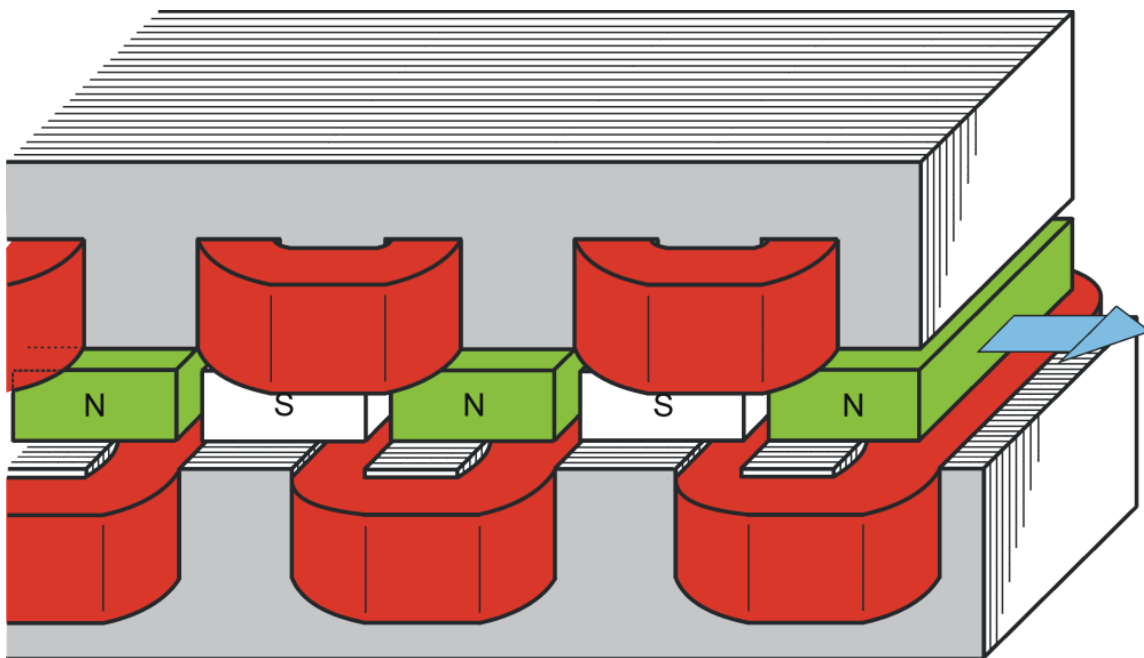


## SCHUBSTARKER PM-ERREGTER DOPPELSEITIGER SYNCHRONER LINEARMOTOR MIT VERSETZTEN STATOREN

W.-R. Canders, F. Laube, H. Mosebach

(Deutsche Kurzfassung des LDIA 2001 – Beitrages: "High thrust double-sided permanent magnet excited linear synchronous machine with shifted stators")

Antriebe mit Linearmotoren haben in letzter Zeit zunehmende Aufmerksamkeit gewonnen. Typische Anwendungsfelder sind - neben der Verkehrstechnik - Antriebe zur Positionierung in Werkzeugmaschinen und Einrichtungen zur Lösung von Materialtransportaufgaben, zum Beispiel Container-Handling-Systeme. In den letzteren beiden Feldern wird die potentiell hohe Dynamik, die Spielfreiheit und eine bei Bedarf hohe Präzision der Positionierung geschätzt. Der Wegfall eines Getriebes bedeutet jedoch auch, daß die benötigte Vortriebskraft direkt aufgebracht werden muß und nicht durch geeignete Übersetzung an die Aufgabe angepaßt werden kann. Vor allem für größere Kräfte sind daher Linearantriebskonzepte mit großer Kraftdichte (z.B.  $> 50 \text{ kN/m}^2$ ) und mit kompaktem Aufbau gefragt. Eine geeignete Struktur ist in **Bild 1** skizziert. Es handelt sich um eine doppelseitige permanentmagneterregte Synchronmaschine.

