

## Einfluß der Stromform auf Leistung und Verluste permanentmagnet-erregter Synchronmaschinen

H. Mosebach, W.-R. Canders

(Kurzfassung des ICEM98-Beitrages: Average Thrust of Permanent Magnet Excited Linear Synchronous Motors for Different Stator Current Waveforms)

Bei permanentmagneterregten Drehstromantrieben wird gelegentlich vorgeschlagen, die Leistung durch Übergang auf eine höhere Strangzahl und Rechteckströme statt Sinusspeisung zu erhöhen, wobei Verbesserungsfaktoren von bis zu 2 genannt werden. Die hierfür zu erfüllenden Bedingungen sind bei praktischen Anordnungen jedoch nur sehr unvollständig erfüllt, da Strang- und Nutenzahl nicht beliebig gesteigert werden können, die Kommutierungszeiten nicht vernachlässigbar klein sind, und die Voraussetzung eines idealen Rechteckfeldes in der Regel nicht gegeben ist. Es stellt sich die Frage nach den mit realen Anordnungen erzielbaren Verbesserungen und dem Bezug zu den dabei auftretenden Wicklungsverlusten.

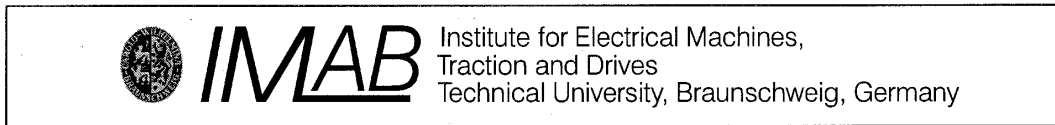
Die Untersuchungen beziehen sich auf die in **Bild 1** dargestellten Strukturen, wobei zwischen einem eisenbehafteten und einem eisenlosen Stator unterschieden wird. Es sind beispielhaft Linearanordnungen gezeigt. Die Übertragung auf zylindrische Anordnungen ist ohne weiteres möglich, wenn die Feldkomponenten in dem jeweils maßgeblichen Koordinatensystem ermittelt werden. Die analytische Behandlung ist in jedem Fall **zweidimensional** durchzuführen. Bei der Berechnung der mittleren Kraftwirkung (**Bild 2**) wird eine lokale Kraftdichte, eine über den Ort gemittelte Kraftdichte und schließlich die gesamte integrale Kraft bestimmt. Die Notwendigkeit einer 2D-Behandlung wird aus **Bild 3** ersichtlich, aus dem je nach Luftspalt und Existenz des Stator Eisens erhebliche Abweichungen von der idealen 180°-Rechteckform abzuleiten sind.

Die Auswertung wird für mehrere ungeschrägte, ungesehnte Drehstromwicklungen mit Strangzahlen von 3 und 6, bei Lochzahlen von 1 und 2, für variables PM- Polbedeckungsverhältnis  $a$ , und Stromformen zwischen Dreieck und Rechteck ( $b=0..1$ ) durchgeführt. **Bild 4** zeigt die Kraftwirkung bei variabler Stromform. Bezogen auf gleichen **maximalen** Strom zeigen sich Kraftverbesserungen bis zum Faktor 1,25, wobei die Wicklung mit  $m=3$ ,  $q=1$  die höchste Ausbeute liefert. Bei gleichem **Stromeffektivwert** - entsprechend konstanter Wärmeentwicklung - ist jedoch ein Abfall der Leistungsausbeute festzustellen. Bei einer Variation des Polbedeckungsverhältnisses zeigt sich der in **Bild 5** dargestellte Sachverhalt. Die Darstellung bestätigt den günstigen Einfluß eines großen Polbedeckungsverhältnisses und zeigt den erheblichen Fehler bei Annahme einer idealisierten rechteckförmigen Feldverteilung, obwohl das nichtgleichförmige Fortschreiten der Strombelagswelle in dieser Rechnung bereits berücksichtigt ist.

