

**Geometrisch optimierte Rastkräfte
bei Lineardirektantrieben**

**Geometrical optimized cogging forces
at linear direct drives**

P. Joerges, W. Schinköthe (IKFF)

Beitrag zur

**8. ETG/GMM-Fachtagung
Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik**

Würzburg

23. September 2010

Geometrisch optimierte Rastkräfte bei Lineardirektantrieben

Geometrical optimized cogging forces at linear direct drives

Dipl.-Ing. Philipp Joerges, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF) Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart, Deutschland, E-mail: ikff@ikff.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Rastkräfte sind Reluktanzkräfte, die vorzugsweise zwischen den Grenzen des Eisenrückschlusses des Primärteils und den Grenzen der Magnete wirken. Als Störkraft sind sie im Betrieb von Lineardirektantrieben verantwortlich für Schwankungen in den Schubkräften und Verfahrgeschwindigkeiten sowie für eine begrenzte Positioniergenauigkeit. Durch gezielte Modifikation der Geometrien oder/und der Regelungsstruktur können Rastkräfte bei asymmetrischen Lineardirektantrieben reduziert und damit eine höhere Laufruhe und eine bessere Positioniergenauigkeit erreicht werden. Vereinzelt findet man in der Literatur Hinweise, wie Rastkräfte verringert werden können. Systematische Einteilungen der einzelnen Maßnahmen und deren Auswirkung auch auf die Dynamik von eisenbehafteten Linearmotoren sind selten zu finden und rücken derzeit vermehrt in den Vordergrund.

Die erfolgversprechendsten geometrischen Modifikationsmöglichkeiten wurden systematisch isoliert und mittels Finite-Element-Methoden durchvariiert. Die optimierten Rückschlussvarianten wurden aufgebaut und durch Messung überprüft. Die Maßnahmen und Ergebnisse der geometrischen Optimierung der Rastkräfte werden im Vortrag ausführlich dargestellt und kurz den regelungstechnischen Verfahren gegenüber bewertet. Der Fokus des Vortrages liegt hierbei auf der geometrischen Optimierung der Rückschlüsse.

Abstract

Cogging Forces are reluctance forces, which are acting between the borders of the primary yoke and the borders of the magnets. Because these forces are disruptive forces, they are responsible for fluctuations in the propulsive force and in velocity as well as they are responsible for a limited positioning accuracy during the movement of linear direct drives. With the help of a targeted modification of the geometry and/or control structure, cogging forces can be reduced at linear direct drives and a higher running smoothness and a higher positioning accuracy can be achieved. Sporadically you can find references how to reduce cogging forces, but a systematic classification of the different methods and its effects on the dynamic are rare for ferrous linear motors and come more and more to the fore.

The most promising geometrical methods of modification have been systematically isolated and varied by means of Finite-Element-Methods. The ideal yoke model has been assembled and verified by measurement. The arrangements and the results of the geometrical optimization of the cogging forces are presented in the recitation in detail. The results will also be briefly compared to the control techniques, but the focus is the geometrical optimization of the yokes.

1 Einleitung

Rastkräfte sind als Reluktanzkräfte Störkräfte, die zwischen den Eisenkanten und den Magnetkanten wirken. Sie führen zu Schwankungen in den Schubkräften und Verfahrgeschwindigkeiten, wirken sich also auf die Dynamik des Antriebes aus und verschlechtern zudem die Positioniergenauigkeit und die Bahnfolgenauigkeit.

Sie können geometrisch mittels Finite-Element-Methode (FEM) optimiert werden. Zudem besteht die Möglichkeit, Rastkräfte durch eine geeignet ausgelegte Regelstruktur zu kompensieren.

Grund genug, Rastkräfte näher zu untersuchen und die geometrischen, wie auch die regelungstechnischen Kompensationsmöglichkeiten einander gegenüber zu stellen und miteinander zu vergleichen. Da es eine Vielzahl an geometrischen Modifikationsmöglichkeiten gibt, sollten die markantesten und erfolgversprechendsten Einflussmöglichkeiten erfasst und validiert werden. Zudem ist das Be-

wegungsverhalten dynamischer Positionierprozesse unter der Berücksichtigung von Rastkräften zu analysieren.

Ziel ist, es Konstruktions- und Steuerungsparadigmen abzuleiten, um Lineardirektantrieben eine möglichst gute Dynamik bei gleichzeitig hoher Positioniergenauigkeit zu verleihen.

2 Rastkräfte

Bild 1 stellt einen möglichen Wirkungsbereich der Rastkraft bei einem Zahnspulentrückschluss zwischen dessen Primärteil und dem magnetbesetzten Sekundärteil dar. Rastkräfte, im Englischen auch als „cogging forces“ bezeichnet, sind abhängig von der relativen Position des Läufers zu den Permanentmagneten und vom Motorstrom unabhängig. In eisenlosen bewegten Motorkomponenten können sie vernachlässigt werden. Durch zielgerichtete geometrische Parametervariation sind sie reduzierbar und durch regelungstechnische Verfahren zu kompensieren.

