

# 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau  
von Makro bis Nano /  
Mechanical Engineering  
from Macro to Nano**

**Proceedings**

Fakultät für Maschinenbau /  
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

## Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten  
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,  
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,  
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,  
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005  
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Helge Drumm  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau  
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

**E. Räumschüssel / R. Lipfert**

# **Beeinflussung des Bewegungsverhaltens von Antriebssystemen mit eisenbehafteten elektromagnetischen Aktoren am Beispiel von Linearschrittmotoren**

## **ABSTRAKT**

Lineare Schrittmotorantriebe sind mechatronische Systeme, die als einzelne Antriebssysteme zur Erzeugung linearer Bewegungen dienen oder die als Komponenten von planaren und Mehrkoordinaten-Direktantrieben sowie anderen speziellen Antriebsstrukturen wichtige Teilsysteme in komplexen und intelligenten mechatronischen Systemen darstellen.

Wie alle elektromagnetischen Aktoren, die nach dem Reluktanzprinzip arbeiten oder deren magnetische Kreise stark eisenbehaftet sind, stellen sie nichtlineare Systeme dar, deren Eigenschaften aus diesem Grunde häufig nicht den gestellten Applikationsforderungen genügen. Deshalb macht sich die Analyse der typischen Einflussfaktoren erforderlich, um das statische und dynamische Verhalten der Antriebe im Entwurf gezielt zu beeinflussen.

Der vorliegende Artikel behandelt dieses Problem und beschäftigt sich mit der Realisierung besonderer statischer und dynamischer Eigenschaften von linearen Schrittmotorantrieben im Entwurfsprozess. Es zeigt sich, dass zum Erreichen der geforderten Eigenschaften insbesondere die Konstruktion und Auslegung der magnetischen Kreise der Motoren sowie die Steuerung bzw. Regelung des Gesamtsystems beeinflusst werden muss. Dabei ist nicht nur die Steuerung an die im Entwurf erreichten statischen Eigenschaften (Kraft-Weg-Kurven) der Motoren anzupassen, sondern die zu entwickelnden Magnetkreise der Linearmotoren bzw. Aktoren sind auch a priori unter Beachtung des geplanten Steuerungs- bzw. Regelungskonzeptes zu optimieren.

## **1 TYPISCHE EIGENSCHAFTEN EISENBEHAFTETER ELEKTROMAGNETISCHER AKTOREN**

### **1.1 KRAFTERZEUGUNG**

Aufgrund der ferromagnetischen Eigenschaften der für die magnetischen Kreise verwendeten Materialien stellen eisenbehaftete elektromagnetische Aktoren in der Regel stark nichtlineare Systeme dar. Abbildung 1 zeigt den magnetischen Kreis einer allgemeinen Aktorstruktur sowie die magnetischen Flussverkettungen und Co-Energien an zwei Positionen  $x_1$  und  $x_2$ .

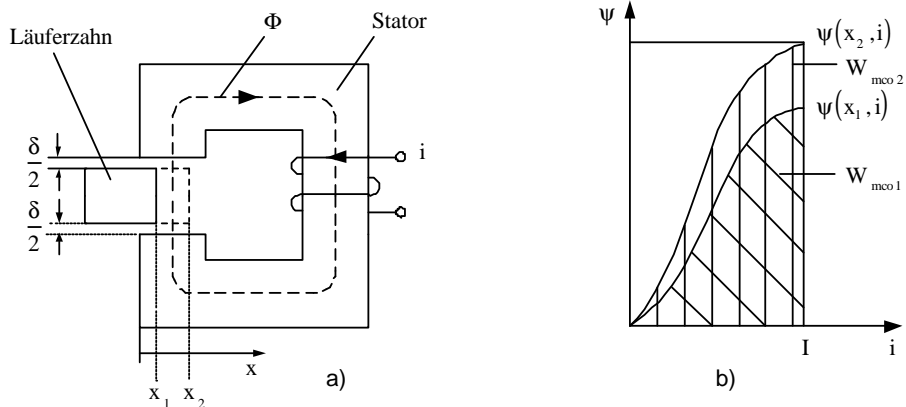


Abbildung 1: a) magnetischer Kreis, b) magnetische Flussverkettungen und Co-Energien an den Positionen  $x_1$  und  $x_2$

