

SCHUBSTARKER PM-ERREGTER SYNCHRONER LINEARMOTOR ZUR MASSENBESCHLEUNIGUNG

S. O. Siems, J. Meins, C. Deeg, H. Mosebach

(Deutsche Kurzfassung des LDIA 2001 - Beitrags: "High Thrust Permanent Magnet Excited Linear Synchronous Drive for Mass Acceleration")

1 EINLEITUNG

In der modernen Antriebstechnik besteht in vielen Anwendungsgebieten der Bedarf nach einer linearen oder quasilinearen Bewegung. Wird in solchen Fällen ein rotierender Antrieb in Kombination mit einem entsprechenden Getriebe eingesetzt, so ergeben sich hieraus mitunter Einschränkungen in Bezug auf die Dynamik und Leistung. Auch die Forderung nach hoher Zuverlässigkeit bei gleichzeitig geringem Wartungsaufwand lässt sich so nicht immer erfüllen.

Am IMAB wurde für solche Zwecke ein permanentmagneterregter Synchronlinearantrieb mit hoher Kraftdichte entwickelt. Er eignet sich zum Antrieb von Fahrzeugen, die auf Schienen oder anderen Einrichtungen geführt werden. Ziel der Entwicklung war ein passiver beweglicher Teil (Translator) mit niedrigem Gewicht, um die für die Beschleunigung der Eigenmasse erforderliche Energie gering zu halten.

2 AUSWAHL DES ANTRIEBS

Vor der eigentlichen Festlegung des Antriebsprinzips wurden verschiedene Technologien miteinander verglichen und schließlich die beiden aussichtsreichsten Varianten einer genaueren Betrachtung unterzogen. Es sind dies der lineare Asynchronmotor (LIM) und der lineare Synchronmotor (LSM). Im Sinne einer hohen Vortriebskraft beschränkt sich die Betrachtung dabei auf zweiseitige Anordnungen (**Bild 1**).

Da dem Vergleich eine statorseitige Ähnlichkeit zugrunde gelegt werden kann, sind Polteilung, Luftspalt und Strombelag für beide Motoren gleich groß gewählt worden. Der Wert für die Polteilung beträgt 100 mm. Er wird im wesentlichen durch die angestrebten Geschwindigkeiten von 10 m/s in Verbindung mit den Takt- und Grundwellenfrequenzen heutzutage industriell verfügbarer Um-

richter bestimmt. Infolge der nicht zuletzt aus Kostengründen unvermeidlichen Toleranzen und der Notwendigkeit, den Translator mit einer Schutzschicht gegen Umwelteinflüsse zu versehen, fällt der magnetisch wirksame Luftspalt mit 10 mm vergleichsweise groß aus. Der gewählte Statorstrombelag von 100 kA/m liegt im mittleren Bereich. Er genügt den thermischen Anforderungen und bietet noch ein gewisses Wachstumspotential.