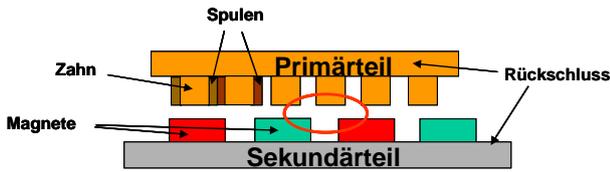


Bild 1 Eisenbehäfteter linearer Zahnspulendirektantrieb

Da Rastkräfte periodisch wiederkehrend sind, können sie mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) identifiziert und als Fourierreihe dargestellt werden.

Wie eingangs erwähnt, führen sie zu einer Verschlechterung der Bahnfolgegenauigkeit und der Positioniergenauigkeit. Auch sind Geschwindigkeitsschwankungen, die zu Instabilitäten und Schwingungen führen, festzustellen. Gerade bei geringen Geschwindigkeiten sind die Schwankungen besonders groß, da hier der Motorstrom und damit die Schubkräfte kleiner sind, die Rastkräfte aber unverändert wirken. Nichtlinearitäten sind die Folge. Jedoch können Rastkräfte auch erwünscht sein, jeder Schrittmotor nutzt das Prinzip der Reluktanz. So bleibt ein rastkraftbehäfteter Motor im unbestromten Zustand an bestimmten Positionen stehen und hält den Läufer bis zu einer gewissen Belastung.

3 Vorgehensweise

Als Ausgangsuntersuchungen wurden die zahlreichen geometrischen Einflussmöglichkeiten zunächst simulativ untersucht und auf die viel versprechendsten rastkraftreduzierenden geometrischen Modifikationsmöglichkeiten reduziert. Die simulativ als rastkraftarm bewerteten Varianten wurden an einem eigens dafür entwickelten Rastkraftprüfstand durch Messung der Schub- und Rastkräfte validiert.

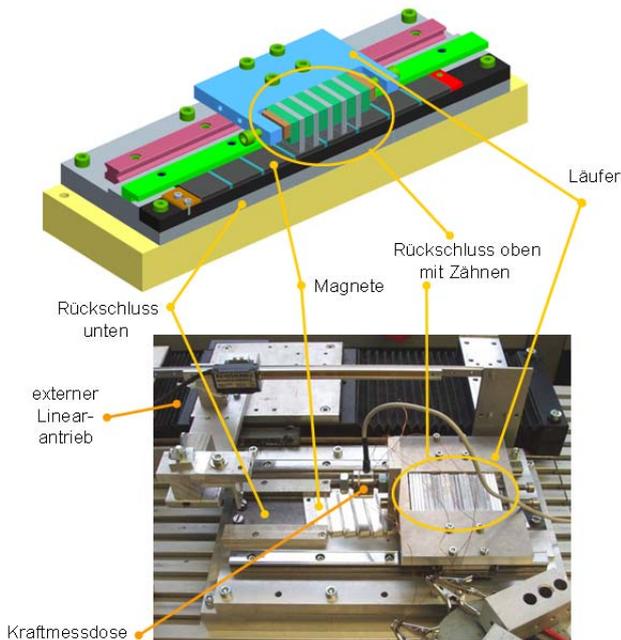


Bild 2 Schnittansicht durch den Rastkraftteststand und realer Rastkraftteststand

Der Rastkraftteststand **Bild 2** besteht aus einem verfahrbaren Gestell, in das beliebige Primärteile (Rückschluss mit Wicklung) eingehängt und untersucht werden können. Hierbei wird der zu untersuchende Läufer bestromt oder unbestromt mit Hilfe eines zweiten rastkraftfreien Linearantriebs über seine Magnete hinweg bewegt. Mit Hilfe einer Zugdruckmessdose werden die zugehörigen Schub- oder Rastkräfte ermittelt. Die einzelnen geometrischen Effekte wurden erfasst und bewertet. Ausschlaggebend sind beispielsweise die Rückschlusslänge, eine geeignete Schrägung des Rückschlusses, also der Schrägungswinkel, bei Nutung der Nutenwinkel, die Nutbreite u.v.m. Die gewonnenen Daten dienen als Auslegungsbasis zweier neuer Rückschlüsse, auf die im Folgenden weiter eingegangen wird.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Geometrievariation

Beispielhaft wurde ein dreisträngiger Flachspulläufer geometrisch Stück für Stück variiert, bis ein Rastkraftminimum von 1,3 N anstatt der anfänglichen 12,3 N ermittelt wurde. Ein zweiter Rückschlusstyp, ein Zahnspulentrückschluss, der höhere Schubkräfte liefert, wurde ebenfalls geometrisch mittels FEM ausgelegt, optimiert und aufgebaut. Die hier ermittelte Rastkraft liegt simulativ bei 3,7 N, real allerdings bei 5,2 N. Die beiden Rückschlüsse sind in **Bild 3** nebeneinander dargestellt. Linker Hand ist der optimierte Flachspulläufer und rechter Hand der optimierte Zahnspulläufer zu sehen.