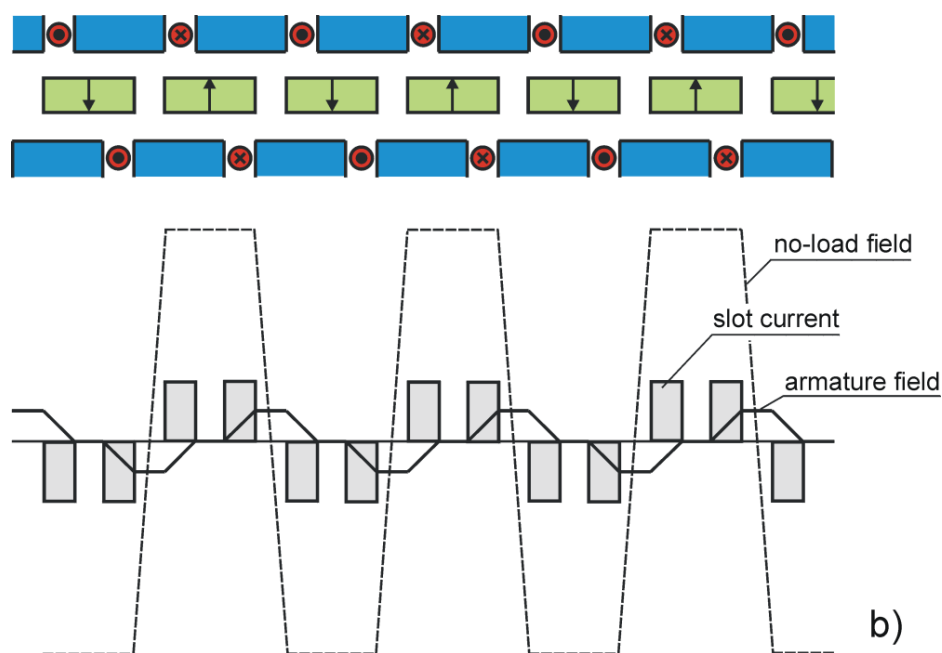


**Bild 1:** Basiskonfiguration

Der eisenlose Translator bewegt sich zwischen zwei gegeneinander versetzten Teilstatoren, die jeweils einem Maschinenstrang zugeordnet sind. Die Wicklung besteht aus einfachen Zahnspulen und ist damit wegen des extrem kurzen Wickelkopfs sehr kompakt, so daß günstige Voraussetzungen für die Befestigung der Teilstatoren, die Unterbringung in einer Werkzeugmaschine und die Aufnahme der erheblichen Normalkräfte bestehen. Die Maschine ist im Prinzip eine lineare Abwicklung der an anderer Stelle dieses Jahresberichts beschriebenen rotierenden Anordnung.

Die in **Bild 1** dargestellte Maschine ist auch hier der Ursprung einer ganzen Familie von Maschinen, die sich in der Art der Anordnung der Teilstatoren, der Stränge und der Verschiebung der Teilstatoren bzw. Ströme unterscheiden. Gemeinsam sind in jedem Fall die einfachen Zahnspulen und die sich aus dem speziellen Aufbau ergebende extrem kleine Ankerrückwirkung, die dem Antrieb die gewünschte hohe Überlastfähigkeit und eine weitgehende Sicherheit gegenüber Entmagnetisierung der Permanentmagnete verleiht.

Dieser günstige Effekt sei an Hand von **Bild 2** veranschaulicht. Im Sinne einer 1-dimensionalen vereinfachenden Betrachtung ergibt sich das Ankerfeld aus dem Integral über den an den Nutöffnungen konzentrierten Strombelag. Durch den räumlichen Versatz ist jeweils nur eine Nutdurchflutung über dem großen aus zweifachem Luftspalt und Magnethöhe zusammengesetzten magnetischen Gesamtpalt wirksam. Der Effekt wird durch die hier ohne weiteres ausführbare sehr kleine Polteilung unterstützt.

