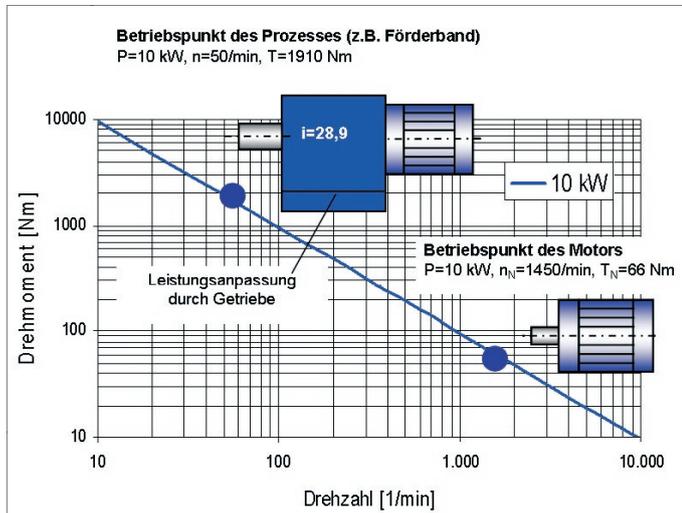


Direktantriebe passend ausgewählt

Elektromagnetische Direktantriebe im Vergleich



1: Leistungsanpassung durch ein Getriebe

Detmar Zimmer, Joachim Böcker, Alexander Schmidt, Bernd Schulz

Direktantriebe sind in den letzten Jahren vermehrt ins Blickfeld des öffentlichen Interesses gerückt. Bei den rotatorischen Direktantrieben sind es vor allem die Torqueantriebe, die in ihrer Verbreitung zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die translatorischen Linearantriebe sind dagegen als Positionierantriebe im Bereich der Werkzeugmaschinen zu finden. Im Folgenden werden der Aufbau sowie die spezifischen Vor- und Nachteile der rotatorischen und translatorischen Direktantriebe beschrieben. Abschließend werden dann Direktantriebe und Motor-Getriebe-Kombinationen gegenübergestellt.

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer ist Leiter des Lehrstuhls für Konstruktions und Antriebs-technik der Universität Paderborn. Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker ist Leiter des Lehrstuhls für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe der Universität Paderborn. Dipl.-Ing. Alexander Schmidt ist seit 2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik. Dipl.-Ing. Bernd Schulz ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Leistungselektronik und Antriebstechnik.

Aufgabe des Maschinenbaus

Eine Kernaufgabe des Maschinenbaus ist es, die für die Bewältigung von Prozessen wie Fördern, Mischen oder Trennen erforderlichen Kräfte, Momente und Bewegungsformen durch geeignete Antriebe bereitzustellen. Die Antriebsauslegung erfordert dabei eine Anpassung des durch Nenn-

Eine Kernaufgabe des Maschinenbaus ist es, die geeigneten Antriebe bereitzustellen

drehzahl und Nennmoment bzw. Nennkraft und Nenngeschwindigkeit definierten Betriebspunkt der Antriebsmaschine an den Betriebspunkt des Lastprozesses. Bei gegebener Leistung unterscheiden sich diese Betriebspunkte in vielen Fällen hinsichtlich der Beträge von Drehmoment und Drehzahl. Die Anpassung an den Prozess erfolgt dann in der Regel durch ein Getriebe (Bild 1).

Das Drehmoment und die Drehzahl des Motors werden entsprechend angepasst (Erläuterung der Formelzeichen in Tabelle 1):

$$T_2 = T_1 \cdot i \quad (1)$$

$$n_2 = \frac{n_1}{i} \quad (2)$$

Die Leistungsanpassung kann darüber hinaus auch bedeuten, dass die Rotationsbe-

wegung in eine Translationsbewegung gewandelt werden muss. Dies kann z. B. durch eine Kugelumlaufspindel geschehen.

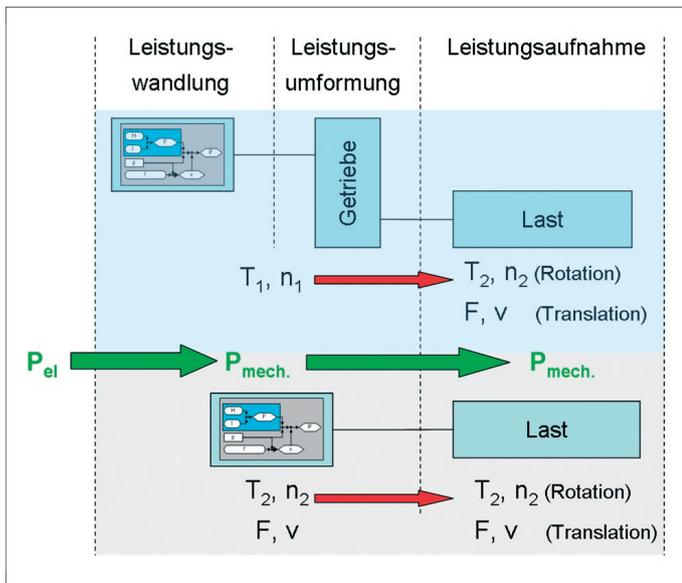
$$P_{\text{mech}} = T \cdot \omega \quad (3)$$