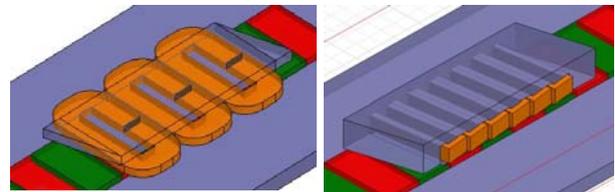


Bild 3 Optimierter Flachspul- und Zahnspulläufer

Das **Bild 4** zeigt den zugehörigen Schub- und Rastkraftverlauf des noch nicht optimierten Flachspulläufers über



Bild 4 Schub- und Rastkraftverlauf des nicht optimierten Flachspulläufers

eine Verfahr­länge von 100 mm. Dies entspricht einer Länge von vier Magnetenlängen, also zwei magnetischen Perioden. Die Periodizität ist leicht zu erkennen. Deutlich sind die hohe Rastkraft und der damit verbundene wellige Schubkraftverlauf zu erkennen. Einmal wirkt die Rastkraft mit und einmal gegen die Schubkraft. Eine hohe Schubkraftwelligkeit und auch Geschwindigkeitswelligkeit sind die Folge. Betrachtet man hingegen den optimierten Läufer, ist eine deutliche Verbesserung im Läuferverhalten zu erkennen. Die Schubkraftwelligkeit ist bei gleicher Bestromung erheblich reduziert, **Bild 5**.

RS 139,5mm geschrägt FSL2, 25mm, 3 Stränge

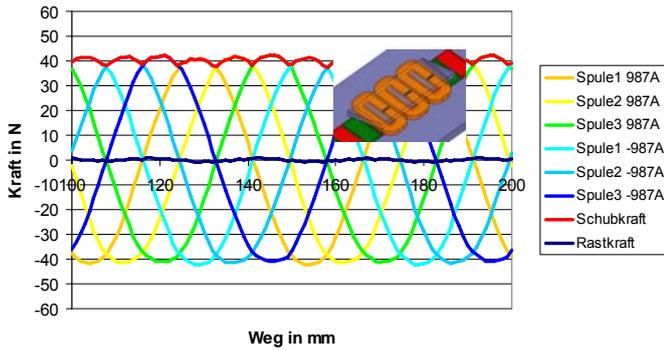


Bild 5 Schub- und Rastkraftverlauf des optimierten Flachspulläufers

Vergleicht man jeweils die simulierten mit den gemessenen Schubkraftkurven des Ausgangsflachspulläufers, Rückschlusslänge 127,5 mm, und des optimierten geschrägten Flachspulmotors, Rückschlusslänge 139,5 mm, kann eine sehr gute Übereinstimmung in den gewonnenen Mess- und Simulationsdaten festgestellt werden, siehe auch **Bild 6** und **Bild 7**.

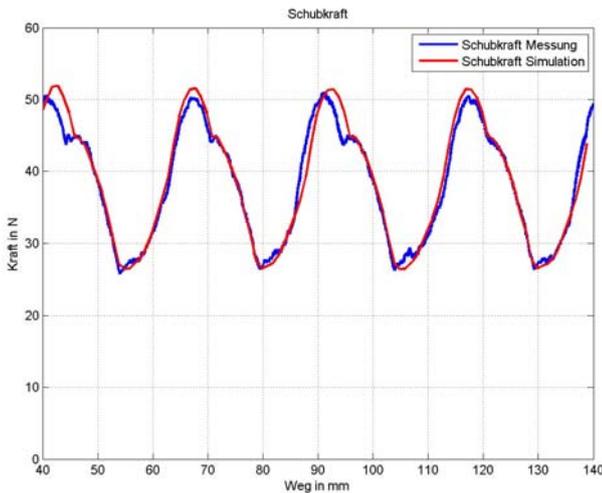


Bild 6 Vergleich des simulierten und des realen Schubkraftverlaufes des Ausgangsflachspulläufers mit 127,5 mm

Deutlich ist zu erkennen, wie die maximale Schubkraft sinkt und die minimale Schubkraft durch die Rastkraftreduzierung angehoben wird. Eine geringere Schubkraftwelligkeit ist die Folge.

