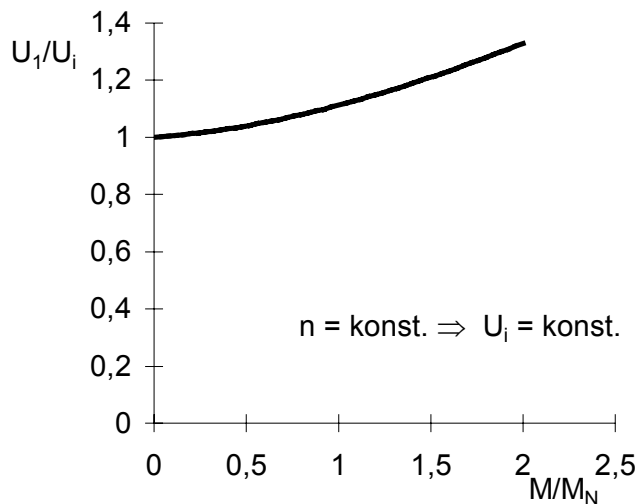
wird als spezifisches Moment bezeichnet.

Bei Betrieb des Elektronikmotors soll der speisende Umrichter (Servoregler) lastabhängig die Spannung so verstellen, daß bei konstanter Drehzahl der Strom I_1 stets in Phase zur induzierten Spannung \underline{U}_i ist. Bei konstanter Drehzahl ist die induzierte Spannung ebenfalls konstant (Gl. 4.4). Für $\varphi = \vartheta$ ergibt sich aus Gl. (4.6)

$$U_1 = \sqrt{(U_i + R \cdot I_1)^2 + (\omega L \cdot I_1)^2} = \sqrt{(U_i + R \cdot M/m_s)^2 + (\omega L \cdot M/m_s)^2}$$

Bild 4.7 zeigt für den geregelten Betrieb die Klemmenspannung als Funktion des Lastmoments in bezogener Darstellung.

Ohne die lastabhängige Spannungsanhebung käme es bei konstanter Drehzahl zu einer mit dem Strom zunehmenden Phasenverschiebung zwischen I_1 und \underline{U}_1 ($\varphi \neq \vartheta$).

**Bild 4.7**

Klemmenspannung (geregelter Betrieb, $n = \text{konst.}$) als Funktion des Lastmoments (bezogene Darstellung)

Versuchsdurchführung

1. Messen Sie die Widerstände der drei Wicklungsstränge.

2. Leerlaufreihe

Messen Sie bei offenen Ständerklemmen (Motor angetrieben) die in einem Strang induzierte Spannung (Grundschiwingung) als Funktion der Drehzahl.

Oszilloskopieren Sie den Zeitverlauf der induzierten Spannung für eine Drehzahl.

3. Kurzschlußversuch

Messen Sie in festgebremsten Zustand ($n = 0$, Welle mit einer Klemmvorrichtung blockiert) die Strangströme als Funktion des Anlaufmoments.

4. Belastungsversuch

Messen Sie bei konstanter Drehzahl (geregelter Betrieb)

- die Spannung U_1 (Grundschiwingung),
- den Strom I_1 (Grundschiwingung),
- die Eingangsleistung P_{zu} des Umrichters,
- die aufgenommene elektrische Leistung P_{el} des Motors

als Funktion des Lastmoments M . Oszilloskopieren Sie für einen Betriebspunkt die Spannungen und Ströme.

Hinweis: Der Belastungsversuch kann auch mit der Programmerstellung (5.) kombiniert werden.

5. Programmerstellung

Der Versuchsstand ist mit einem Rechner zur Programmierung von Lastzyklen ausgerüstet. Erstellen Sie nach Anleitung des Versuchsbetreuers ein Programm zum automatisierten Ablauf eines Lastspiels.

Versuchsauswertung

1. Berechnen Sie den mittleren Strangwiderstand.

2. Berechnen Sie den Fluß Φ pro Pol nach Gl. (4.4)

Maschinendaten:	Strangwindungszahl	$w_1 = 57$
	Grundfeldwicklungsfaktor	$\xi_1 = 0,966$
	Polpaarzahl	$p = 3$

Stellen Sie die induzierte Spannung und den berechneten Fluß pro Pol als Funktion der Drehzahl grafisch dar.

3. Tragen Sie das gemessene Drehmoment M sowie das spezifische Drehmoment m_s über dem Strom auf.

4. Stellen Sie in Diagrammform als Funktion des Lastmoments dar:

- die Spannung U_1 (Grundschiwingung),
- den Strom I_1 (Grundschiwingung),
- die Drehzahl n ,
- die Eingangsleistung P_{zu} des Umrichters,
- die aufgenommene elektrische Leistung P_{el} des Motors,
- die mechanisch abgegebene Leistung P_{mech} ,
- die Verluste $P_V = P_{el} - P_{mech}$,
- den Motorwirkungsgrad $\eta = P_{mech} / P_{el}$.