$$P_{\text{mech}} = F \cdot v \quad (4)$$

Wenn der Betriebspunkt des Prozesses dabei mit dem der Antriebsmaschine zusammenfällt, kann auf ein Getriebe verzichtet werden – der Motor wird zum Direktantrieb! Dies bedeutet, dass der Motor das geforderte Drehmoment und die geforderte Drehzahl bzw. die geforderte Kraft und die geforderte Geschwindigkeit direkt bereitstellen muss (Bild 2). Bei Anwendungen, die durch relativ hohe Drehzahl und kleines

Formelzeichen	Erläuterung
T_1, T_2	Eingangs-, Ausgangsmoment
i	Übersetzung
n_2	Ausgangsdrehzahl
n_1	Eingangsdrehzahl
P_{mech}	Mechanische Leistung
T, T_m	Drehmoment, mechanisches Drehmoment
ω	Winkelgeschwindigkeit
F, F_s	Kraft, Schubkraft
v, v_m	Geschwindigkeit, mechanische Geschwindigkeit
ω_m	mechanische Drehfrequenz
ω_{RS}	elektrische Drehfrequenz
τ_p	Polteilung
	Polpaarzahl
p	
l_p	Länge eines Pols
Ψ_p	Polradfluss
I_d	kraftbildender Statorstrom
I	Wicklungsstrom
N_L	Zahl der Läuferpole
k_p	Korrekturfaktor
L_d	Induktivität in Magnetisierungsrichtung
L_q	Induktivität quer zur Magnetisierungsrichtung
ω_s, ω_L	Kreisfrequenz des Statorstroms bzw. des Läuferstroms
L_m	Koppelinduktivität zwischen Stator und Läufer
I_{sd}, I_{Ld}	Stator bzw. Läuferstrom

Tabelle 1: Erläuterung der verwendeten Formelzeichen



2: Strukturvergleich eines Direktantriebs mit einem Antrieb mit Leistungsumformung

Drehmoment definiert sind, kommen entsprechend schnell laufende Motoren mit geringem Bauvolumen, also kostengünstige Maschinen, zur Anwendung.

Prozesse, die bei vergleichbarer Leistung ein hohes Drehmoment und eine niedrige Drehzahl erfordern, werden in der Regel durch schnell laufende Motoren angetrieben, die mit einem direkt angebaute Getriebe zu so genannten Getriebemotoren kombiniert werden. Eine Alternative zum Getriebemotor stellen rotatorische Direktantriebe dar, die so genannten Torquemotoren. Dem entspricht bei der Translationsbewegung der Linearmotor. Die Linearmotoren liefern eine direkt an den Arbeitspunkt angepasste, translatorische Leistung, so dass auch hier auf die Leistungsumformung durch mechanische Komponenten, wie. z. B der Kugelumlaufspindel, verzichtet werden kann. Als Beispiel seien Positionierantriebe für „Pick-and-Place“-Anwendungen genannt.

Elektromagnetische Antriebsprinzipien

Elektromagnetische Antriebsmaschinen lassen sich nach den in (Bild 3) dargestellten Kriterien einordnen. Für die Gruppe der bewegten Maschinen, also der Motoren und Generatoren, erfolgt häufig eine Unterscheidung aufgrund des Verhaltens des magnetischen Feldes. Die Maschinen mit bewegtem magnetischem Feld werden nach ihrem Arbeitsprinzip in synchron und asynchron unterteilt. Mit Ausnahme der Reluktanzmaschinen arbeiten alle elektrischen Motoren nach dem Lorentzprinzip. Danach wird auf einen Strom durchflossenen Leiter, der sich in einem Magnetfeld befindet, eine Kraft ausgeübt. Es spielt zunächst keine Rolle, ob der Strom induziert oder eingespeist wird. Zur Erzeugung des Magnetfeldes nutzt man Permanent- oder Elektroma-

gnete, die wiederum durch Bestromung einer Spule entstehen. Beispielhaft dafür sind die Gleichstrommaschinen. Beim Gleichstrom-Reihenschlussmotor wird die das Magnetfeld erzeugende Erregerspule in Reihe mit dem Anker geschaltet, so dass der Ankerstrom dem Erregerstrom entspricht. Beim Gleichstrom-Nebenschlussmotor ist die Erregerspule parallel zur Ankerwicklung geschaltet. An beiden Wicklungen liegt also die gleiche Spannung an. Beim fremderregten Gleichstrommotor erhält die Erregerspule eine eigene Spannungsversorgung, so dass sie völlig unabhängig vom Ankerstromkreis bestromt werden kann.