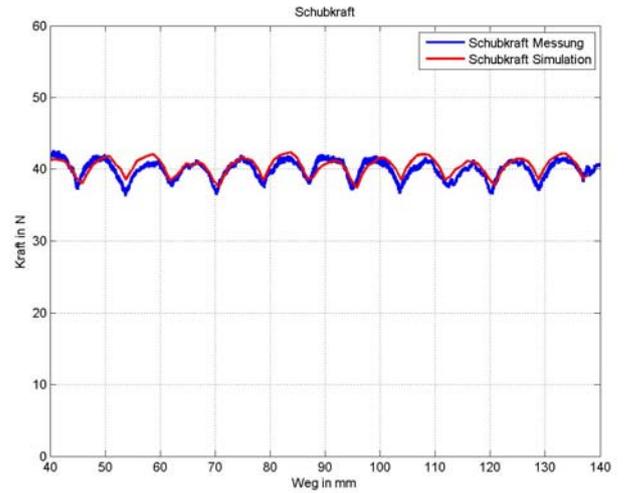


Bild 7 Vergleich des simulierten und des realen Schubkraftverlaufes des optimierten Flachspulläufers mit 139,5 mm

Vergleicht man die simulierten Schubkraftwerte mit den gemessenen Schubkraftwerten des optimierten asymmetrischen Zahnspulenrückschlusses kann hier ebenfalls eine gute Übereinstimmung festgestellt werden, siehe **Bild 8**.

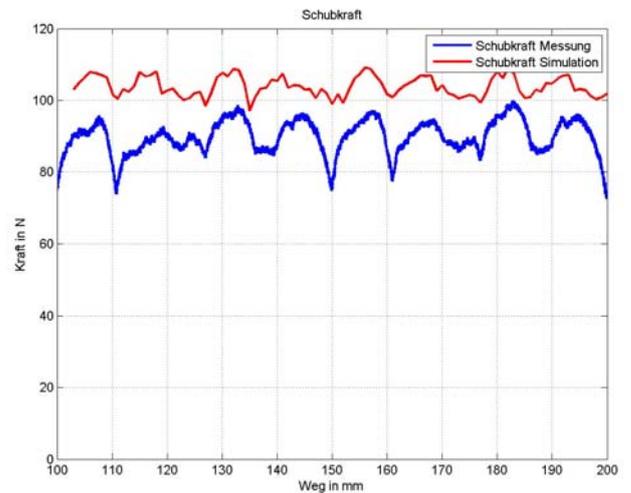


Bild 8 Vergleich des simulierten und des realen Schubkraftverlaufes des optimierten Zahnspulläufers mit 139,5 mm

Insgesamt stimmen die Kurven in der Form sehr gut überein. Allerdings ist eine Abweichung der Absolutwerte von etwa 15% festzustellen. Die Unterschiede sind durch Fertigungstoleranzen zu erklären und auch durch Schwankungen der Materialeigenschaften, die nicht in der Simulation berücksichtigt werden können. Der Vernetzungsgrad bei stark unterschiedlichen Aspektverhältnissen, wie sie hier vorliegen, ist für die Simulation sehr wichtig. Es muss hier sehr fein vernetzt werden. Eine Tetraedergröße kleiner 1 mm sollte verwendet werden, um eine höhere Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität zu erhalten. Jedoch steigt dann die Rechenzeit derart an, dass eine Parametervariation keinen Sinn mehr macht. Dann kann eine Optimierung durch Parametervariation nicht mehr in ver-

treibar Zeit erfolgen. Es muss also ein Kompromiss zwischen notwendiger und hinreichend genauer Vernetzung und der Realität getroffen werden. **Bild 9** zeigt den Läufer mit der „Standardvernetzung“ auf der linken und einer feineren, ergebnistreueren Vernetzung (Kantenlänge des Netzes = 3 mm) auf der rechten Seite.

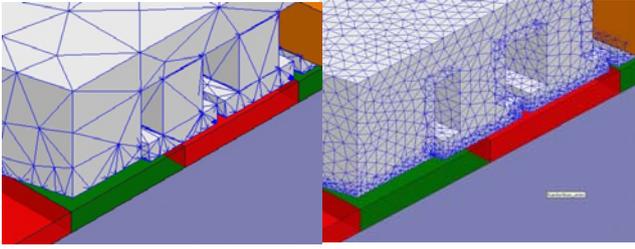


Bild 9 Niedriger und hoher Vernetzungsgrad des asymmetrischen Zahnspulläufers

Um den Einfluss der Geometrieangepassung auf die Positioniergenauigkeit zu erfassen, wurden beispielhaft die beiden Flachspulläufer (mit geradem bzw. geschrägtem Rückschluss) mit einer nicht optimal eingestellten Internal Model Control Regelung einmal mit und einmal ohne Vorsteuerung untersucht. Es wird hier aber nur auf den Fall der reinen IMC-Regelung eingegangen. Diese wurde absichtlich mit nicht optimal eingestellten Regelparametern genutzt, um eine vollständige Ausregelung der Rastkräfte zu vermeiden. Ansonsten besteht nicht die Möglichkeit, Änderungen zu erkennen.

