

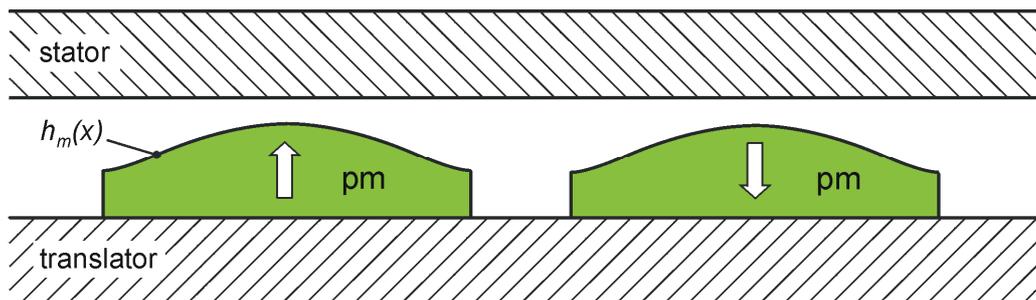
# UNTERSUCHUNG VON PM-ERREGTEN LINEAR-MOTOREN MIT VARIABLER MAGNETFORM

W.-R. Canders, H. Mosebach, Z. Shi

(Kurzfassung des Beitrages zur LDIA 2003, Sept. 2003, Birmingham, UK)

## 1 EINLEITUNG

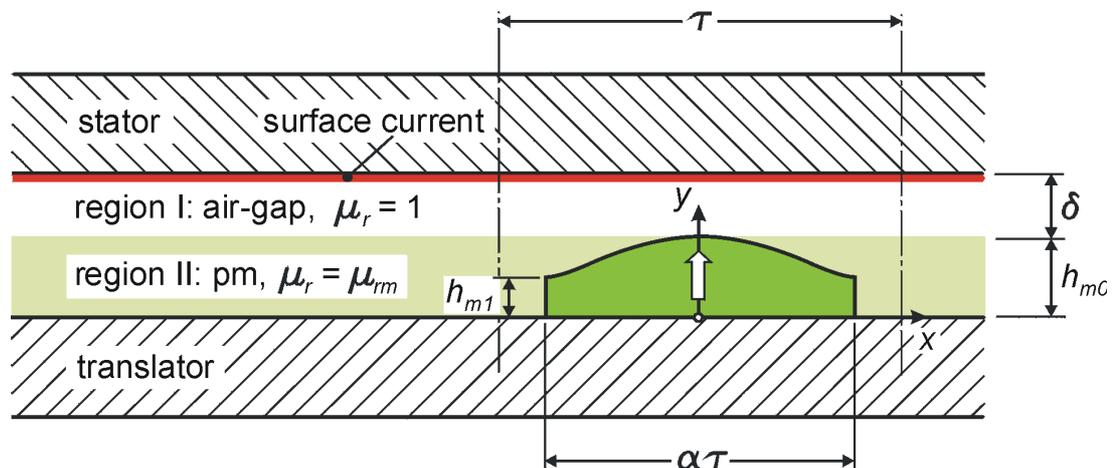
Linearmotoren für hohe Kraftdichte werden vorzugsweise als permanentmagneterregte Synchronmaschinen entworfen. Normalerweise werden dabei rechteckförmige Magnete verwendet. Die von ihnen erzeugte Feldform ist jedoch nicht sinusförmig, wodurch trotz sinusförmiger Statorströme unerwünschte Kraftschwankungen entstehen. Es stellt sich die Frage, ob die Feldverteilung sowie die Gleichmäßigkeit des Kraftverlaufs durch die Anwendung passend geformter Magnete mit seitlich abfallender Magnethöhe, wie schematisch in **Bild 1** gezeigt, verbessert werden kann.



