

1 Einleitung

Linearantriebe eignen sich aufgrund ihrer Geometrie und Bewegungsrichtung gut für den Einsatz in Transportsystemen. Ihr Aufbau als Direktantrieb erlaubt den Verzicht von Getrieben und deren Verluste. Die beiden Motorhälften Translator (bzw. Rotor bei rotatorischen Maschinen) und Stator werden in Fahrweg und Fahrzeug untergebracht. Je nach Konzept und Motorart lassen sich die Fahrzeuge sogar rein passiv aufbauen. Es werden dann keine Zuleitungen für Kommunikation, Sensorik oder Spannungsversorgung benötigt.

Der Abstand zwischen Translator und Stator ist ein wesentliches Merkmal eines Elektroantriebes. Im Allgemeinen werden bei kleineren Luftspalten bessere Wirkungsgrade erzielt. Doch gerade der Luftspalt von Direktantrieben ist in linearen Transportsystemen einer Reihe von störenden Einflüssen ausgesetzt. So beeinflussen sowohl Verschleiß an Rad und Schiene, wie auch Fertigungstoleranzen und Fahrbahnverwerfungen, die im Laufe der Betriebsdauer auftreten können, den Luftspalt. Ebenfalls elastische Verformungen, etwa durch Beladung oder Überfahren von Bodenwellen, haben Auswirkung auf den Abstand der beiden Motorhälften. So verringert sich der Luftspalt an einem Containerhandlungssystem mit permanentmagneterregten Linearmotoren [LDI98] der Luftspalt von 20 mm auf 13 mm allein aufgrund der Fahrzeugdurchbiegung bei der Beladung der Waggons.

Abbildung 1.1 und Abbildung 1.2 zeigen den Aufbau einer solchen Anlage. Im ersten Bild ist das Schienensystem mit den im Fahrweg eingelassenen Statoren zu sehen. Im zweiten Bild befindet sich ein Fahrzeug auf den Schienen. Deutlich sind Kreuzungen erkennbar. Die Fahrzeuge können innerhalb dieser Anlage nicht nur in Vortriebsrichtung sondern auch seitlich bewegt werden, was eine hohe Beweglichkeit bei geringem Platzbedarf ermöglicht.

Um den Störeinflüssen zu begegnen, werden bei dem Entwurf linearer Transportsysteme enge mechanische Toleranzen gefordert. Während bei kleineren Anlagen den mechanischen Anforderungen mit noch vertretbarem Aufwand entsprochen werden kann, kommt es bei ausgedehnten Anlagen zu einem erheblichen Mehraufwand. Beispielsweise wird die gesamte Anlage auf eine Bodenplatte aus Beton installiert, um Fahrbahnabsenkungen entgegenzuwirken.



Abbildung 1.1: Fahrweg eines Containerhandlingsystem mit Linearantrieben (Quelle: Noell Crane Systems)



Abbildung 1.2: Fahrzeug und Fahrweg mit Linearantrieb (Quelle: Noell Crane Systems)

Trotz der Maßnahmen wird der Luftspalt relativ groß gewählt, um Kollisionen der beiden Antriebshälften über die Anlagendauer unbedingt ausschließen zu können. Ein kleiner Luftspalt ist aber Voraussetzung für einen Elektromotor mit gutem Wirkungsgrad und hohen Kraftdichten. Bei dem oben erwähnten Containerterminal [LDI98], [LMTT] liegt ein Luftspalt zwischen 13 und 20 mm vor. Der speziell auf diesen Luftspalt abgestimmte Maschinenentwurf besitzt damit einen hohen Blindleistungsbedarf und einen relativ geringen Ausnutzungsgrad. Als Ausgleich muss der Statorstrom oder das Erregerfeld erhöht werden, was eine Sättigung des Magnetkreises zur Folge haben kann. Eine größere

Erregung führt insbesondere bei Langstatorantrieben zu einer großen, voluminösen und gleichzeitig teuren Permanentmagnetleiste.