Wie bereits erwähnt lassen sich Motoren mit bewegtem Magnetfeld weiterhin durch synchrone oder asynchrone Betriebsweise unterscheiden. Zu den Motoren, bei denen sich ein Magnetfeld mit einem mechanischen Läufer synchron bewegt, gehören die permanent erregten Synchronmaschinen, die bürstenlosen Gleichstrommaschinen sowie die Reluktanzmaschinen.

Asynchronmaschinen sind dadurch gekennzeichnet, das Drehmoment nur aufgebaut wird, wenn das rotierende Magnetfeld und der Läufer unterschiedliche Winkelgeschwindigkeiten aufweisen. Hintergrund ist, dass dann im Läufer ein Strom induziert wird, der wiederum einen Magnetfeld- und

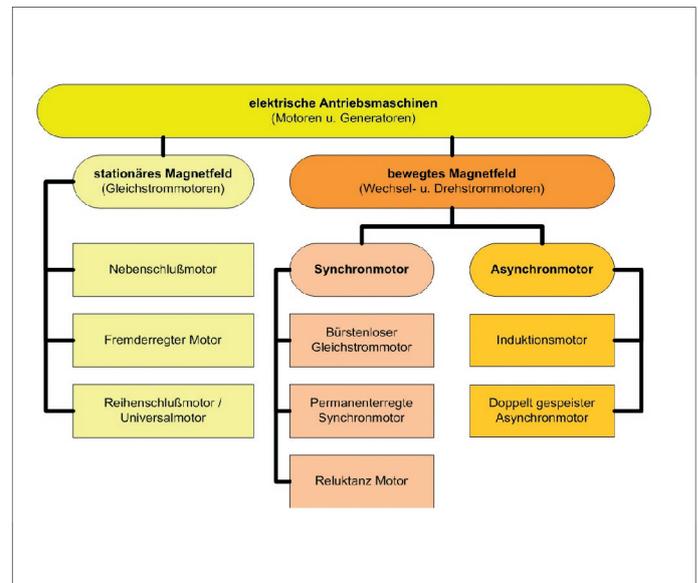
damit in Verbindung mit dem umlaufenden Feld einen Drehmomentaufbau zur Folge hat. Ihr Verhalten wird maßgeblich durch den Schlupf s bestimmt:

$$s = \frac{\omega_{RS} - \omega_M}{\omega_{RS}} \quad (5)$$

Das Wirkprinzip des Reluktanzmotors beruht auf der Ausrichtung eines polartig gestalteten Eisenkerns im umlaufenden Magnetfeld. Die hier genannten Merkmale beziehen sich auf unregelmotoren; Effekte, die sich aus elektronischen Leistungsstellgliedern bzw. der Spannungsversorgung ergeben, sind nicht berücksichtigt. Sobald eine Motorregelung vorhanden ist, prägt diese das Verhalten des Antriebs maßgeblich. Reine Motorkennlinien sind also nur dann aussagekräftig, wenn keine Leistungsstellglieder vorgeschaltet werden.