Um die Positioniergenauigkeit der beiden Läuferückschlussvarianten zu überprüfen, wurden über eine Länge von zehn Magneten jeweils pro Magnet fünf Positionen angefahren. Insgesamt wurden so 50 Punkte wiederholt angefahren. **Bild 10** und **Bild 11** zeigen die beiden Soll- und Ist-Diagramme mit der daraus ermittelten quadratischen Abweichung als Zahlenwert oben links für den Rückschluss mit 127,5 mm und den Rückschluss mit 139,5 mm.

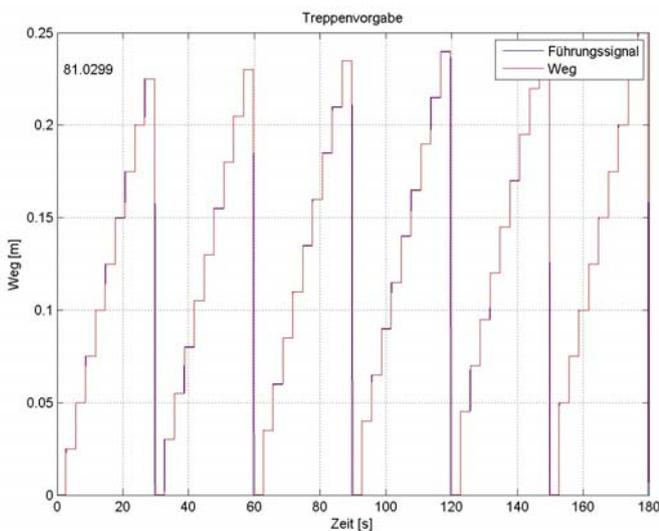


Bild 10 Bahnfolgegenauigkeit des asym. Flachspulmotors 127,5 mm, nicht optimal eingestellte IMC-Regelung

Die Soll- und Istkurven scheinen in beiden Diagrammen zunächst deckungsgleich. Die quadratische Abweichung sinkt jedoch bei der geometrisch optimierten Variante von 81,0299 auf einen Wert von 56,9135. Es kann also ein Verbesserung in der Bahnfolgeeigenschaft von etwa 30% verzeichnet werden. Die beiden Messungen wurden jeweils mit identischen Parametern durchgeführt.

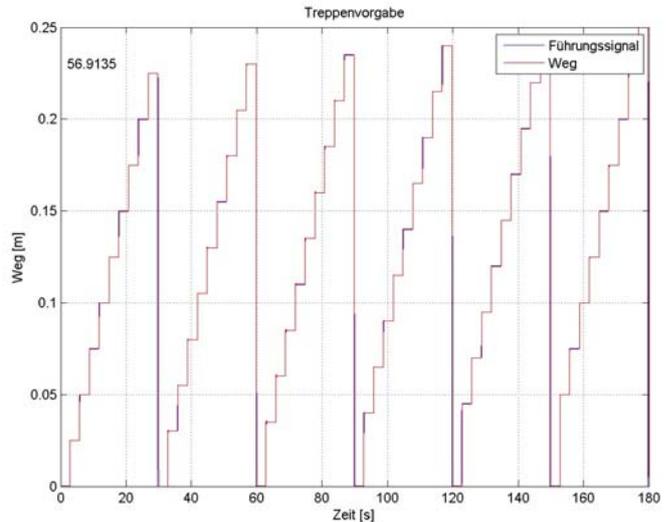


Bild 11 Bahnfolgegenauigkeit des asym. Flachspulmotors 139,5 mm, nicht optimal eingestellte IMC-Regelung

Betrachtet man nun die Positioniergenauigkeit dieser beiden Messungen, ist ein ähnlicher Trend festzustellen. Die Positioniergenauigkeit ist durch die Optimierung deutlich verbessert. Natürlich sind die ermittelten Größen nur in Relation zu einander zu sehen, wie in **Bild 12** und **Bild 13** zum Ausdruck kommt.