Auch bei dem „Linear Metro“ [JSA01], ein von asynchronen Kurzstatormotoren angetriebenes Personentransportsystem, wurde der Luftspalt aufgrund der Fahrbahntoleranzen recht groß gewählt, was sich wiederum bei Blindleistungsbedarf und Wirkungsgrad ungünstig auswirkt.

Um die mechanischen Probleme beim Luftspalt zu lösen, soll in dieser Arbeit eine Regelung des Abstandes zwischen Translator und Stator untersucht werden. Die Regelung basiert auf der Ausnutzung und Manipulation der in elektrischen Maschinen vorhandenen Normalkräfte. Auf dem Gebiet der Luftspaltregelung bei schienengeführten Transportsystemen wird bislang nur die Magnetschwebetechnik verwendet. Bei den bekannten elektromagnetischen Magnetschwebetechniken wird die elektrische Erregung des Linearmotors (Transrapid) oder eine hybride Erregung mit Dauermagneten zur aktiven Regelung genutzt. Eine Beeinflussung der Normalkräfte zur Luftspaltregelung bei dauermagneterregten Linearmotoren allein durch die Steuerung der Phasenlage und Amplitude der Statorströme ist bisher nicht bekannt geworden. Nur bei asynchronen Linearantrieben gab es Ansätze, durch Wahl des Schlupfes die Normalkräfte zu nutzen [Weh72], [Kim98]. Diese Ansätze wurden jedoch wegen der für den Betrieb ungünstigen Schlupfwerte verworfen. Bei dem hier vorgeschlagenen Verfahren handelt es sich somit um eine neuartige Methode zur Luftspaltregelung.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Erweiterung der analytischen Kraftberechnung über den Maxwellschen Spannungstensor [JBMo97]. Bekanntermaßen lässt sich mit dieser Methode die mittlere Kraftdichte des Vortriebes bestimmen, einen sinusförmigen Statorstrombelag vorausgesetzt. Das Verfahren wurde so erweitert, dass Normal- und Antriebskräfte bei beliebiger Einspeisung der Strangströme analytisch erfasst werden. Damit bietet sich dieses Verfahren ebenfalls in der Entwurfsphase an, da der Einfluss von Motorparametern auf die Kraftentfaltung sowohl in Vortriebs-, als auch in Normalenrichtung betrachtet werden.

Eine analytische Berechnung besitzt gegenüber einer Berechnung mittels der Finite Elemente Methode (FEM) den Vorteil, sehr schnell und ohne großen Aufwand durchführbar zu sein. Bei einem FEM-Programm muss zuerst die Geometrie innerhalb der Software eingegeben und erstellt werden, und die Materialeigenschaften den einzelnen Bereichen zugewiesen werden. Das ist bei einer analytischen Methode nicht notwendig, da Geometrie und Materialeigenschaften in dem Modell und damit in den bereits aufgestellten

Gleichungen grundsätzlich berücksichtigt sind. Bei geschickter Wahl der Parameter der analytischen Gleichungen kann die Berechnung allgemeingültig aufgestellt werden und lediglich die Parameter im Kopf der Rechnung müssen an den Motor angepasst werden.

Dadurch eignet sich die analytische Berechnung besonders in der Entwurfsphase, da Änderungen in der Geometrie oder den Materialeigenschaften schnell überprüft und mit alternativen Motorentwürfen verglichen werden können.