**Bild 1:** Permanentmagneterregter Linearmotor mit geformten Magneten

## 2 RECHNERISCHE BEHANDLUNG

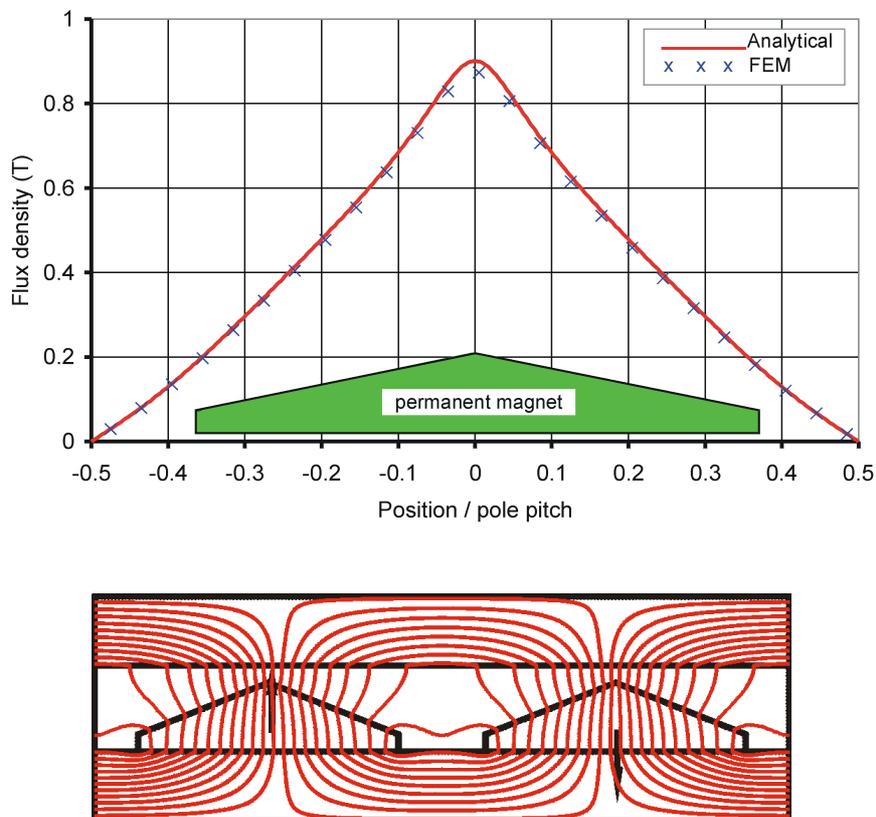
Das für die Rechnung angewendete analytische Modell ist in **Bild 2** dargestellt.



**Bild 2:** Modell

Wie im vollständigen Aufsatz dargestellt, basiert die 2-dimensionale analytische Lösung auf der Methode des Vektorpotentials und einem Wellenansatz. Die Leerlauffeldberechnung wird auf die Lorentzkräfte an den Magnetkanten infolge des Ankerfeldes zurückgeführt. Das Modell enthält zwei Regionen, eine für den Luftspalt, die andere für die in einer Schicht angeordneten Magnete. Die Magnethöhe wird durch eine weitgehend beliebige Funktion des Ortes beschrieben. Für die Berechnung wird eine Zerlegung des Magneten in horizontal ausgerichtete infinitesimal dünne Streifen durchgeführt.

Für die Überprüfung der vorgeschlagenen analytischen Methode wurde ein eher extremes Testbeispiel mit dreieckförmigen Magneten untersucht und mit einer FEM-Behandlung verifiziert. Die in **Bild 3** gezeigte Feldverteilung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Bestehende Abweichungen können sowohl analytisch durch die Begrenzung der maximalen Ordnungszahl als auch numerisch durch die FE-Modellierung bedingt sein.