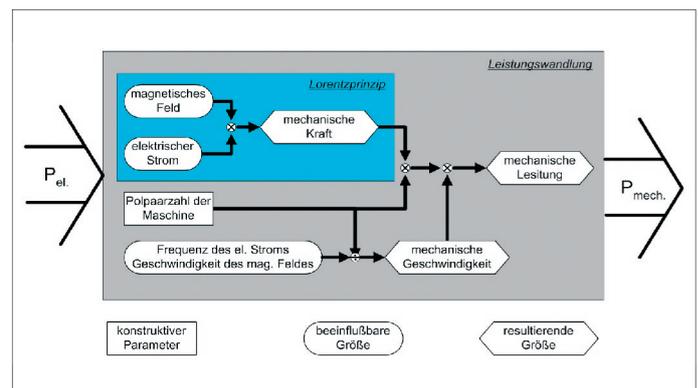
Torquemotoren

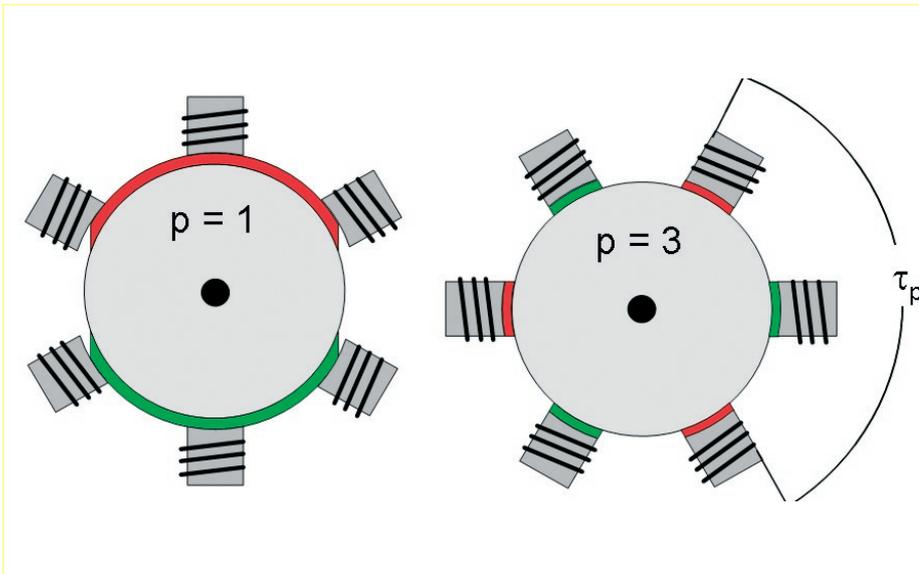
Rotatorische Direktantriebsmotoren werden als Torquemotor bezeichnet, wenn sie bei relativ kleiner Drehfrequenz ein sehr hohes Drehmoment bereitstellen können. Grundlage hierfür ist die Erhöhung der Polpaarzahl des Motors (Bild 4). Gleichung 6 zeigt den Einfluss der Polpaarzahl p auf das



3: Einteilung elektromagnetischen Maschinen

4: Prinzip der Leistungswandlung in einem Elektromotor





5: Schematische Darstellung eines rotatorischen permanent erregten Synchronmotors mit den Polpaarzahlen $p = 1$ (links) und $p = 3$ (rechts)

erzeugte Drehmoment; in Gleichung 7 ist der Zusammenhang zwischen Polpaarzahl und Winkelgeschwindigkeit der Welle am Beispiel einer permanent erregten Synchronmaschine dargestellt. Gleichung 8 macht deutlich, dass die Polpaarzahl keinen Einfluss auf die mechanisch abgegebene Leistung hat.

$$T_M = p \cdot \frac{3}{2} \cdot \Psi_p \cdot I_d \quad (6)$$

$$\omega_M = \frac{\omega_{RS}}{p} \quad (7)$$

$$P_{Mech.} = \omega_M \cdot T_M = \frac{3}{2} \cdot \omega_{RS} \cdot \Psi_p \cdot I_d \quad (8)$$

In Bild 5 sind die schematischen Darstellungen einer permanent erregten Synchronmaschine mit den Polpaarzahlen 1 und 3 gegenübergestellt. Dabei sind typischer-

weise gegenüberliegende Pole so in Reihe geschaltet, dass sie in die gleiche Richtung magnetisieren. Wenn die Anzahl der Pole erhöht wird, lässt sich dies im für Synchronmaschinen unüblichen, jedoch sehr anschaulichen Fall von konzentrierten Wicklungen und einem festen Luftspaltumfang nur solange realisieren, bis benachbarte Pole sich berühren. Soll dies verhindert werden, so muss die Polteilung τ_p verkleinert bzw. der Durchmesser vergrößert werden. Diese Möglichkeiten sind auch auf den weitaus üblicheren Fall der Synchronmaschinen mit verteilten Wicklungen übertragbar. Jedoch führt eine kleinere Polteilung zu einer räumlichen Konzentration der Kupferverluste und damit zu einer höheren thermischen Belastung. Der maximal zulässige Strom muss reduziert werden, wodurch sich nur ein geringeres Drehmoment realisieren lässt. Soll jedoch die thermische Be-

lastbarkeit beibehalten werden, muss entweder eine bessere Kühlung der Wicklung erfolgen oder der Umfang der Maschine vergrößert werden. Hochpolige Torquemotoren weisen daher einen relativ großen Durchmesser auf. Dadurch lassen sie sich auch als Hohlwellenmotor ausführen.