Da das zugrundeliegende Rechenmodell meist vereinfacht wird, um den mathematischen Aufwand in Grenzen zu halten, sind gleichfalls die Ergebnisse nicht so detailgetreu. So werden Sättigungserscheinungen meist vernachlässigt, da deren Betrachtung den Aufwand stark erhöht. Eine mögliche Berücksichtigung der Sättigung kann durch iterative Rechenschritte erfolgen. Weiterhin werden auch geometrische Strukturen in dem analytischen Modell vereinfacht beschrieben. Teilweise wird eine mathematische Beschreibung und Lösung der Gleichungen durch die Vereinfachung erst möglich. In der vorgestellten Berechnung wird beispielsweise der Einfluss der Nutungen vereinfacht dargestellt. Die Momenten- oder Kraftwelligkeit, die durch die Nutung entsteht, wird auf diese Weise nicht erfasst. Die analytische Berechnung ist in diesem Fall mit einer Mittelung zu vergleichen. Die berechneten Werte stellen die Kräfte korrekt dar, doch an der realen Maschinen können mehr oder weniger starke Schwankungen um diese Werte auftreten. Über eine Polteilung hinweg betrachtet, geht das Fehlerintegral jedoch gegen Null.

2 Beeinflussung der Normal- und Vortriebskräfte

Für eine Regelung des Luftspaltes ist es erforderlich, neben den Antriebskräften ebenfalls die Normalkräfte definiert einstellen zu können. In diesem Kapitel soll aufgezeigt werden, wie dies möglich ist. Neben der Frage nach dem „Wie?“ ist natürlich auch der resultierende Stellbereich von Interesse. Reicht die Kraft aus, den Stator aus der Ruheposition anzuheben? Oder lassen sich die Kräfte im Arbeitspunkt soweit absenken, dass Translator und Stator nicht weiter angezogen werden?

Für eine unabhängige Regelung von Vortrieb und Luftspalt gilt es zu zeigen, dass beide Kräfte eingestellt werden, ohne dass sie sich gegenseitig beeinflussen.

Die Möglichkeiten der Kraftbeeinflussung sollen an einem realen Motor beispielhaft untersucht werden. Die Motorgeometrie wird in das FEM-Programm FEMAG eingegeben und die je nach Stromvorgabe entstehenden Kräfte werden untersucht. Zunächst werden die Normalkräfte betrachtet und ein Konzept vorgestellt, wie diese eingestellt werden können. Die Funktionsweise der Kraftmanipulation wird an verschiedenen Modellen verdeutlicht. Ebenfalls soll gezeigt werden, wie stark sich die Einstellungen für Antriebs- und Normalkraft gegenseitig beeinflussen.

2.1 Motorgeometrie Beispielmotor

Als Beispiel wird der in [LDI98], [LMTT] vorgestellte Linearmotor einer Containerhandlunganlage betrachtet. Bei dem Motor handelt es sich um eine Synchronmaschine mit einer Erregung durch Permanentmagneten. Die Leiste mit den Permanentmagneten befindet sich an der Unterseite des Fahrzeugs, einem Eisenbahnwaggon.

Die genauen Daten des Linearmotors sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Der in [LDI98] beschriebene Motor besitzt eine Magnethöhe von 13 mm. In Tabelle 2.1 sind noch weitere Magnethöhen aufgelistet, mit denen die bestehende Motorkonfiguration variiert wurde. Diese Motorvarianten wurden ausgewählt, um den Einfluss dieses Entwurfsparameters beobachten zu können. Bei kleineren Luftspalten genügt eine geringere Erregung im Vergleich zu größeren Luftspalten, um gleiche Kräfte zu erzeugen. Mit der Änderung der Magnethöhe beeinflusst man genau die Erregung der Maschine und es wird bereits hier die Abhängigkeit der Kräfte von dem Motormerkmal deutlich. Wie in der Einleitung (Kapitel 1) beschrieben, soll mit der Luftspaltregelung der Einsatz von hochausgenutzten

Maschinen bei entsprechend kleinem Luftspalt ermöglicht werden. Die Ergebnisse der Berechnungen können somit Aufschluss über das Verhalten von Motoren mit kleineren Magnethöhen geben. So kann abgeschätzt werden, ob die entstehenden Antriebs- und Normalkräfte bei diesen Motoren ausreichend groß sind und welchen Wertebereich sie überstreichen.