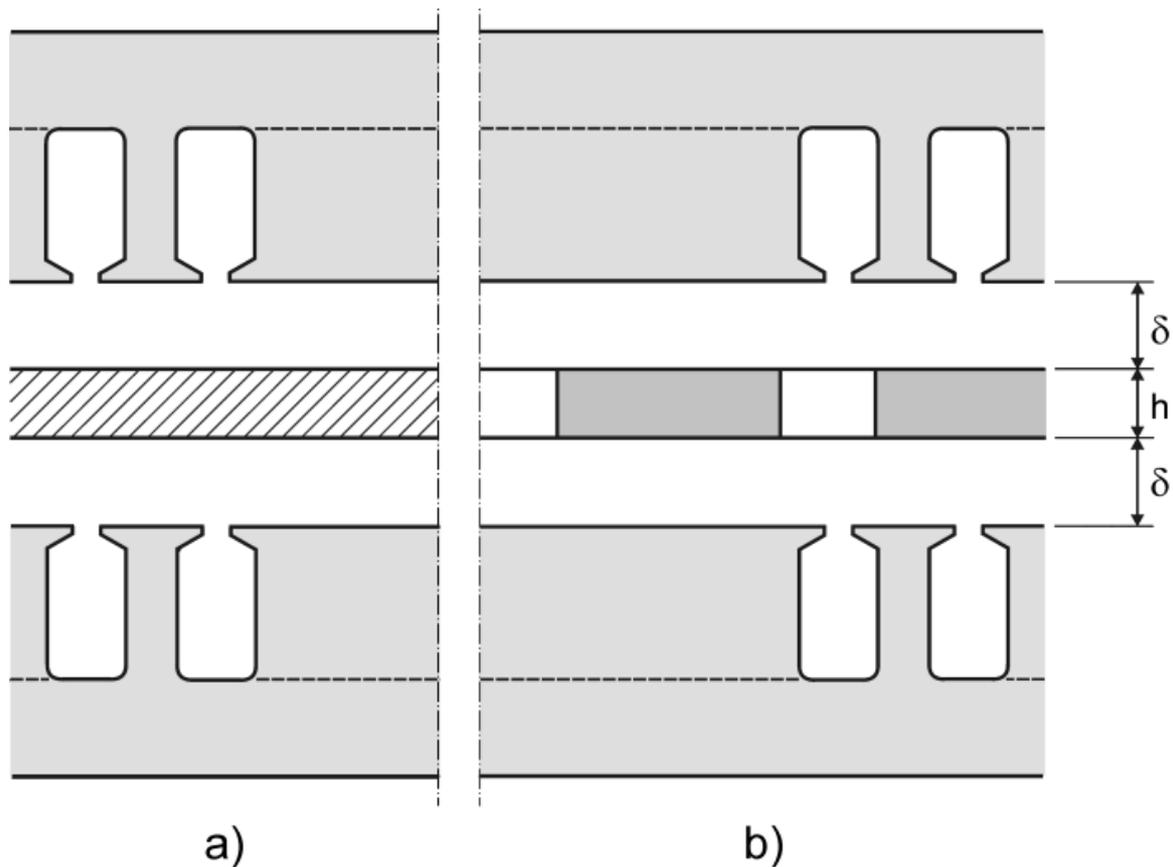


Bild 1: Doppelseitige Linearmotoranordnung

a) LIM b) LSM

Translatorseitig wird im Falle des Asynchronantriebs eine homogene Kupferschicht mit idealen Kurzschlussverbindern angenommen, so dass sich rein rechteckförmige Wirbelstrompfade ausbilden. Der Translator des Synchronantriebs besteht aus modernen Magneten (NdFeB) mit einer Polbedeckung von $2/3$.

Die vorstehende Wahl der Parameter bietet den signifikanten Vorteil, dass lediglich ein Parameter, nämlich die Translatorhöhe, im Rahmen der Suche nach einem optimalen Konzept zu variieren ist. Als Maßstab dient hierbei die erzielbare Vortriebskraftdichte, die im Rahmen einer zweidimensionalen analy-

tischen Feldberechnung gewonnen wird. Die Auswertung der entsprechenden Gleichungen ergibt die nachstehend dargestellte Situation (**Bild 2**).

Für den Asynchronantrieb ergeben sich mehrere Kurven, die jeweils für einen bestimmten Schlupfwert gelten. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der interne Wirkungsgrad einer Asynchronmaschine wesentlich vom Schlupf beeinflusst wird ($\eta_{int} = 1 - s$) wird die Problematik des linearen Asynchronantriebs deutlich: Hoher Schub wird vorzugsweise bei hohem Schlupf und damit bei schlechtem Wirkungsgrad erreicht. Verschärft wird die Situation durch die Tat