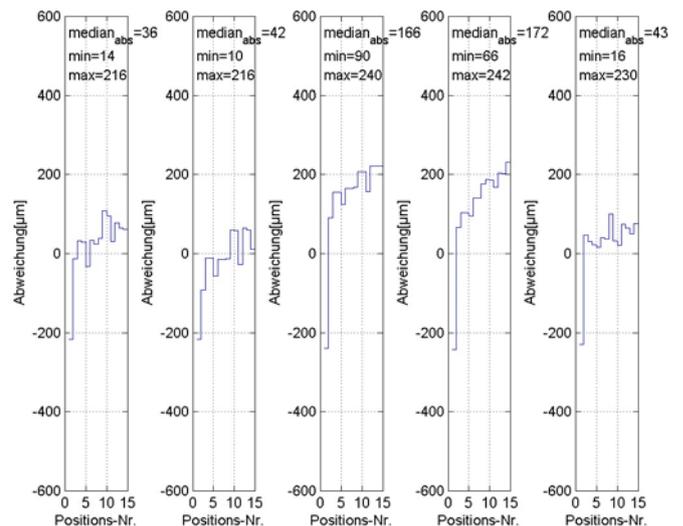


Bild 12 Positioniergenauigkeit des asym. Flachspulmotors 127,5 mm, nicht optimal eingestellte IMC-Regelung

Eine Verbesserung der Positioniergenauigkeit von etwa 15% ist hier zu verzeichnen, betrachtet man die Medianwerte über die fünf Messpunkte gemittelt. Der Abschnitt

4.2 geht dann kurz auf die „richtig“ eingestellte Regelung mit ein.

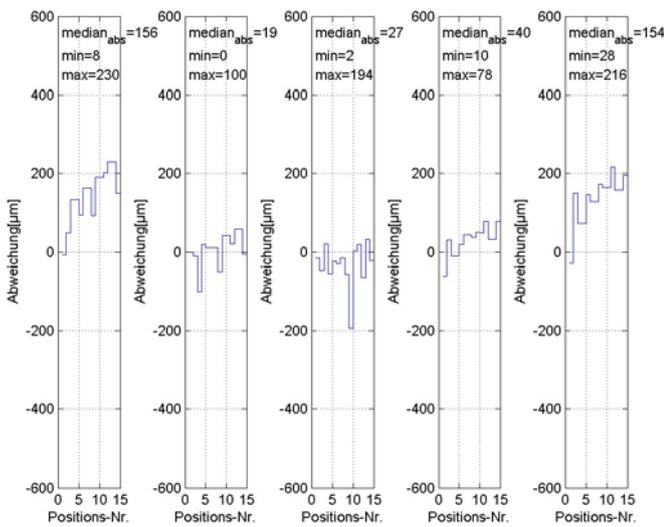


Bild 13 Positioniergenauigkeit des asym. Flachspulmotors 139,5 mm, nicht optimal eingestellte IMC-Regelung

4.2 Ergebnisse der Regelungsoptimierung

Um einen umfassenden Überblick in die Rastkraftthematik zu bekommen, wird noch kurz auf die Möglichkeiten der Regelung eingegangen.

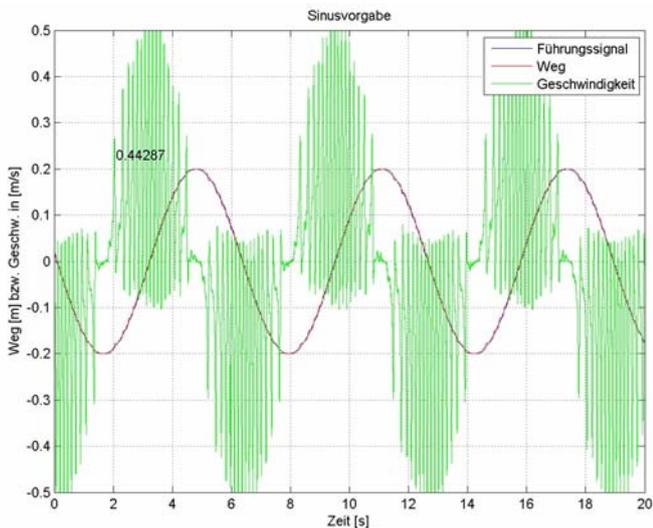


Bild 14 Bahnfolgegenauigkeit des asymmetrischen Flachspulmotors 127,5 mm bei PI-Regelung

Das **Bild 14** zeigt die PI-Regelung des asymmetrischen Läufers der Läuferlänge von 127,5 mm, der eine sinusoidale Bewegung von ± 200 mm mit 1 rad/s ausführt. Deutlich ist ein Rucken vor allem in der Geschwindigkeit zu erkennen. Betrachtet man das vorgegebene Führungssignal mit dem zugehörigen Weg-Signal, ist zu erkennen, dass auch im Wegsignal ein leichtes Schlingern um die Sollkurve erfolgt. Das Schlingern ist in **Bild 14** durch einen

Hell-Dunkel-Wechsel zu erkennen. Das Führungs- und das Wegsignal liegen hier nur scheinbar gut übereinander. Der Rückschluss dieses Motors weist eine Rastkraft von 15,53 N auf. Zwei reguläre, gleichmäßige Sinuskurven für die Geschwindigkeit und den Weg sollten hier zu sehen sein.