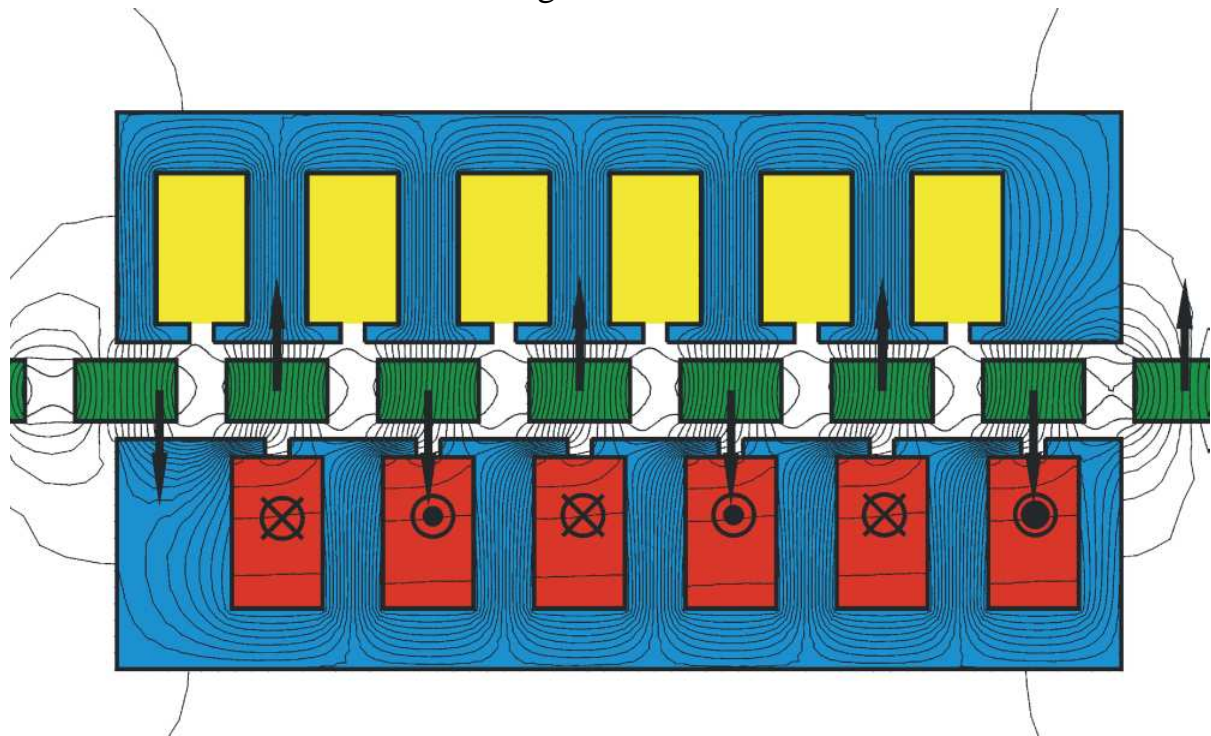


**Bild 2:** Leerlauf- und Ankerfeld

Verglichen mit einer konventionellen dreisträngigen Wicklung gleicher Nutteilung beträgt das Ankerfeld hier lediglich ca. ein Drittel des sonst erwarteten Wertes.