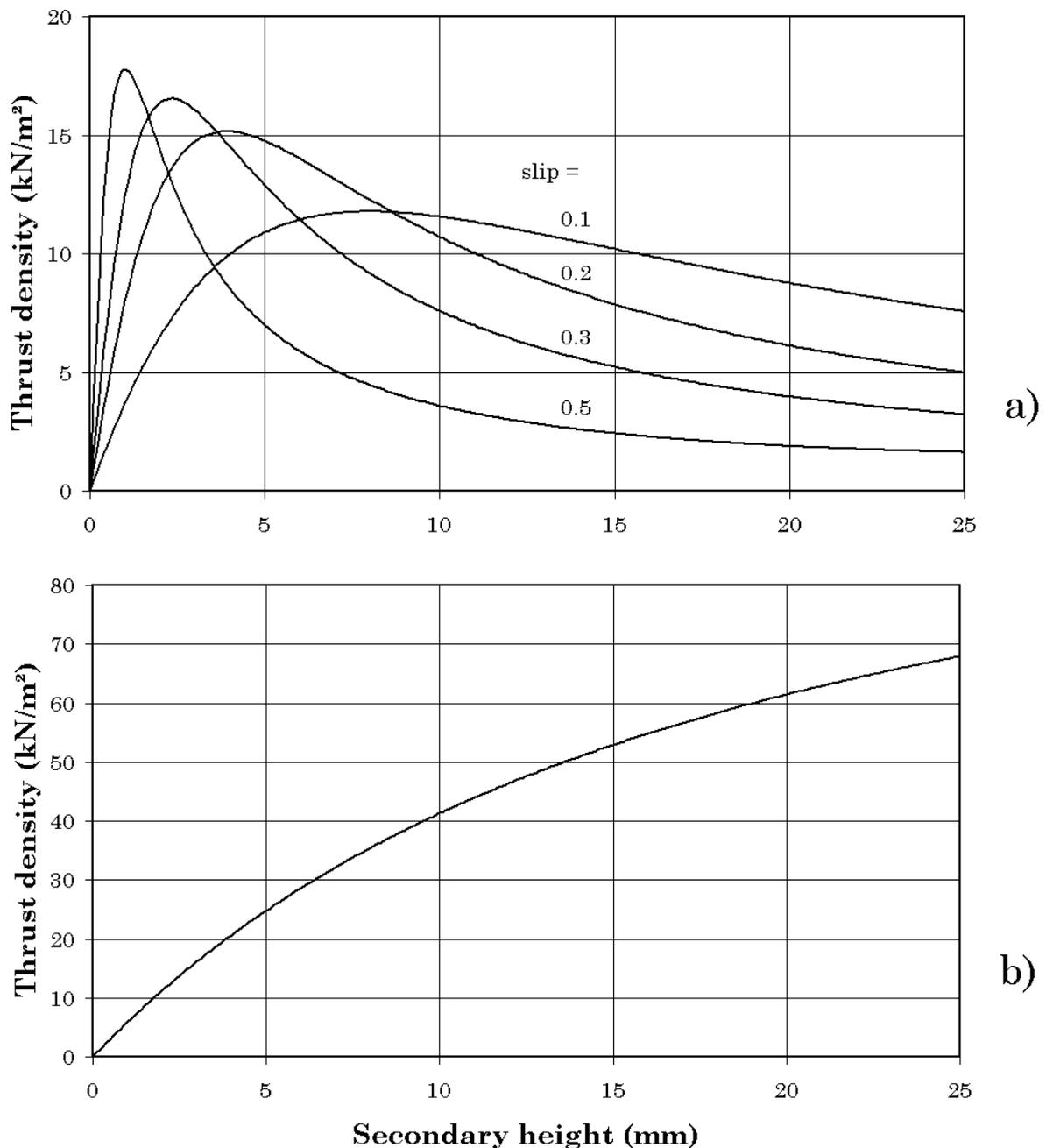


Bild 2: Vergleich der Vortriebskraftdichten

a) LIM b) LSM

sache, dass sich geringe Translatorhöhen vorteilhaft auf die Schubbildung auswirken, jedoch nur geringe mechanische Stabilität und geringe Wärmekapazität zur Aufnahme von Leistungsspitzen bieten.

Für den Synchronantrieb ergibt sich eine einzelne Kraftdichtekurve, die monoton mit der Magnethöhe ansteigt. Für praktikable Translatorhöhen von 20..25 mm ergeben sich Vortriebskraftdichten von ca. 60..70 kN/m², die somit etwa eine Größenordnung über den Werten für den Asynchronmotor liegen. Daher wurde dieses Prinzip für den am Institut entwickelten Antrieb verwendet.

3 AUFBAU DES ANTRIEBS

Der Stator umfasst mehrere Module, von denen jedes aus zwei Hälften besteht, zwischen denen sich der Translator bewegt (**Bild 3**). Dieser wiederum lässt sich leicht in die Struktur des zu beschleunigenden Fahrzeugs integrieren.