Nachdem die Regelung mit einem Standard PI-Regler nur befriedigende Ergebnisse in der Geschwindigkeitswelligkeit aufweist, wurde nach einer umfassenden Regelstruktur gesucht, die sowohl unabhängig von Rastkräften hoch präzise positioniert als auch eine sehr geringe Geschwindigkeitswelligkeit liefert.

Die besten Ergebnisse wurden mit einer Internal Modell Control (IMC), einer modellbasierten Regelung in Kombination mit einem Kalman-Bucy-Filter, einem speziellen Beobachter, erzielt, siehe **Bild 15**.

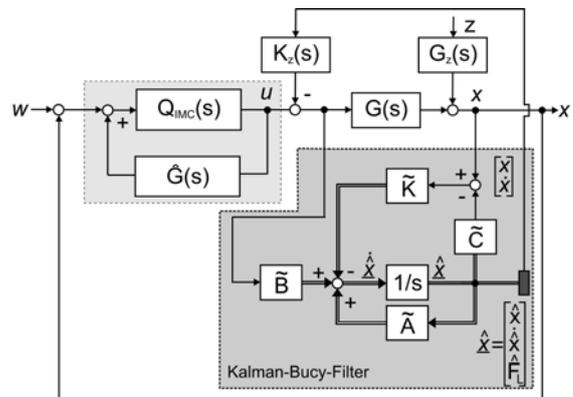


Bild 15 Struktur der IMC-Regelung in Kombination mit einem Kalman-Bucy-Filter

Auf die Funktionsweise beider Regelbereiche wird im Folgenden nur sehr kurz eingegangen, da der Fokus des Vortrages auf der geometrischen Optimierung liegt.

Beim IMC-Regler wird das Modell der Regelstrecke $\hat{G}(s)$ der Regelstrecke $G(s)$ parallel geschaltet, so dass nur die Differenz $x(s) - \hat{x}(s)$ auf den IMC-Regler zurückgeführt wird. Die wahren und die durch das Modell vorherbestimmten Regelgrößen unterscheiden sich im störungsfreien Fall ($z(s)=0$) nicht, sodass das Rückführsignal verschwindet. In diesem Fall wirkt der Regler als reine Vorwärtssteuerung. Natürlich müssen hierbei Modell und Realität in weiten Bereichen sehr ähnlich sein.

Beim Kalman-Filter betrachten wir ein System, das durch das Nutzsignal und ein stochastisches Rauschsignal angeregt wird. Das Messwerk liefert mit Hilfe des Beobachtungsvektors $z(t)$ Messsignale an die in x_t ermittelten Zustandssignale des Systems. Die Messungen sind durch ein stochastisches Messrauschen zusätzlich verfälscht. Ziel ist es, ein System zu erzeugen, das aus z_t laufend optimale Zustandsschätzungen \hat{x}_t liefert. Gefunden werden muss nun ein geeigneter Algorithmus, ein Filter, der bei bekannter Systemdynamik und Messwerterfassung mit den Informationen über die Rauschsignale aus den Messungen z eine „optimale“ Schätzung \hat{x} für den Zustand derart bestimmt, dass das mittlere Schätzfehlerquadrat $E = (x_t - \hat{x}_t)^2$ minimal ist. Soll also der Schätzfehler op-

timal sein, sodass die Komponenten des Schätzfehlers minimale Varianzen aufweisen, ist dies äquivalent mit der Forderung, dass die Spur der Kovarianzmatrix minimal ist. Das Kalman-Bucy-Filter hat die gleiche Struktur wie ein Beobachter, wobei die Berechnung der optimalen Filterverstärkung K über eine modifizierte Matrix-Ricatti-Gleichung erfolgt.

Betrachten wir wieder die sinusoidale Bahnfolgenauigkeit für eine Geschwindigkeit von 1 rad/s, verbessert sich der Wert der quadratischen Soll-Ist-Differenz im Vergleich zur PI-Regelung von 0,44287 auf 0,000387. Nur noch eine minimale Geschwindigkeitswelligkeit ist festzustellen, siehe hierzu auch **Bild 16**.