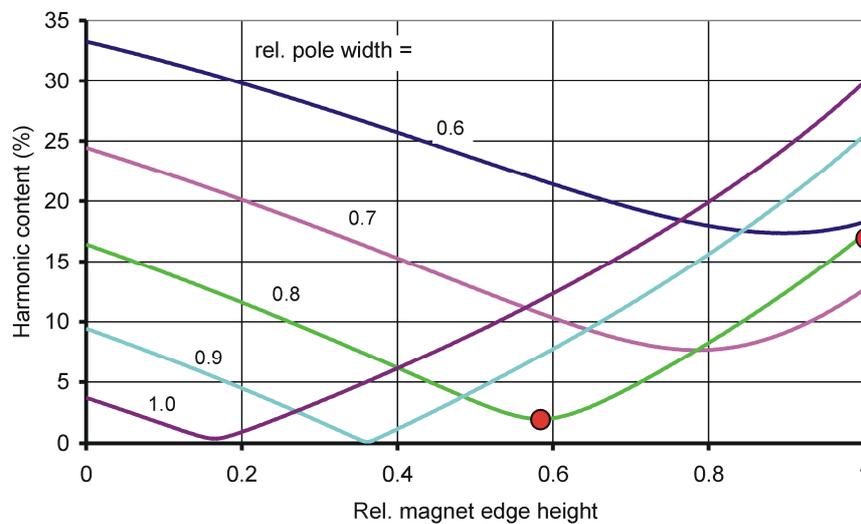


**Bild 3:** Testbeispiel (FE-Ergebnisse mit FEMAG<sup>®</sup> berechnet)

### 3 EXEMPLARISCHE OPTIMIERUNG

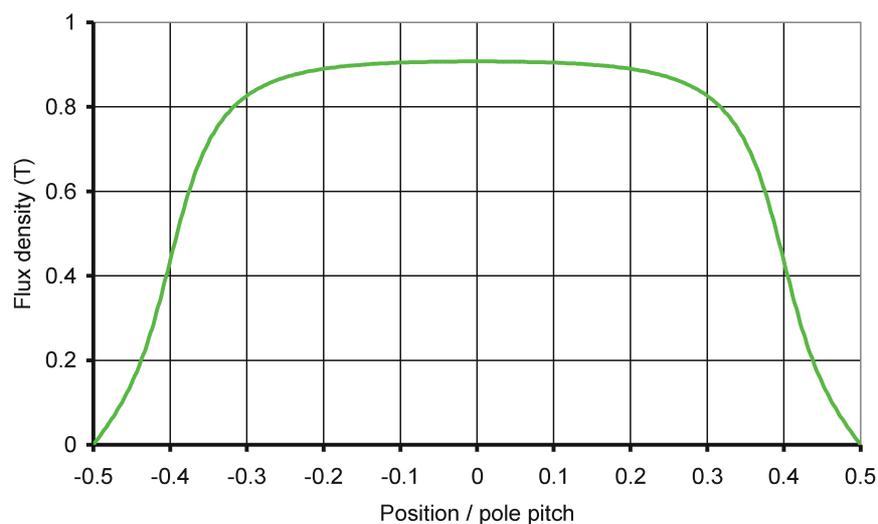
Wegen der großen Zahl der Parameter und der unbegrenzten Vielfalt denkbarer Magnetformen ist eine allgemeine Optimierung nicht durchführbar. In diesem Aufsatz werden daher beispielhaft nur Magnetformen betrachtet, die durch einen Kreisabschnitt beschrieben werden können. Die Produktion solcher Magnete sollte bei größeren Stückzahlen nur geringfügige Mehrkosten verursachen und deutlich preiswerter sein als die Herstellung von Halbach-arrays.

Für die exemplarische Optimierung wird der Oberschwingungsgehalt als Beispiel für die Feldqualität herangezogen. **Bild 4** zeigt die Ergebnisse für Polbedeckungsverhältnisse ("rel. pole width") zwischen 0,6 und 1,0 und für Magnetrandhöhen zwischen 0 und  $h_{m0}$ .