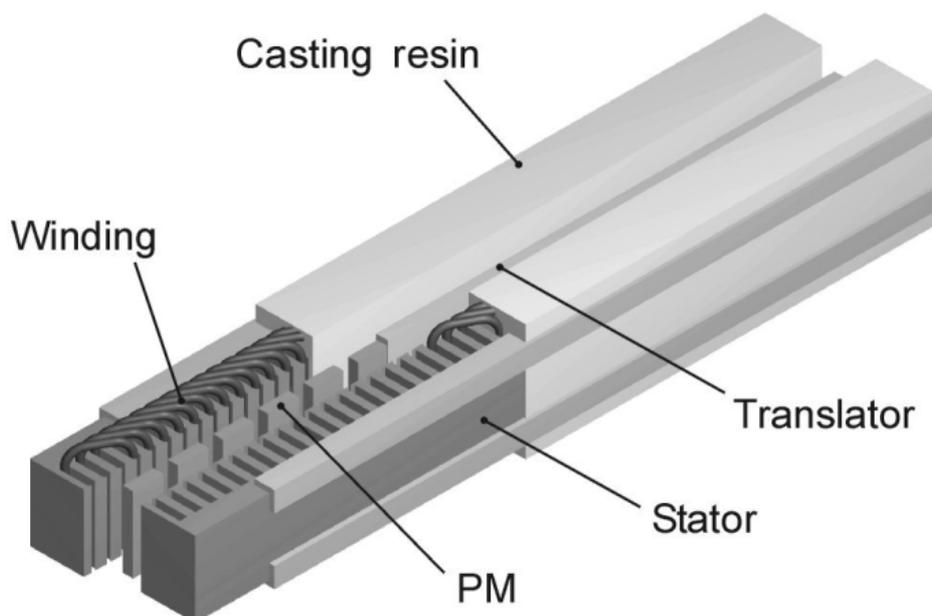


Bild 3: Motormodul

Es ist keine Energieübertragung auf den beweglichen Teil erforderlich, so dass der Wartungsaufwand gering gehalten werden kann. Außerdem lassen sich die einzelnen Elemente leicht kapseln, um sie so vor Umwelteinflüssen zu schützen. Die Konstruktion der einzelnen Komponenten wurde unter Berücksichtigung zahlreicher Fertigungs- und Handhabungsaspekte ausgeführt. So bauen die Statorn auf identischen Blechschnitten auf und sind mit identischen Wicklungen (**Bild 4**) versehen.

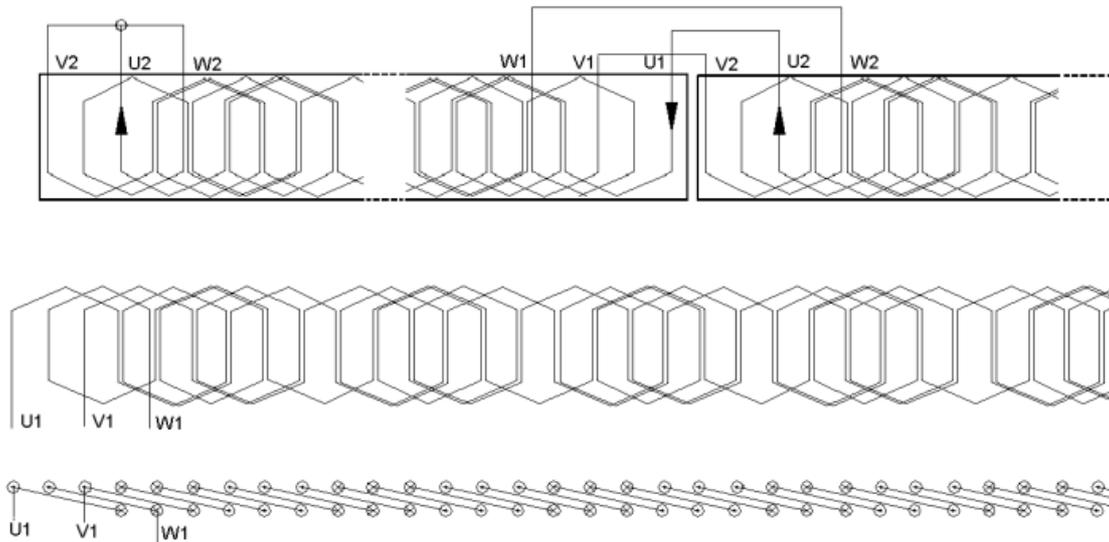


Bild 4: Wicklungsaufbau und Segmentverbindung

Außerdem bestehen mehrere Möglichkeiten der Modulverschaltung, so dass unterschiedliche Konfigurationen leicht an die zur Verfügung stehenden Umrichter angepasst werden können.