Motorart	PMSM
Polzahl	14
Polteilung	96 mm
Eisenbreite	107 mm
Statorlänge	1344 mm
Statorjochhöhe	35 mm
Nuthöhe	63 mm
Nutbreite	17,5 mm
Zahnbreite	14,5 mm
Luftspalt	2..50 mm
Strangzahl	3
Zahl der Spulen je Strang	13
Zahl der Windungen je Spule	13
Magnethöhe	4, 7, 10, 13 , 16 mm
Magnetbreite	60 mm
Remanenzflussdichte	1,094 T
Translatorjochhöhe	20 mm

Tabelle 2.1: Geometriedaten Linearmotor

2.2 FEM-Modell

Die Berechnungen der Normal- und Antriebskräfte werden mit dem FEM-Programm FEMAG durchgeführt. Als erstes muss ein Modell des Motors erstellt werden, das die geometrischen Abmessungen und die Materialeigenschaften berücksichtigt. Durch die Eingabe der Materialeigenschaften wird die Sättigung des Materials berücksichtigt. Dies geschieht über die Einbindung von B(H)-Kennlinien der einzelnen Materialien. Die FEM-Berechnung ist damit genauer als analytische Rechnungen, die Sättigungserscheinungen und Streufelder meist vernachlässigen, um den mathematischen Aufwand in Grenzen zu halten.

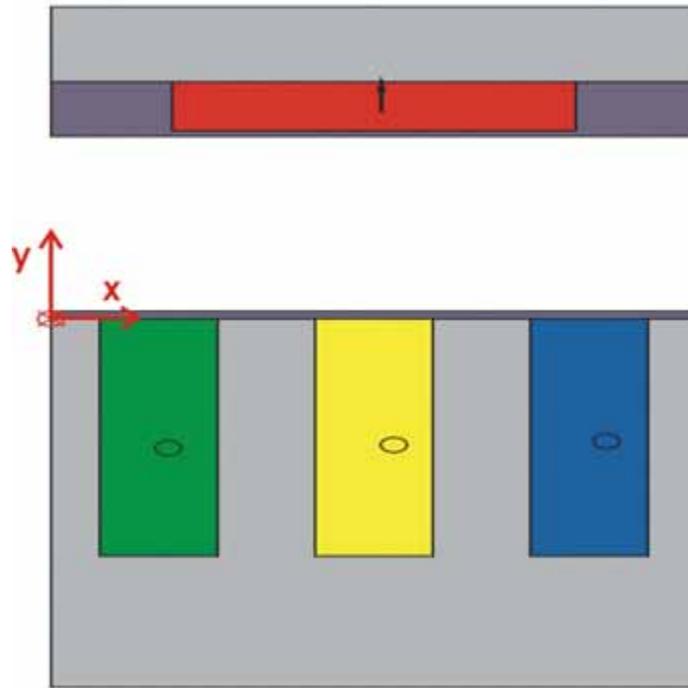


Abbildung 2.1: FEM-Polmodell Linearmotor

Da sich die magnetischen Zustände periodisch wiederholen, genügt für die Berechnungen unter Berücksichtigung der Randbedingungen die Abbildung eines einzelnen Pols.

Da FEMAG lediglich 2-dimensional rechnet, sind nur Modelle zulässig, die eine ausreichende Ausdehnung in z-Richtung, also senkrecht zur Bildebene, besitzen. Andernfalls würden Randeffekte einen zu großen Einfluss auf die Kraftentwicklung haben und die Ergebnisse verfälschen. Laut Tabelle 2.1 besitzt der untersuchte Motor in z-Richtung eine Länge von 107 mm (siehe Parameter Eisenbreite) bei einer Polteilung von 96 mm. Damit verfügt der Motor über eine ausreichende Größe entlang der z-Achse.