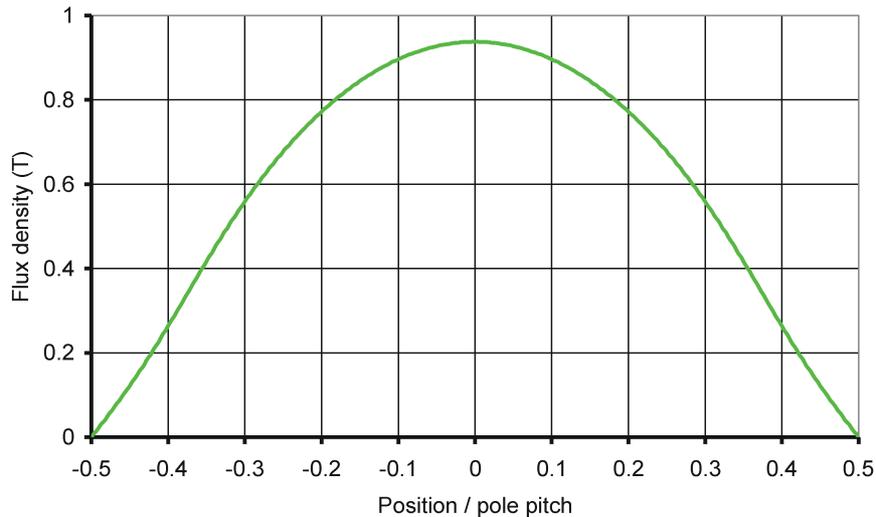


**Bild 4:** Oberschwingungsgehalt ( $h_{m0}/\tau = 0,20$ ,  $\delta/\tau = 0,05$ ,  $\mu_{rm} = 1,05$ )

Die Kurven zeigen je nach Polbedeckungsverhältnis ein eindeutiges Minimum. Es hängt hauptsächlich vom Polbedeckungsverhältnis  $\alpha$  ab. Für  $\alpha$ -Werte größer als ca. 0,85 können Magnetrandhöhen gefunden werden, bei denen der Oberschwingungsgehalt praktisch verschwindet. Es ist interessant festzustellen, dass eine volle Bedeckung des Translators mit Magneten ( $\alpha = 1$ ) nicht notwendigerweise für den Oberschwingungsgehalt schädlich ist, sofern die verringerte Höhe an den Rändern passend gewählt wird. Die Situation kann durch zwei Diagramme veranschaulicht werden, welche die Feldverteilung am Stator für die in **Bild 4** auf der Kurve für  $\alpha = 0,8$  vorgewählten Punkte zeigen (**Bild 5** und **Bild 6**).



**Bild 5:** Feldverteilung für  $h_{m1} / h_{m0} = 1,0$



**Bild 6:** Feldverteilung für  $h_{m1} / h_{m0} = 0,575$

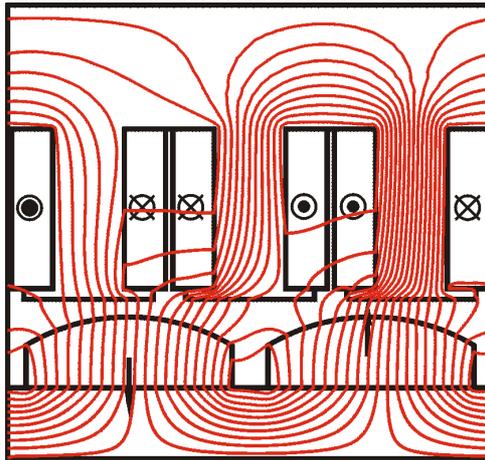
Der durch die rechteckförmigen Magnete produzierte Oberschwingungsgehalt (**Bild 5**) beträgt 17 %. Für die abgerundeten Magnete (**Bild 6**) erhält man einen weitgehend sinusförmigen Verlauf. Der Oberschwingungsgehalt beträgt nur noch 2 % und ist visuell kaum noch wahrzunehmen.