Aus der Abbildung ist der nichtlineare Verlauf der  $\Psi$ - $i$ -Zusammenhänge ersichtlich. Die erzeugte Kraft wird meist über die Änderung der magnetischen Co-Energie nach dem Weg berechnet

$$f = \frac{\int_x^I y(x, i) di}{\int_x^I x} = \frac{\int_x W_{mco}}{\int_x} \quad (1)$$

Für spezielle Aktoren sowie für Elektromagnete, lineare Schrittmotoren u.ä. Antriebs Elemente ist die erzeugte Kraft damit eine Funktion des Stromes und der Position

$$f = f(x, i) \quad (2)$$

## 1.2 STATISCHE UND DYNAMISCHE EIGENSCHAFTEN

Für die betrachteten linearen Schrittmotoren, siehe Abbildung 2, gilt für die Kräfte der beiden Phasen  $\alpha$  und  $\beta$

$$\begin{aligned} f_a &= f(i_a, x) \\ f_b &= f(i_b, x) \end{aligned} \quad (3)$$

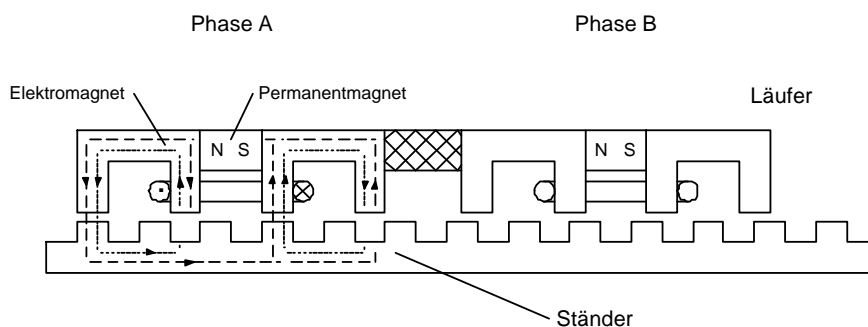


Abbildung 2: Prinzip des betrachteten Linearschrittmotors

Auf die Wirkungsweise des Motors soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, da diese hinlänglich bekannt ist, siehe z. B. auch [4].

Abbildung 3 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf der Phase  $\alpha$  eines untersuchten Linear-Schrittmotors für einen vorgegebenen Strom von 5 A.

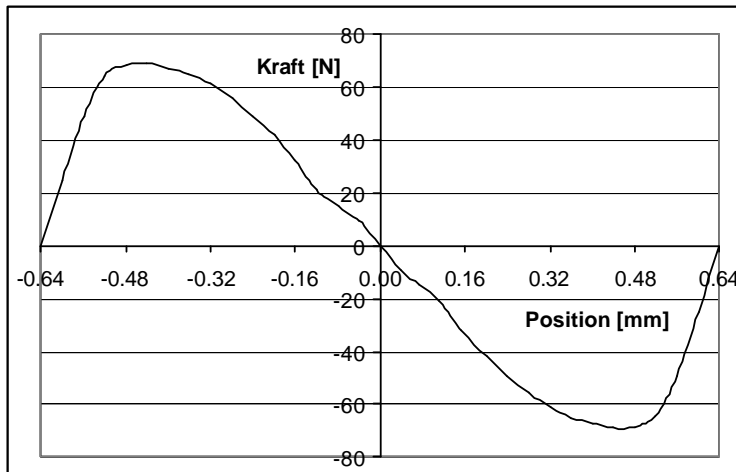


Abbildung 3: Kraft-Weg-Kennlinie der Phase eines Linear-Schrittmotors bei einem Strom von 5 A. Man erkennt den sinusförmigen Grundverlauf der Kennlinie, der jedoch relativ starke Abweichung von der genauen Sinusform aufweist. Besonders auffällig sind die Verschiebungen der Extrema aus den Ideallagen sowie die unterschiedliche Steigung in den Nulldurchgängen.