Diskutieren Sie die Kennlinien!

Zeichnen Sie für einen Betriebspunkt ($M \approx M_N$) das Zeigerdiagramm und bestimmen Sie hieraus die Induktivität des Motors!

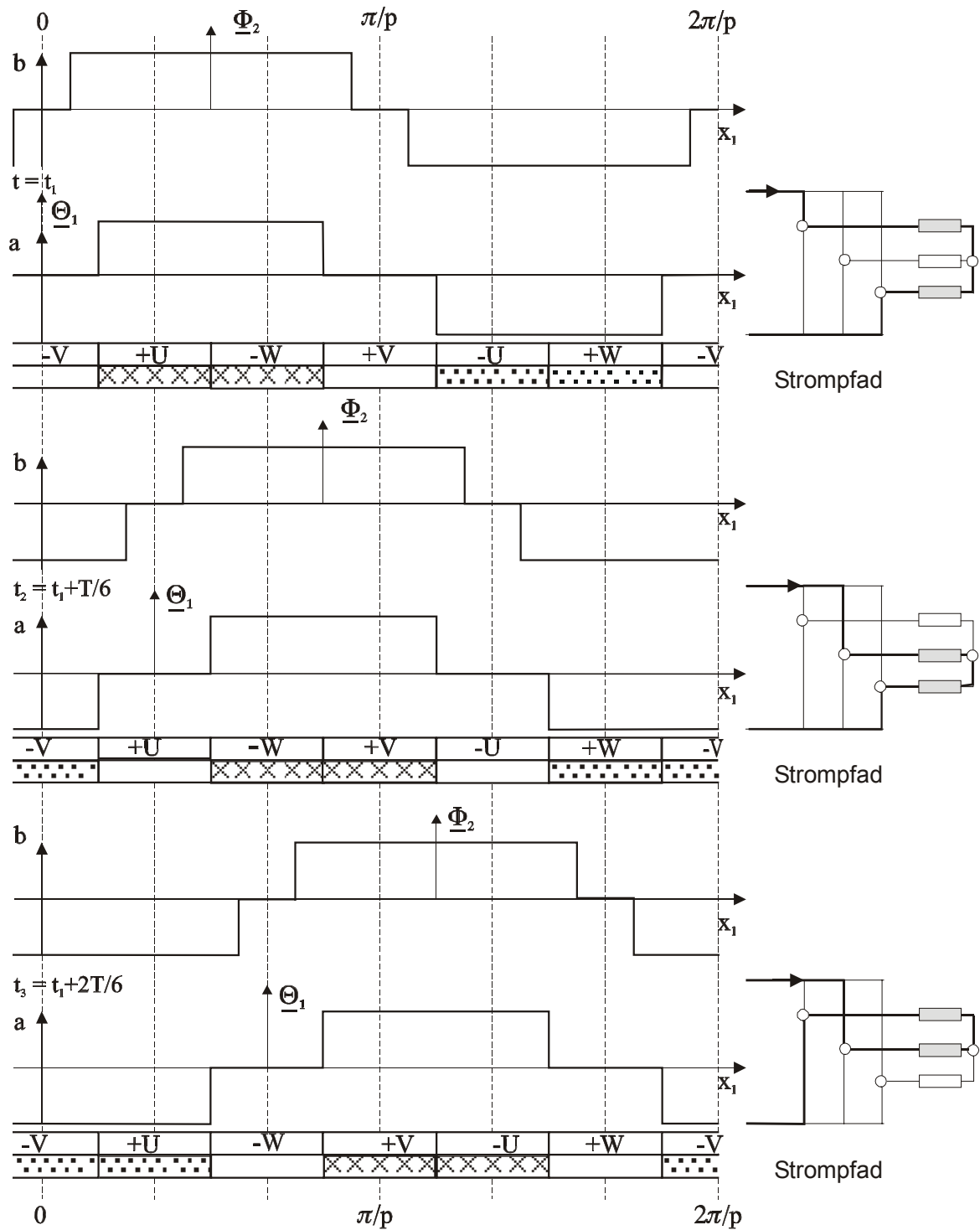


Bild 4.4 Läuferflusslage und Ständerdurchflutung zu drei verschiedenen Zeitpunkten

(t_1 , $t_2 = t_1 + T/6$, $t_3 = t_1 + 2 \cdot T/6$, Periodendauer $T = 1/f_1$)