Torquemotoren werden meist als Synchronmotoren ausgeführt. Die Regelungskonzepte für solche Antriebe sind dieselben wie bei schnell laufenden Permanentmagnet erregten Synchronmaschinen. Dies sind zumeist polrad- bzw. feldorientierte Regelungskonzepte. Sie gehören zur Gruppe der Vektorregelverfahren, die das Drehfeld im Stator optimal aufbauen und dann über die Amplitude des Stromes das gewünschte Drehmoment einstellen.

Linearmotoren

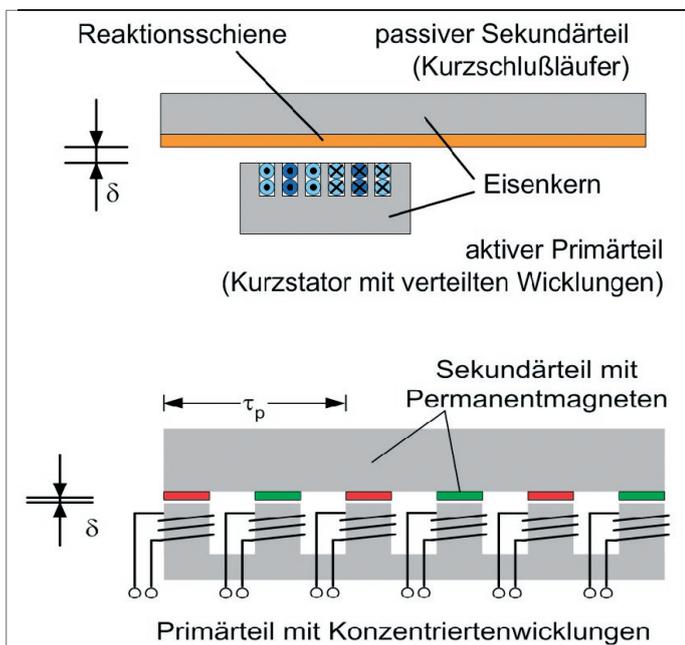
Translatorische Direktantriebe nutzen die selben Wirkprinzipien wie die rotatorischen Motoren. Dabei kommt das Prinzip der permanent erregten Synchronmaschine am häufigsten zur Anwendung. Die mit der endlichen Länge dieser Motoren verbundenen Randeffekte im Bereich der Wicklungen können zu unsymmetrischen Statorinduktivitäten führen, die allerdings durch ein geeignetes Wickelschema teilweise kompensiert oder in geeigneten Regelungskonzepten berücksichtigt werden können.

Ein wesentliches Merkmal von Linearmotoren ist die Polteilung τ_p (Bild 6), mit der die elektrische Rotorfrequenz ω_{RS} in die mechanische Geschwindigkeit v_m umgerechnet werden kann. Die erzeugte mechanische Kraft F_m wird durch Gleichung 9 bestimmt; für die mechanische Leistung P_{mech} gilt Gleichung 11. Es wird deutlich, dass sich beim Linearmotor im Gegensatz zum Torquemotor die Polpaarzahl auf die übertragbare Leistung auswirkt.

$$F_m = \frac{p}{l_p} \cdot \frac{3}{2} \cdot \Psi_p \cdot I_d \quad (9)$$

$$v_m = \frac{l_p}{\pi} \cdot \omega_{RS} \quad (10)$$

$$P_M = v_m \cdot F_m = \frac{p}{\pi} \cdot \omega_{RS} \cdot \frac{3}{2} \cdot \Psi_p \cdot I_d \quad (11)$$



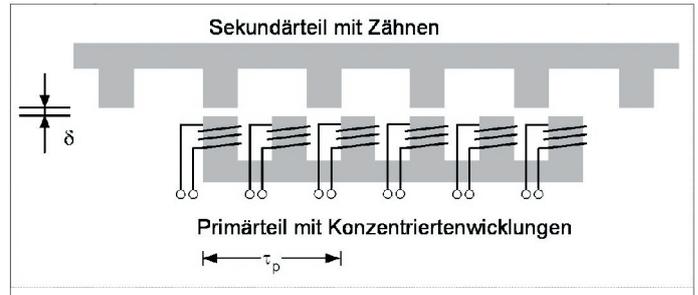
6: Schematische Darstellung eines linearen permanent erregten Synchronmotors (oben) und eines Kurzschluss-asynchronmotors (unten)

Beim Asynchronlinearmotor kommt wie beim Drehfeldasynchronmotor das Kurzschlussprinzip zur Anwendung. Damit ist diese Bauart technisch sehr einfach zu realisieren. Der Motor besteht aus einem aktiven Teil mit Drehstromwicklungen und einem passiven Teil mit Eisenkernen. Dieser hat die Funktion, den magnetischen Rückschluss herzustellen. Zusätzlich ist im passiven Teil gut leitendes Material wie z. B. Kupfer oder Aluminium als Kurzschlussleiter angeordnet, um induzierte Kurzschlussströme fließen zu lassen und damit ein Magnetfeld aufbauen zu können. Wenn der aktive Teil kürzer ist als der passive, spricht man vom Kurzstatorlinearmotor, andern-

falls vom Langstator (Bild 6, oben). Für den Asynchronlinearmotor können die von den rotierenden Asynchronmaschinen bekannten Regelungs- und Steuerungskonzepte direkt übernommen werden.