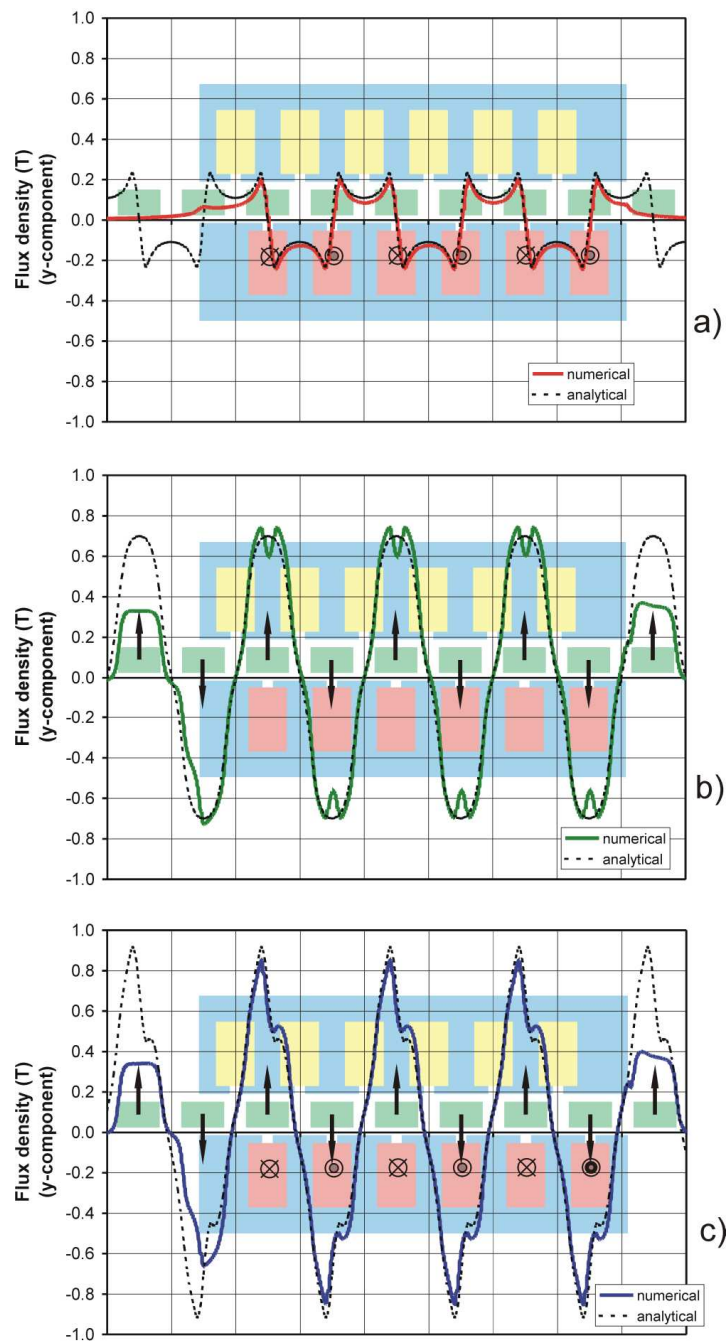
Zur mathematischen Behandlung des Maschinenkonzepts dienen zweckmäßig auch hier sowohl analytische als auch numerische Methoden. Der analytische Ansatz folgt dem im Zusammenhang mit der rotierenden Maschine skizzierten Prozedere und ist für das integrale Verhalten zumindest innerhalb des linearen Bereichs sehr zuverlässig. Durch den zweidimensionalen Ansatz in kartesischen Koordinaten können auch größere Magnethöhen und Luftspalte korrekt erfaßt werden.

Da bei dem analytischen Verfahren auf Wellenansätze mit in Bewegungsrichtung unbegrenzter Gültigkeit zurückgegriffen wird, können die mit der endlichen Statorlänge verbundenen Effekte hiermit grundsätzlich nicht erfaßt werden, so daß numerische FE – Methoden eine noch größere Bedeutung gewinnen. So weist der in **Bild 3** gezeigte Feldverlauf zum Beispiel auf eine in Bewegungsrichtung wirkende und von den Permanentmagneten auf das Statoreisen ausgeübte (Reluktanz-) Kraft hin. Die Ausgestaltung der Endbereiche der Teilstatoren ist damit Bestandteil einer Optimierung auf minimale Vortriebskraftschwankungen.