Der Translator besteht aus einem harzgetränktem Glasfaserlaminat mit eingebetteten Permanentmagneten (PM). Durch diesen eisenlosen Aufbau ist er vergleichsweise leicht, was einen Vorteil im Hinblick auf die erzielbare Dynamik darstellt. Als weiteres Merkmal resultiert hieraus eine geringe Maschinenreaktanz, die zu einer niedrigen Bemessungsleistung des Umrichters führt.

4 SYSTEMDESIGN UND OPTIMIERUNG

Im Sinne einer optimalen Antriebslösung dürfen die Überlegungen nicht auf den Motor beschränkt bleiben. Es ergibt sich die Notwendigkeit einer Betrachtung des Gesamtsystems, um dessen Eigenschaften optimal auf die gestellte Aufgabe hin anpassen zu können. Hieraus abgeleitete Fragestellungen sind:

- Wie viele Motormodule werden entlang des Fahrwegs benötigt?
- Wie müssen der Abstand der Module und die Translatorlänge im Sinne minimaler Kraftschwankungen ausgeführt werden?
- Wie hoch ist der maximal erforderliche Schub?
- Wie hoch ist die maximal erforderliche Geschwindigkeit?
- Wie können Nennbetriebspunkt und Feldschwächbereich definiert werden?
- Wie viele Fahrzeuge müssen gleichzeitig angetrieben werden, und wie kann dies mit einer minimalen Anzahl von umschaltbaren Umrichtern erreicht werden?

Um diese Fragen beantworten zu können, wurden das mechanische und das elektrische System einer Gesamtsimulation auf Basis der Bewegungsgleichungen und verschiedener Motor-/Umrichterkonfigurationen unterworfen.

Der Motor selbst wurde mittels analytischer Methoden und numerischer Feldberechnungen ausgelegt. Ausgehend von einem Startpunkt wurden verschiedene Parameter (Polteilung, Nut-/Zahnform, PM-Abmessungen, Luftspalt, Wicklung) variiert, um so schließlich zu einem optimalen Entwurf zu gelangen (**Bild 5**).