FEMAG berechnet die Kräfte in x- und y-Richtung bezogen auf die Längeneinheit mm. Der Grund liegt in der Beschränkung auf das 2-dimensionale. Um die Kräfte auf den Motorpol zu erhalten, sind die Ergebnisse mit der Eisenbreite zu multiplizieren.

Wie aus Abbildung 2.1 ersichtlich ist, entspricht in FEMAG die Kraft in x-Richtung der Antriebskraft und die Kraft entlang der y-Achse der Normalkraft.

Die gesamte Antriebs- bzw. Normalkraft erhält man, indem man die Kräfte des Motorpoles noch mit der Anzahl der Pole multipliziert.

Zur Verifikation der berechneten Kräfte und der Überprüfung der FEM-Berechnung, wurden verschiedene aus [LDI98] bzw. [LMTT] bekannte Kräfte berechnet. Ein Vergleich der bekannten mit den neu berechneten Werten ergab eine gute Übereinstimmung, und die FEM-Berechnungen können somit als korrekt angesehen werden.

Mögliche Fehlerquellen bei der FEM-Berechnung sind eine unpassende Anzahl der Knotenpunkte und damit eine ungeeignete Vernetzung der Geometrie. Durch programminterne Begrenzungen der Zahlenwerte, können die Ergebnisse verfälscht werden. Selbstredend muss auch eine fehlerhafte Eingabe in Betracht gezogen werden, wie etwa die falsche Eingabe der Randbedingungen oder die Auswahl unpassender Materialeigenschaften, insbesondere der B(H)-Kennlinie.

2.3 Normalkräfte der permanentmagneterregten Synchronmaschine

Zunächst wurden die allein durch die Permanentmagnete auftretenden Normalkräfte berechnet. Abbildung 2.2 stellt die Kräfte über dem Luftspalt dar, der in 1 mm-Schritten von 50 mm auf 2 mm verkleinert wurde. Weiterhin wurden verschiedene Magnethöhen h_m von 4, 7, 10, 13 und 16 mm verwendet.

Erwartungsgemäß entstehen bei den Motorvarianten mit größeren Magnethöhen auch größere Normalkräfte. Allen Kurven gemeinsam ist jedoch der starke Anstieg der Kräfte hin zu kleinen Luftspalten. Dieses Verhalten kann über die Kraftberechnung in ferromagnetischen Kreisen bestimmt werden [Ca05], [Eck82]. Über die partiellen Ableitungen der magnetischen Energie im Luftspalt lassen sich die Kräfte bestimmen. Für den Betrag der Normalkraft gilt:

$$F_N = \frac{B_\delta^2 \cdot A}{2 \cdot \mu_0} = \frac{h_M^2 \cdot B_r^2 \cdot A}{2 \cdot \mu_0 \cdot (\delta + h_M)^2} \quad (2.1)$$

Gleichung (2.1) gilt für einfache Eisenkreise mit einer Erregung durch einen Permanentmagneten mit der Remanenzinduktivität B_r und einer konstanten Querschnittsfläche A . Es ist ersichtlich, dass die Normalkraft F_N umgekehrt proportional zum Quadrat des Luftspaltes δ ist. Der Verlauf der Kurven mit dem starken Anstieg bei kleinen Luftspalten kann somit auch analytisch bestätigt werden.