**Bild 3:** Feldbild

Die in **Bild 3** dargestellte Motorgeometrie wurde in Hinsicht auf Feldverteilung, Gesamtkraft und Kraftschwankungen bei Bewegung näher untersucht. Einen Vergleich der Verteilungen von Leerlaufeld, Ankerfeld und Gesamfeld zeigt **Bild 4**. Die zugrunde gelegten Daten sind im vollständigen Tagungsbeitrag enthalten. Die Übereinstimmung zwischen analytischer und numerischer Berechnung ist im Mittelbereich als sehr gut zu bezeichnen. Neben den auch bei der rotierenden Maschine beobachteten Abweichungen im Gebiet der Nutöffnungen sind die Unterschiede außerhalb des Statoreisens auffällig, Bereiche in denen nur die FE-Techniken wirksam sind.

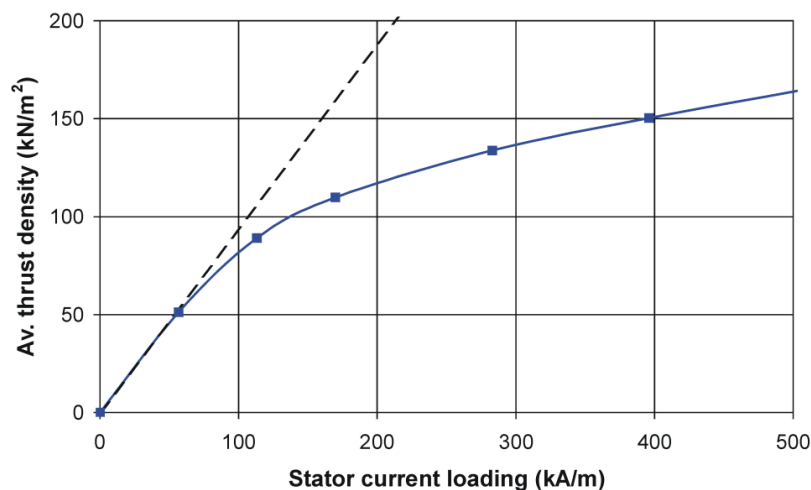


**Bild 4:** Vergleich analytische /numerische Feldberechnung

Zur Erzielung eines guten Regelverhaltens ist eine möglichst stromproportionale und rastkraftfreie Vortriebskraftbildung anzustreben. Es bestehen folgende Einflußmöglichkeiten:

- Sinusförmige Statorströme
- Schmale Nutöffnungen
- Wahl eines optimalen Polbedeckungsverhältnisses
- Richtige Wahl der Statorlänge und Konturierung der Endbereiche
- Schrägung der Nuten oder der Permanentmagnete
- Permanentmagnete mit variabler Dicke ("Sinuspole").

Im Zusammenhang mit der häufig geforderten hohen Überlastbarkeit (Losbrechkräfte, hohe Beschleunigung, ...) stellt sich die Frage nach einer oberen Begrenzung für die Kraftdichte. Im Kurzzeitbetrieb, bei dem thermische Aspekte noch keine Rolle spielen, wird sie hier durch die zunehmende Eisensättigung und durch die Entmagnetisierungsgefahr der Permanentmagnete bestimmt. Als Beispiel zeigt **Bild 5** die mit der Geometrie nach **Bild 3** ermittelte Kraftdichte als Funktion des eff. Statorstrombelags. Dargestellt ist die akkumulierte Wirkung beider Teilstatoren.



**Bild 5:** Kraftdichte als Funktion des Statorstrombelags

Bei Kraftdichten bis zu 100 kN/m<sup>2</sup> ist der Einfluß der Eisensättigung nur sehr wenig wirksam. Insgesamt werden - bei zunehmend starker Sättigung - Werte bis über 150 kN/m<sup>2</sup> erreicht. Bei dem höchsten Strombelag in **Bild 5** beträgt die maximale entmagnetisierende Flußdichte des Ankerfeldes lediglich -0,5T. Insgesamt ist die prinzipbedingt hohe Festigkeit der Anordnung gegen Entmagnetisierung damit nachgewiesen.