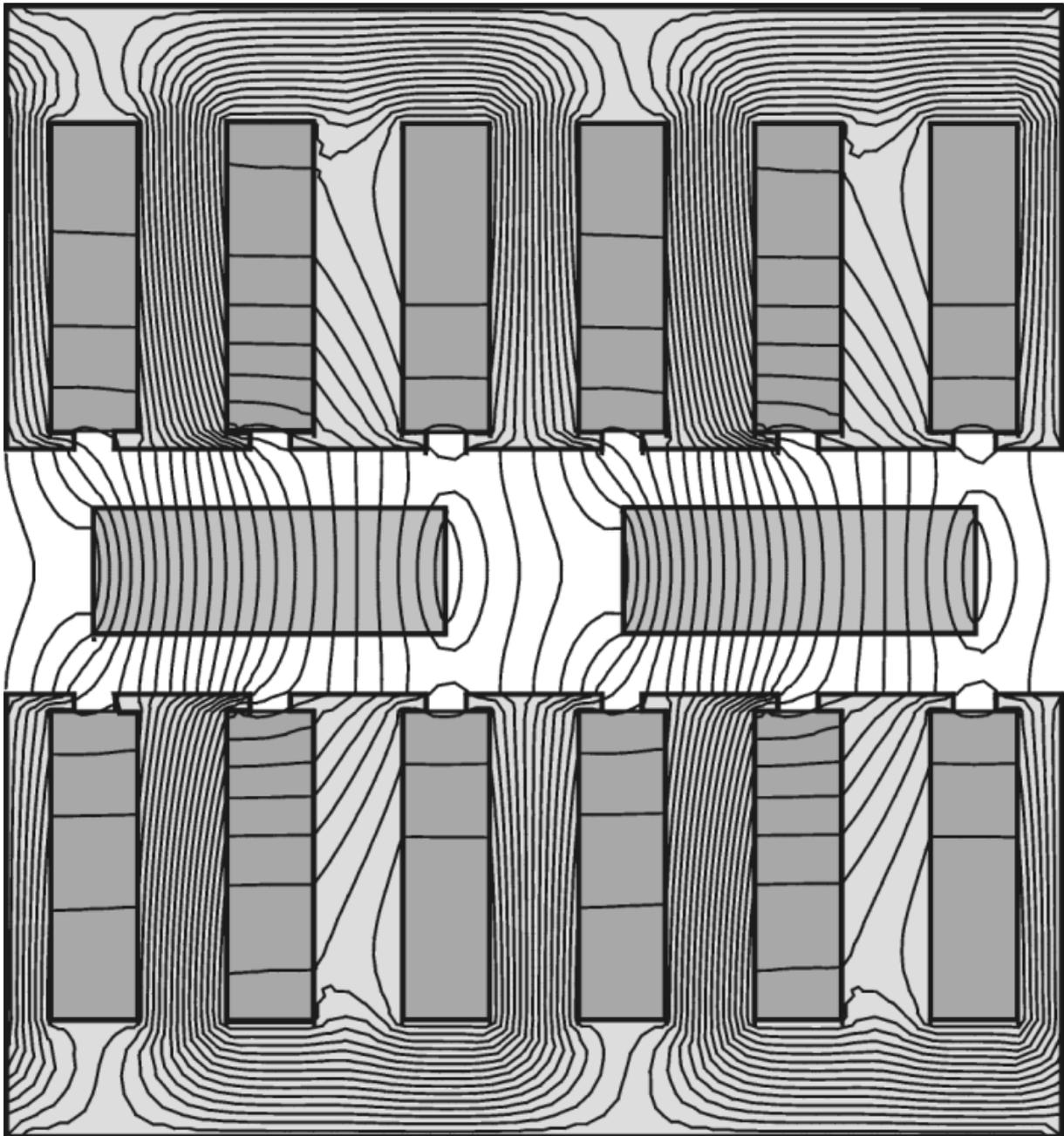


Bild 5: Feldverteilung

5 REGELUNG

Im Rahmen dieses Projekts wurde die zum Betrieb des Motors erforderliche Regelung für einen industriell verfügbaren Umrichter adaptiert und an die speziellen Erfordernisse des Linearmotors angepasst. Es handelt sich hierbei um eine feldorientierte Regelung in bewegten Rotorkoordinaten, bei der Frequenz, Phasenlage und Amplitude der sinusförmigen Statorströme passend zur Lage des Rotors (Translators) eingepreßt werden (**Bild 6**). Wesentlicher Bestandteil dieser Regelung ist die Zerlegung des aus den drei Strangströmen gebildeten Stromzeigers in zwei Komponenten und deren anschließende Transformation in ein mit dem Rotor (Translator) umlaufendes Koordinatensystem. Für den stationären Zustand resultieren dann Gleichgrößen, mit denen sich Drehmoment und Feldschwächung ähnlich wie bei Gleichstrommotoren getrennt voneinander einstellen lassen.

Wie bei rotierenden Synchronmaschinen muss die Rotor-/Translatorlage über ein geeignetes Sensorsystem an die Regelung übermittelt werden. Während im rotierenden Fall hierfür Resolver oder Inkrementalgeber am freien Wellenende eingesetzt werden, finden bei dieser Anwendung Wirbelstromsensoren Verwendung. Sie sind für diese Aufgabe sehr gut geeignet, da sie robust und kostengünstig sind. Zwei Paare dieser Sensoren sind so am Stator befestigt, dass immer mindestens ein Paar im Eingriff ist, um die jeweilige Position zu übermitteln. Die Anordnung erfolgt um eine halbe Polteilung versetzt, damit die Bewegungsrichtung erkannt werden kann. Die Wirbelstromsensoren reagieren auf kleine Aluminiumblöcke, die am Führungsschwert des Translators befestigt sind.