Die Wirkungsweise eines Reluktanz-Linearmotors lässt sich dadurch erklären, dass zwei Spulen mit entgegengesetzter Magnetisierungsrichtung bestromt werden (Bild 7). Dies führt dazu, dass sich der Sekundärteil wie ein Joch in das Magnetfeld zieht. Werden die bestromten Spulen abgeschaltet und die jeweils benachbarten Spulen eingeschaltet, so entsteht eine Bewegung des Sekundärteils, die mit der Bewegung des fortschreitenden magnetischen Feldes synchron verläuft. Bild 7 veranschaulicht, dass die Polteilung des Sekundärteils nicht der des aktiven Primärteils entsprechen darf; das Verhältnis der Anzahl

7: Schematische Darstellung eines linearen Reluktanzmotors mit dem Verhältnis $N_l/N_s = 4/6$



dass sich im Stator ein Wanderfeld aufbaut. Die Relativgeschwindigkeit der Bauteile entsteht nun dadurch, dass sich die im Läufer und im Stator erzeugten Felder synchron – quasi verzahnt – bewegen und dass sich die genannten Felder jeweils relativ zu dem Bauteil bewegen, welches das zugehörige Feld erzeugt.

Bei Asynchronbetrieb liefert also die Geschwindigkeit des wandernden Läuferfeldes einen zusätzlichen Freiheitsgrad, der sich nur bei doppelt gespeisten Motoren realisieren lässt. Die Schlupfbedingung für die Ströme (Gleichung 13) muss stets eingehalten werden, jedoch ist in ihr eine Frequenz weitestgehend frei wählbar.

$$\frac{v_m}{l_p} \cdot \pi = \omega_s - \omega_l \tag{13}$$

Über den erwähnten Freiheitsgrad ist es möglich, die Leistungsübertragung zwischen Stator und Läufer zu beeinflussen. Die Möglichkeit der berührungslosen Leistungsübertragung ist für die Anwendung in Bahnfahrzeugen von besonderem Interesse [4]. Die Schubkraft lässt sich durch Gleichung (14) beschreiben.

$$F_s = \frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot l_p} \cdot L_m \cdot I_{sd} \cdot I_{ld} \tag{14}$$

Vergleich zwischen rotatorischen und translatorischen Direktantrieb

Die für den Antrieb eines Arbeitsprozesses relevanten Beziehungen sind für den translatorischen und den rotatorisch Direktantrieb am Beispiel von Synchronmaschinen in Tabelle 2 gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass der translatorische Antrieb als eine Abwicklung des rotatorischen Antriebs aufgefasst werden kann. Durch dieses „Abwickeln“ kommt es jedoch zu unterschiedlichen mechanischen Belastungen von Stator und Läufer (Bild 9). Sieht man von möglichen Unwuchten der rotierenden Bauteile eines rotatorischen Motors ab, so kommt es hier lediglich durch die Gewichtskraft zu einer Belastung der Motorlager. Mit zunehmender Baugröße und steigender Drehzahl können in den Wicklungen auftretende Setzeffekte zu zusätzlicher Unwucht und damit zu einer erheblichen Mehrbelastung der Lager führen.

Beim Linearmotor kommt es neben der Belastung durch die Gewichtskraft nicht zu zusätzlichen Belastungen aufgrund von Setzen durch Fliehkraft. Bei den parallel liegenden Bauteilen des Linearantriebs entsteht allerdings im Betrieb eine Normalkraft (F_{Normal}), die in der Umgebungs konstruktion aufgenommen werden muss. Die analog bei Rotationsantrieben auftretenden Radialkräfte (F_{Radial}) kompensieren sich über den

Hochpolige Torquemotoren lassen sich auch als Hohlwellenmotoren einsetzen

der Läuferpole und der Anzahl der Ständerpole N_l/N_s darf also nicht ganzzahlig sein.