Der Oberschwingungsgehalt wird erwartungsgemäß um so größer, je kleiner der Luftspalt ist. Andererseits kann eine bemerkenswerte Stabilität der Position des Minimums gegen Änderungen des Luftspalts beobachtet werden.

## 4 REDUKTION DER KRAFTSCHWANKUNGEN

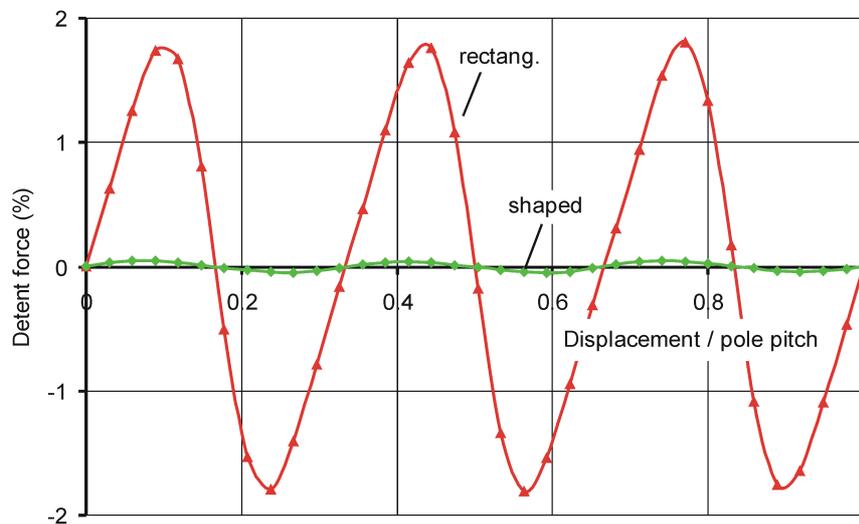
Die bei permanentmagneterregten Maschinen auftretenden Kraftschwankungen setzen sich aus Stromkräften und Reluktanzwirkungen durch die Nutöffnungen und durch lokale Eisensättigung zusammen. Die Reluktanzwirkungen können mit befriedigender Genauigkeit nur mit numerischen Verfahren bestimmt werden. Es wird wieder das Programmpaket FEMAG<sup>®</sup> der ETH Zürich verwendet. Diese erlaubt u. a. die automatisierte Berechnung der positionsabhängigen Kraftschwankungen bei einer Verschiebung mit gleichzeitiger Anpassung der Ströme.

Das folgende Beispiel bezieht sich auf einen "ziemlich großen" Linearmotor in der Ausführung "2/3-PPSM". Es wurde sowohl die Ausführung mit Rechteckmagneten (Polbedeckungsverhältnis  $\alpha = 2/3$ ) als auch die nach Kap. 3 optimierte Anordnung mit gerundeten Magneten (Polbedeckungsverhältnis  $\alpha = 0,85$ ) untersucht. Die Magnetdaten sind Remanenz  $B_r = 1,15$  T und rel. Permeabilität  $\mu_{rm} = 1,05$ . Die geometrischen Abmessungen veranschaulicht **Bild 7**. Es zeigt die Feldverteilung für die gerundeten Magnete. Die Ströme sind dabei derart angenommen, dass bei symmetrischer sinusförmiger Speisung durch feldorientierte Regelung der Maximalschub erzeugt wird.



**Bild 7:** Geometrie des Motors und Feldverteilung

**Bild 8** zeigt die aus der FEMAG<sup>®</sup>-Rechnung erhaltenen Kraftschwankungen für beide Magnetformen und veranschaulicht den Erfolg der abgerundeten Gestaltung. Die Berechnung wurde für konstante Permeabilität und stromlosen Zustand durchgeführt, wodurch die Kraftschwankungen reine Reluktanzeffekte darstellen. Die verbesserte Anordnung zeigt einen bemerkenswert kleinen Einfluss der Nutöffnungen.



**Bild 8:** Kraftschwankung für rechteckförmige und gerundete Magneten

Der Effekt kann durch Schrägung weiter verbessert werden.