Die Analyse zeigt, dass durch diese nicht sinusförmigen Kraft-Weg-Kennlinien der Motor im Betrieb starke Kraftschwankungen erzeugt. Besonders bei hohen Steuerströmen sowie geringen Verfahrgeschwindigkeiten wirkt sich dies negativ auf das Fahrverhalten aus. Ein Beispiel dieser Kraftschwankungen zeigt Abbildung 4.

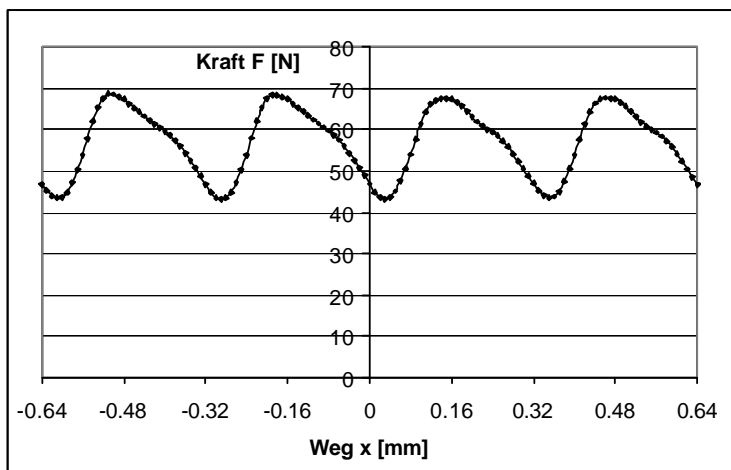


Abbildung 4: Kraftschwankungen eines Schrittmotors bei langsamer Bewegung für einen Nennstrom von 5 A

Die Charakteristik der Kennlinien besitzt nicht nur Einfluss auf die bewegungserzeugende Kraft. In engem Zusammenhang mit den Kraft-Weg-Kennlinien ist auch die Positionsabweichung für den Fall des Betriebs in der offenen Steuerkette zu sehen. Abbildung 5 zeigt die auftretende Positionsabweichung für eine Verfahrgeschwindigkeit von 1 mm/s bei einem Nennstrom von 5,5 A.

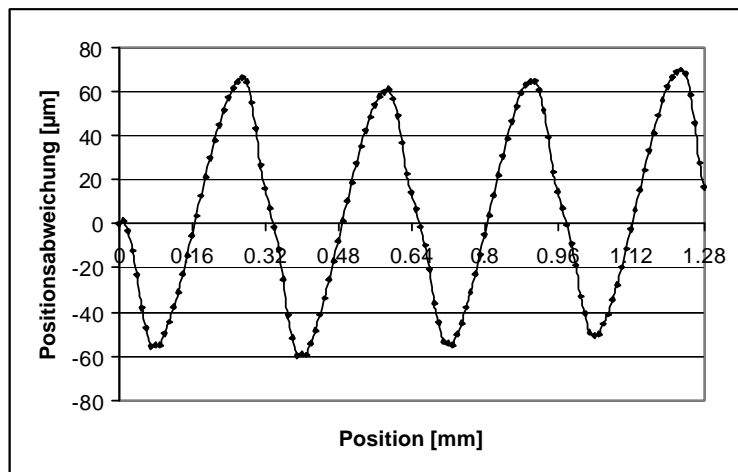


Abbildung 5: Positionsabweichung beim Betrieb in der offenen Steuerkette (Geschwindigkeit: 1 mm/s, Nennstrom: 5.5 A)

Ebenso wie für die in Abbildung 4 gezeigten Kraftschwankungen ist für den Kurvenverlauf festzustellen, dass die Schwankungen mit der vierfachen Frequenz der Kraft-Weg-Kennlinie auftreten.