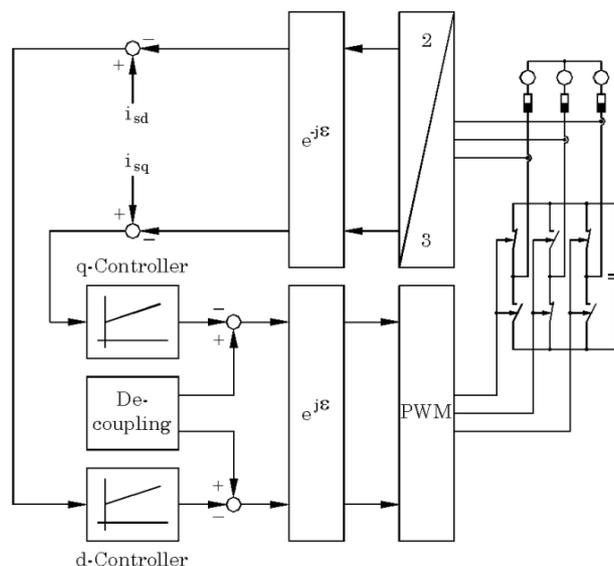


Bild 6: Feldorientierte Regelung

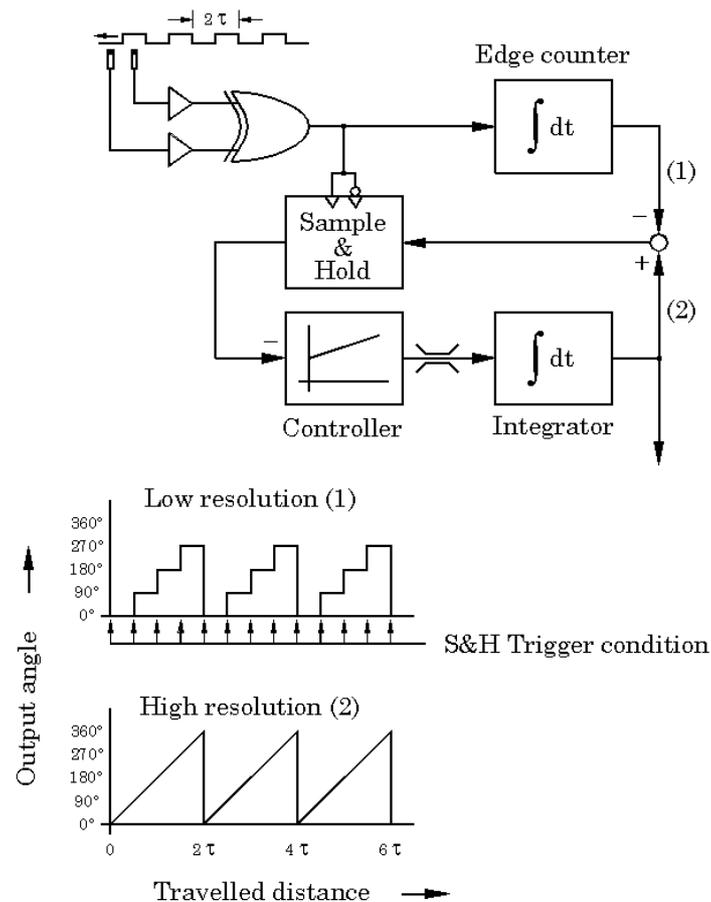


Bild 7: Digitale PLL

Ohne Interpolation liefern die Sensoren lediglich eine Auflösung von zwei Bit auf zwei Polteilungen, was für eine hinreichend genaue Einprägung der Strombelagswelle nicht ausreichend ist. Deswegen wird eine Erhöhung der Auflösung durch den Einsatz einer digitalen Phase Locked Loop erzielt (**Bild 7**).

Diese PLL stellt ein Zusatzmodul für den Umrichter dar, so dass bei geeigneter Schnittstellendefinition die Notwendigkeit einer getrennten Behandlung von rotierender Maschine (Resolver/Inkrementalgeber) und Linearantrieb (Wirbelstromsensoren mit PLL) entfallen kann.

6 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Zur Verifizierung der berechneten Ergebnisse wurden zwei komplette Motormodule gefertigt. Außerdem wurde ein langer rotierender Ausleger (Radius: 5 m) installiert, an dessen einem Ende die Translatorelemente befestigt wurden und an dessen anderem Ende Gegengewichte für einen Kraftausgleich sorgen (**Bild 8**). Er ersetzt die lineare Bewegung durch einen kreisförmigen quasi-linearen Weg, der kontinuierliche Tests bei hohen Geschwindigkeiten ermöglicht.