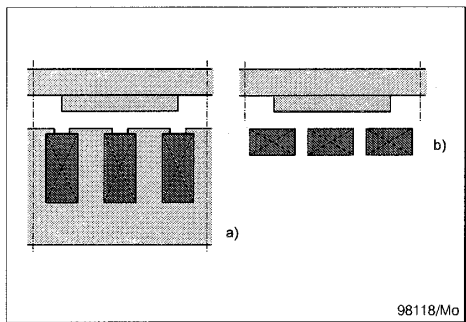
Die Wellendarstellung der kraftbildenden Größen erlaubt eine einfache Ermittlung der lokalen Kraftdichteverteilung. Dies ist vor allem bei eisenlosen Statoranordnungen interessant (**Bild 6**), wo aufgrund des fehlenden Rückschlusses im Bereich der Polkanten eine Feldumkehr und damit negative Kraftbeiträge festzustellen sind.

Zusammenfassend kann die Anwendung von Rechteckströmen als geeignet angesehen werden, die Leistungsausbeute um 20...30% zu steigern, wobei eine überproportional erhöhte Wärmeentwicklung in Kauf genommen werden muß. Für den Maschinenentwurf ist rechtzeitig

anhand der vorgesehenen Betriebsart zu ermitteln, ob die geforderte Maximalleistung oder die zulässige Erwärmung als wichtigste Restriktion anzusehen sind.



Average Thrust of Permanent Magnet Excited Linear Synchronous Motors for Different Stator Current Waveforms  
H. Mosebach W.-R. Canders



a) Iron cored pm linear motor      b) Ironless pm linear motor      ①

Local thrust density:  $f_x(x,t) = K(x,t) \cdot B(x,t)$

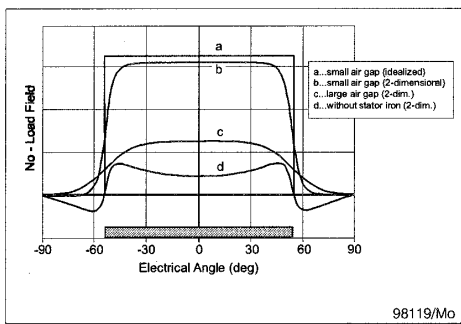
with flux density  $B(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \hat{B}_k \cdot \cos v(kx - \omega t)$

and current sheet  $K(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k(t) \cos kx + b_k(t) \sin kx$

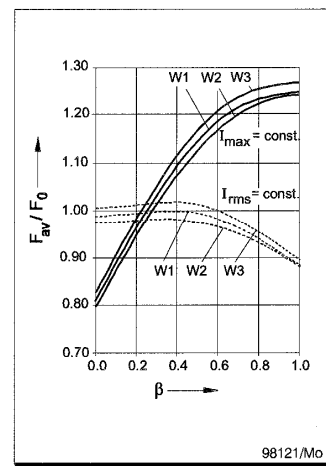
Local average thrust density:  $f_{x,av}(t) = \frac{1}{2\pi\tau} \int_{x=0}^{2\pi\tau} f_x(x,t) dx$

Overall average thrust:  $F_{av} = 2\pi\tau l \int_0^T f_{x,av}(t) dt$

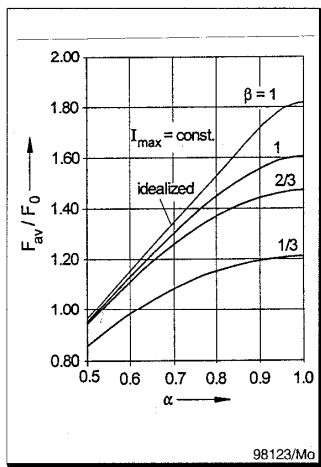
Force calculation      ②



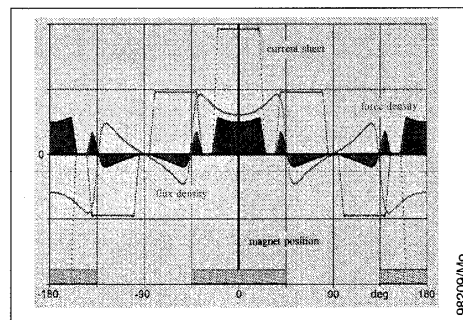
Typical no-load fields      ③



Variation of waveform  $\beta$  ( $\alpha = 2/3$ )      ④



Variation of pole arc  $\alpha$  ( $m=3, q=1$ )      ⑤



Local distributions (ironless stator)      ⑥