## 2. STATISCHE UND DYNAMISCHE FORDERUNGEN

Im Rahmen des gegenwärtig zu beobachtenden Trends zu höheren Geschwindigkeiten, höherer Präzision und Verbesserung des gesamten dynamischen Verhaltens mechatronischer Produkte genügen die in Abschnitt 1.2 gezeigten statischen und dynamischen Eigenschaften in der Regel nicht den gestellten Applikationsforderungen. Es macht sich eine Verbesserung der statischen und dynamischen Eigenschaften im Entwurf notwendig. Hierbei beziehen sich die statischen Forderungen meist auf die Realisierung hoher Kräfte und hoher Positioniergenauigkeiten. Die dynamischen Forderungen beinhalten in der Regel eine gute Laufruhe und ein günstiges Schwingungsverhalten.

Diese für lineare Schrittmotor-Antriebe getroffenen Aussagen lassen sich in hohem Maße für mechatronische Antriebs- und Aktorsysteme verallgemeinern.

Da die betrachteten linearen Schrittmotorantriebe mechatronische Systeme darstellen, ist für die Realisierung der geforderten Eigenschaften im Entwurf das Gesamtsystem (Motor, Steuerung, Regelung, Leistungselektronik, Messsystem) zu betrachten und der Einfluss der einzelnen Teilsysteme auf die Eigenschaften des Gesamtsystems zu analysieren.

Bei der Lösung dieser Aufgabe stellt sich heraus, dass insbesondere die Geometrie und Auslegung der magnetischen Kreise der Motoren sowie ihre Steuerung bzw. Regelung den Haupteinfluss auf das statische und dynamische Verhalten ausüben, weshalb im weiteren auf diese Faktoren eingegangen wird.

## 3. REALISIERUNG DES GEFORDERTEN STATISCHEN UND DYNAMISCHEN VERHALTENS IM ENTWURFSPROZESS

### 3.1 VORAUSSETZUNGEN ZUR REALISIERUNG DER GEFORDERTEN EIGENSCHAFTEN

Um die in Abschnitt 1.2 gezeigten Positionsabweichungen zu vermeiden sowie die Kraftschwankungen zu reduzieren, ist die Erzeugung einer quasi statischen, schwingungsfreien Bewegung notwendig. Der Läufer des Motors muss sich synchron zum magnetischen Feld des Stators bewegen (Synchronmaschine). Deshalb ist es erforderlich, dass sich der Durchflutungsvektor des magnetischen Feldes, der durch den Raumzeiger des Stromes des Motors beschrieben wird, auch stetig und schwingungsarm bewegt.

Es lässt sich ableiten, dass der Motor zum Erreichen dieser Forderung harmonische Kraft-Weg-Kennlinien besitzen muss. Für die beiden Phasen  $\alpha$  und  $\beta$  muss gelten

$$\begin{aligned} f_a(x, i_a) &= -K_y i_a \sin\left(\frac{2p}{t} x\right) \\ f_b(x, i_b) &= K_y i_b \cos\left(\frac{2p}{t} x\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Die Gesamtkraft des Motors ist damit gleich der Summe der Kräfte aus Gl. (4)

$$f = f_a(x, i_a) + f_b(x, i_b) = K_y |\mathbf{i}| \sin(\mathbf{j}_i - \frac{2p}{t} x). \quad (5)$$

Es sind

- $f_a, f_b$  Kraft- Weg- Verläufe der beiden Motorphasen
- $x$  Läuferposition
- $i_a, i_b$  Ströme der beiden Phasen des Motors
- $K_y$  Kraftkonstante des Motors
- $t$  Polteilung des Motors
- $\mathbf{i}$  Raumzeiger des Stromes
- $\mathbf{j}_i$  Argument des Raumzeigers  $\mathbf{i}$ .

Aus Gl. (5) ist ersichtlich, dass zur Erzeugung einer konstanten Kraft während der Bewegung des Motors neben dem Betrag des Raumzeigers des Stromes auch das Argument des Sinus konstant sein muss. Das bedeutet, es müssen Läuferpendelungen verhindert werden. Da dies in der offenen Steuerkette nicht möglich ist, muss der Motor kommutiert bzw. geregelt werden, d.h. Steuerung der Motorströme (Argument des Raumzeigers des Stromes) in Abhängigkeit von der Läuferposition  $x$ .