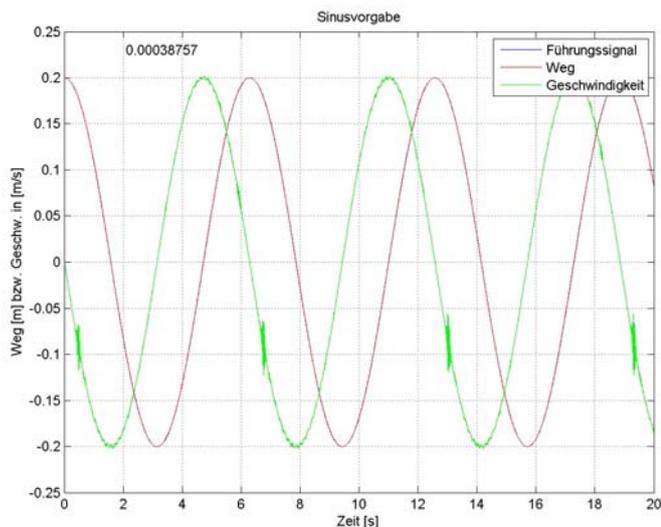


Bild 16 Bahnfolgenauigkeit des asymmetrischen Flachspulmotors, 127,5 mm bei kalmangefilterter IMC-Regelung

Die kalmangefilterte IMC-Regelung ist für die hochgenaue Positionierung von Lineardirektantrieben hervorragend geeignet. Deutlich wird, dass durch eine geeignete Regelung ein eisenbehaffter Motor höchste Dynamik trotz hoher Läufermasse besitzen kann. Flachspulmotoren weisen in dieser Kombination somit beste Eigenschaften auf. Auch für Zahnspulenlineardirektantriebe werden ähnlich gute Werte erzielt, jedoch schränkt die sehr hohe Läufermasse die Dynamik und die Bahnfolgenauigkeit ein. Die Positioniergenauigkeit beträgt 0 bis 2 μm für das hier genutzte Inkrementalmesssystem mit einer Auflösung von 2 μm . Sie wird für sämtliche untersuchten Rückschlusstypen erreicht.

5 Zusammenfassung

Durch Verändern der Geometrie wie auch der Regelungsstruktur lässt sich zeigen, dass die Rastkräfte bei asymmetrischen Lineardirektantrieben stark reduziert, eine bessere Laufruhe und eine höhere Positioniergenauigkeit erreicht werden können. Eine systematische Einteilung der einzelnen Maßnahmen und deren Auswirkungen auf die Dyna-

mik und die Kraftentwicklung von eisenbehafften Lineardirektantrieben wurden bisher nicht nachgewiesen.

Um die störenden Rastkräfte besser Handhaben zu können, wurden die geometrischen Modifikationsmöglichkeiten an Flachspul- und Zahnspulläufem mittels Finite-Element-Methode auf Basis des Programms „Maxwell“ in realitätsnahen Grenzen systematisch variiert. Danach wurden markante Rückschlussvarianten aufgebaut, durch Messung überprüft und dokumentiert. Parallel wurden verschiedene Fahrregler, wie z. B. modellbasierte Regler und Regelungsstrukturen, mittels Simulation (MatLab/Simulink) dargestellt und mit dSpace überprüft.

Insgesamt können Rastkräfte geometrisch beispielsweise durch Veränderung der Rückschlusslänge, durch Schrägstellen der Eisenkanten und/oder Magnetkanten und durch Veränderung der Zahnform reduziert werden.

Es zeigt sich bei der Anwendung der Finiten-Element-Simulation, dass Rastkräfte vorher bestimmbar sind und in weiten Bereichen durch reale Modelle bestätigt werden. Dabei weisen Fertigungstoleranzen am Motor, Materialschwankungen und die Vernetzung der Simulationsmodelle bei den Ergebnissen möglicherweise einen größeren Einfluss auf, als vermutet.

Bei der Wahl der Regelungsstrukturen zeigen modellbasierte Internal Modell Control Regelungen kombiniert mit einem Kalman-Bucy-Filter die geringsten Schwankungen im Geschwindigkeitsverlauf bei gleichzeitig sehr hoher Positioniergenauigkeit und Wiederholbarkeit.

Die vielen Variationsmöglichkeiten der geometrischen Parameter können hier nur exemplarisch behandelt werden, um einen Einblick zu vermitteln. Die Gesamtergebnisse werden in einer nachfolgenden Dissertation im Detail erörtert.

6 Literatur

- [1] Atencia, J.; Martinez, G.: Minimization of cogging forces in flat permanent magnet linear motors. Nagana Japan: Proceedings of the LIDA Conference 2001
- [2] Brammer, K.; Siffling, G.: Kalman-Bucy-Filter: Deterministische Beobachtung und stochastische Filterung. Oldenbourg: München, Wien 1994
- [3] Cruise, R.; Landy C.: Reduction of cogging forces in linear synchronous Motors. South Africa: University of the Witwatersrand 1999
- [4] Fischer, R.: Elektrische Maschinen. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2006
- [5] Föllinger, O.: Regelungstechnik Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. Heidelberg: Hüthig Verlag 2008
- [6] Jurisch, F.: Nutrastrmomente in elektrischen Maschinen. Hanau: Vaccumschmelze GmbH Co. KG 2010
- [7] Stölting, H. D.; Kallenbach, E.: Handbuch Elektrische Kleinantriebe. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2006