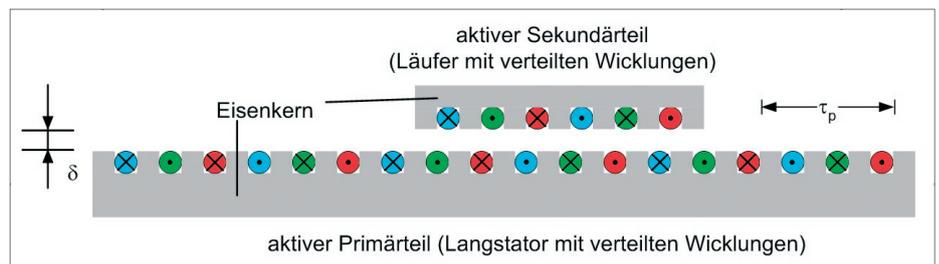
Betrachtet man die Induktivitäten in einem sich mit dem Magnetfeld synchron fortschreitenden Koordinatensystem, so lassen sich wie bei einer permanent erregten Synchronmaschine die Induktivität in Magnetisierungsrichtung L_d – also an der Stelle, an der die Spule eingeschaltet ist – und die um eine halbe Polteilung versetzte Induktivität L_q bestimmen. Deren Differenz ist gemäß Gleichung 12 für die entstehende Schubkraft maßgebend [1]. Dabei berücksichtigt k_p den Einfluss einer durch die Bewegung bedingte Zunahme der Induktivität, wenn sich die Pole zunehmend überdecken. Gleichung 12 macht weiter deutlich, dass die Kraftwirkung unabhängig von der Stromrichtung ist. Die Bewegungsrichtung wird ausschließlich durch die Richtung bestimmt, in der die Spulen fortlaufend weiterschaltet werden.

$$F \approx \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{N_l}{k_p \cdot \pi \cdot l_p} \cdot (L_d - L_q) \tag{12}$$

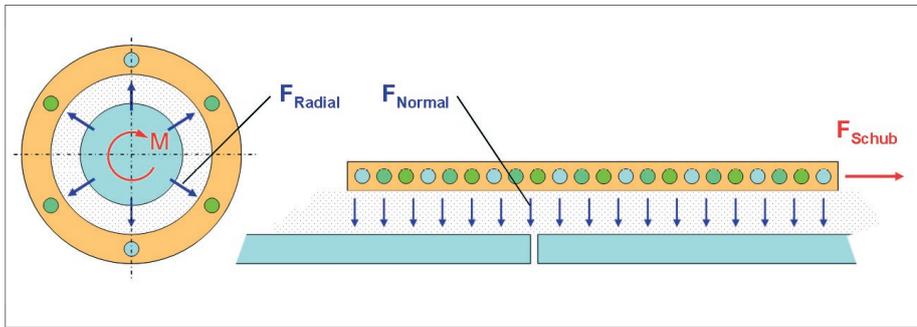
In Bild 8 ist ein Wicklungsschema eines doppelt gespeisten Langstatorlinearmotors dargestellt, der sowohl synchron als auch asynchron betrieben werden kann. Bei Synchronbetrieb fließen im Läufer Gleichströme, die durch die Wicklungsverteilung zu einer näherungsweise sinusförmigen Stromverteilung führen. Auf diese Weise entsteht ein stehendes Feld. Bei Asynchronbetrieb wird die Läuferwicklung so bestromt, dass das im Läufer erzeugte Feld wandert. Die Statorwicklung wird bei beiden Betriebsarten sinusförmig bestromt, so

Antriebsart	Leistung	Drehmoment / Kraft	Winkelgeschwindigkeit / Geschwindigkeit
Rotatorischer Antrieb	$P_{Mech.} = \omega_M \cdot T_M$	$T_M = p \cdot \frac{3}{2} \cdot \Psi_p \cdot I_d$	$\omega_M = \frac{\omega_{RS}}{p}$
Translatorischer Antrieb	$P_M = v_m \cdot F_m$	$F_m = \frac{p}{l_p} \cdot \frac{3}{2} \cdot \Psi_p \cdot I_d$	$v_m = \frac{l_p}{\pi} \cdot \omega_{RS}$

Tabelle 2: Vergleich eines translatorischen mit einem rotatorischen Direktantrieb



8: Schematische Darstellung eines doppelt gespeisten Langstator Linearmotors



9: Vergleich der Kräfte bei Rotationsmotor und Linearantrieb

Umfang und belasten damit die Umgebungskonstruktion nicht.