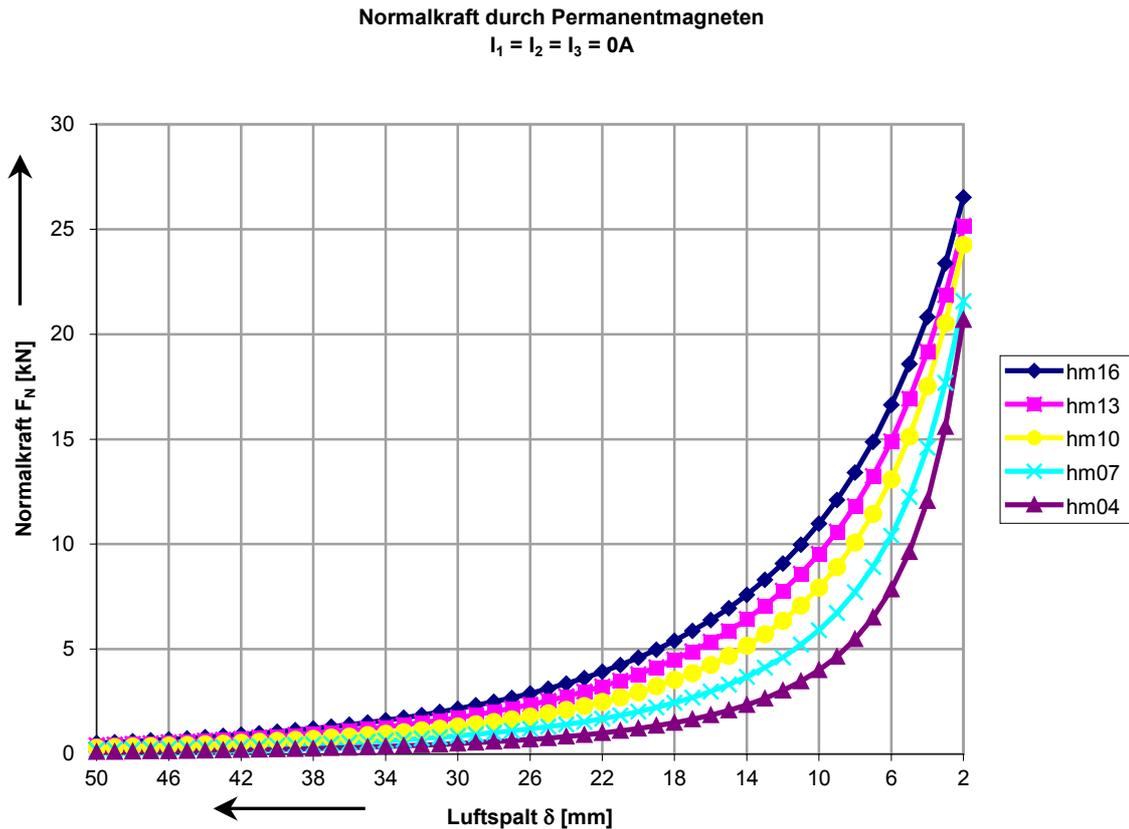


Abbildung 2.2: Normalkraft F_N ($I_1 = I_2 = I_3 = 0A$) für verschiedene Magnethöhen h_M

Die Normalkräfte reichen von ca. 1 kN bei einem Luftspalt von 50 mm bis teilweise über 25 kN bei dem kleinsten Luftspalt von 2 mm. Diese Kräfte müssen durch Luftspaltregelung oder entsprechende Änderungen in der Motorgeometrie kompensiert werden. Unkompensiert lasten diese Kräfte ganz auf dem Fahrzeug, dieses muss dann entsprechend steifer ausgelegt oder mit entsprechend weniger Nutzlast beladen werden.

Für die Anwendung ist weiterhin die Gewichtskraft des Stators zu berücksichtigen. Diese muss während des Anhebevorgangs zusätzlich überwunden werden. Beim Abbremsen und im Arbeitspunkt bei kleinen Luftspalten unterstützt sie aber die Regelung, da überwiegend anziehende Normalkräfte kompensiert werden müssen.

2.3.1 Normalkräfte bei translatorischer Bewegung

Interessant bei der Betrachtung der Normalkräfte ist auch der Einfluss der Nutung des Stators. Translator und Stator werden dazu gegeneinander verschoben, was einer translatorischen Bewegung entlang der Richtung der Vortriebskraft gleichkommt. Für die Berechnung werden wiederum die Strangströme zu Null gesetzt.