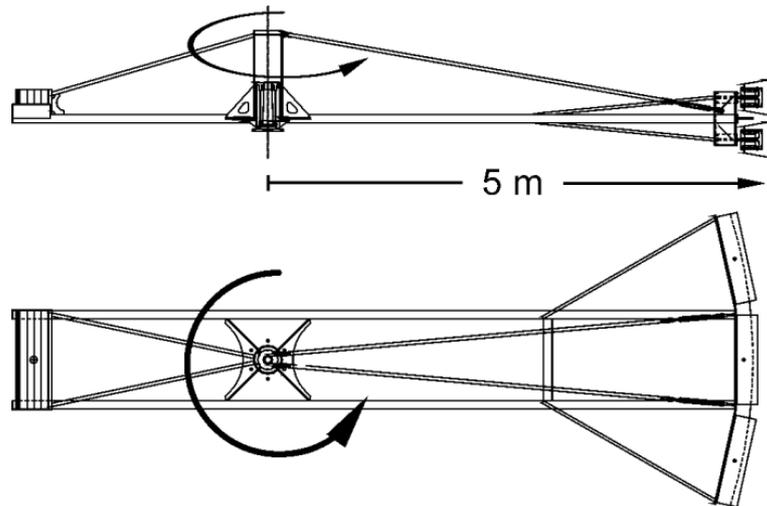


Bild 8: Ausleger mit Translatorsegmenten

Durch diesen Aufbau im Maßstab 1:1 (**Bild 9 und 10**) konnten realitätsnahe statische und dynamische Tests gefahren werden, die zur Ermittlung der Feldverteilung im Luftspalt, des Schubs und der Motorkenndaten, sowie zur Untersuchung der Regelung dienten. Die berechneten Daten wurden dabei mit guter Übereinstimmung verifiziert. Jedes der beiden Motormodule liefert eine Schubkraft von etwa 16 kN.

Insgesamt konnte die Eignung des PM-erregten synchronen Linearantriebs für die Beschleunigung von Massen in vollem Umfang bestätigt werden.



Bild 9: Statoraufbau

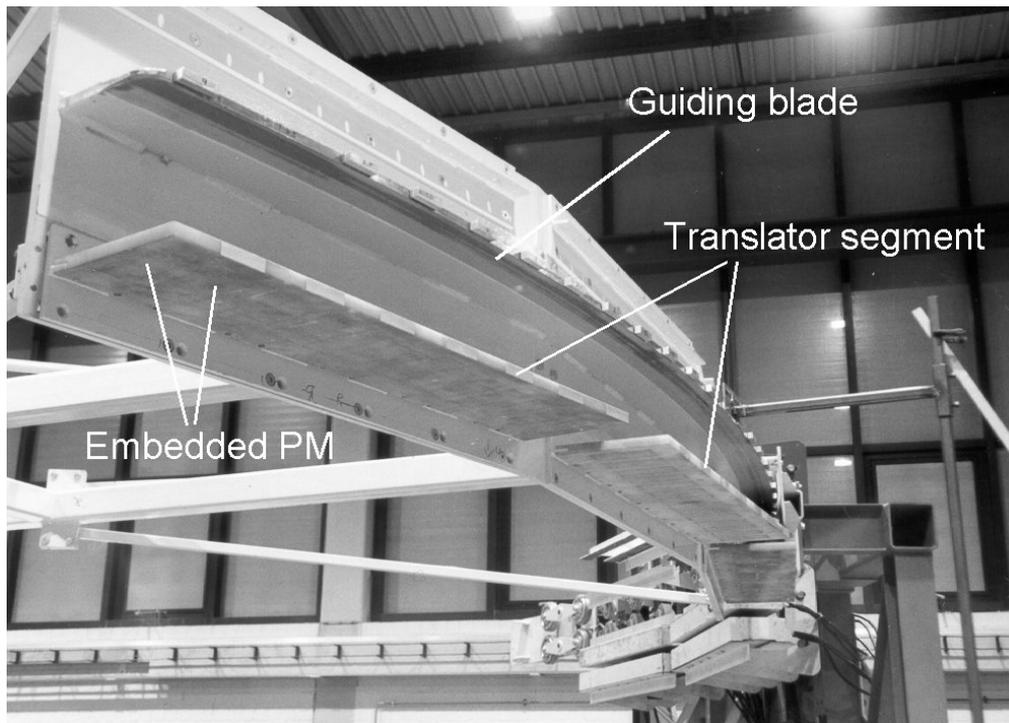


Bild 10: Translatorsaufbau