Aus elektrotechnischer Sicht unterscheiden sich die Systeme in einem weiteren Punkt, den auftretenden Streuinduktivitäten. Diese treten beim Linearantrieb nicht nur an den beiden Stirnseiten, vergleichbar mit den Streuinduktivitäten an den längs liegenden Stirnseiten des Rotationsmotors (Wickelköpfe), sondern auch an den quer liegenden Enden des Motors auf. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal gegenüber dem Torquemotor ist die Koppelung mehrerer Bauelemente. Beim rotatorischen Motor beträgt die Überdeckung von Stator und Rotor 100 %, da nur ein Sekundärteil (Rotor) und ein Primärteil (Stator) vorliegen. Beim Linearantrieb können je nach Ausführung mehrere Sekundärteile mit einem Primärteil verkoppelt sein. Dies wirkt sich auf die Kraftbildung aus und bedeutet darüber hinaus, dass auch nicht kraftbildende Segmente des Antriebs - zumindest zeitweise - bestromt werden müssen, was wiederum zur Erhöhung der Verlustleistung führt.

Vergleich von Direktantrieben mit Motor-Getriebe-Kombinationen

Die Vorteile der Direktantriebe ergeben sich vor allem aus der einfacheren mechanischen Struktur (Bild 2). Durch den Entfall der zur Leistungsumformung benutzten mechanischen Übertragungselemente ist ein Direktantrieb spielfrei. Systemgrößen wie Strom, Kraft bzw. Drehmoment und Geschwindigkeit bzw. Drehzahl können direkt erfasst und in ein Regelungskonzept einbezogen werden. Dies wirkt sich neben der verbesserten Positioniergenauigkeit auch vereinfachend auf die Regelung dieser Antriebe aus.

Ein weiterer Vorteil, der sich durch den Entfall der mechanischen Übertragungselemente ergibt, ist die hiermit verbundene Wartungsfreiheit. Dies resultiert aus dem Entfall von Funktionslementen, die begrenzte Lebensdauer aufweisen. Als Beispiel seien Lager, Dichtungen und Schmierstoffe genannt.

Wesentliche Vorteile eines Direktantriebs gegenüber Antrieben mit Leistungsumformung sind im Einzelnen:

- hohe Leistungsdichte,

- gleichbleibend hohe Positioniergenauigkeit durch Spielfreiheit (Entfall spielbehafteter mechanischer Übertragungselemente),
- gute Regelungseigenschaften,
- hohe Steifigkeit und Dämpfung,
- geringer Wartungsaufwand.

Bei Direktantrieben führt die hohe Leistungsdichte zu einer erheblichen Erwärmung des Antriebs. Sie werden daher häufig mit aufwändigen Wasser- oder Luftkühlsystemen ausgestattet, was bei vergleichbaren Antrieben mit mechanischer Leistungsumformung nicht immer erforderlich ist.

Ein weiterer Vorteil von Antrieben mit mechanischer Leistungsumformung ergibt sich dann, wenn hohe Stillstandsmomente über längere Zeiträume aufgebracht werden soll. So können Bremsen beim Antrieb mit mechanischer Übersetzung entsprechend der Übersetzung kleiner dimensioniert werden.

Die wesentlichen Vorteile der Antriebe mit mechanischer Leistungsumformung gegenüber den Direktantrieben sind:

- die relativ gute Eigenkühlung,
- die geringen Anschaffungskosten (Markterhebungen zeigen, dass vergleichbare Direktantriebe derzeit um Faktoren zwischen 10 bis 30 teurer sind als Antriebe mit Leistungsumformung),
- die hohe und kurzfristige Verfügbarkeit in vielen Varianten,
- die geringen Brems- oder Haltemomente auf der Motorwelle.

Literaturhinweise:

- [1] Schröder, D.: *Elektrische Antriebe - Grundlagen*. 2. Auflage, Springer-Verlag, 2000, ISBN 3-540-66846-2;
- [2] Isermann, R.: *Mechatronische Systeme - Grundlagen*. Springer-Verlag, 1999, ISBN 3-540-43129-2
- [3] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer-Verlag, 21. Auflage, 2004, ISBN 3-540-22142-5
- [4] Budig, Peter-Klaus: *Drehstromlinearmotoren*. Hüthig Verlag, 1980
- [5] Gutekunst, J.; Hering, E.; Martin, R.: *Elektrotechnik für Maschinenbauer*. Springer Verlag, 1999
- [6] Henke, M.: *Antrieb mit doppeltgespeistem Linearmotor für ein spurgeführtes Bahnfahrzeug*. VDI Verlag, 2002
- [7] Hofer, K.: *Drehstrom-Linearantriebe*. VDE Verlag, 1993
- [8] Luda, G.: *Drehstrom-Asynchron-Linearantriebe*. Vogel Verlag, 1980
- [9] Spring, Eckhard: *Elektrische Maschinen*. Springer Verlag, 1998