### 3.2 ABLEITUNG DER ENTWURFSZIELE

Aus der Analyse der Einflussfaktoren auf das statische und dynamische Verhalten ist die Zielstellung für die Konzeption und den Entwurf des Antriebs-Gesamtsystems abzuleiten.

Aus Abschnitt 3.1 folgen für den Linearschrittmotorantrieb die wesentlichen Zielstellungen:

1. Entwurf von Linearmotoren mit möglichst sinus- bzw. kosinusförmigen statischen Kraft-Weg-Kennlinien mit linearem Kraft-Strom-Zusammenhang (Gl. (4)).
2. Realisierung einer hohen Laufruhe durch eine spezielle Kommutierung oder allgemein Steuerung bzw. Regelung, die an die Kraft-Weg-Kennlinien der zu entwerfenden bzw. zu optimierenden Motorphasen angepasst ist. Die Optimierung der Kraft-Weg-Verläufe der Motorphasen, d.h. der Motorkonstruktion, und die Konzeption der Steuerung müssen dabei parallel in gegenseitiger Abhängigkeit durchgeführt werden.

Weiter sind noch generelle Forderungen zu beachten, wie z.B. Erreichen maximaler Kräfte bezogen auf den vorhandenen Bauraum, minimaler Kupfereinsatz, minimale Verluste u.a., auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll.

### 3.3 UMSETZUNG DER FORDERUNGEN UND ZIELE

Die aus dem gewünschten statischen Verhalten abgeleiteten Entwurfsziele müssen vorwiegend durch die Optimierung der magnetischen Kreise der Motoren bzw. Aktoren erfüllt werden (Variation der Magnetkreisgeometrie, der Zahnstruktur, des Magnetmaterials usw.). Die dynamischen Forderungen sind in hohem Maße durch das Steuerungs- bzw. Regelungskonzept zu realisieren. Aber eine Veränderung der statischen Kraft-Weg-Kennlinien beeinflusst ebenso das dynamische Verhalten des Motors bzw. Aktors und muss deshalb in der Steuerung berücksichtigt werden. Das bedeutet, der Entwurf der Magnetkreisgeometrie und der Steuerungsentwurf können nicht losgelöst voneinander durchgeführt werden. Abbildung 6 veranschaulicht diesen Sachverhalt. Außerdem werden bestimmte Eigenschaften, wie z.B. die Positioniergenauigkeit, sowohl von der Gestalt und den Eigenschaften des magnetischen Kreises als auch von der Steuerung bzw. Regelung und dem Messsystem beeinflusst.

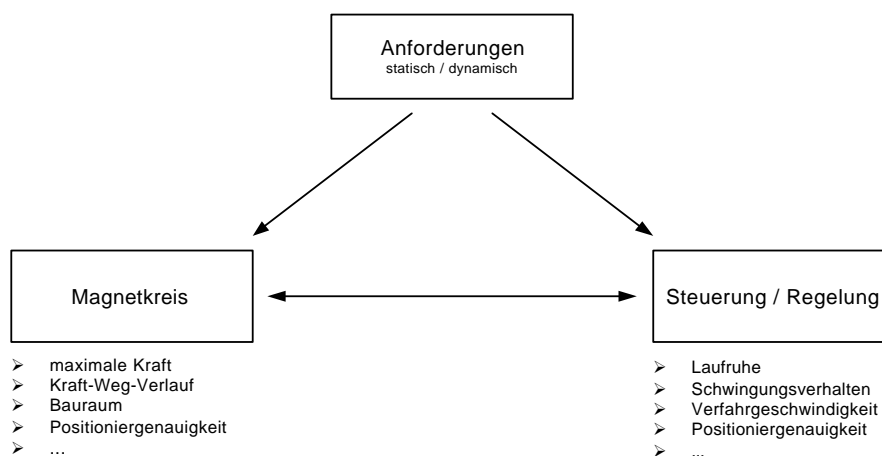


Abbildung 6: Anforderungen an Schrittmotorantriebe und Realisierungsmöglichkeiten

Die Realisierung der im Punkt 3.2 beschriebenen Ziele von Kraft-Weg-Verlauf und Kraft-Strom-



Zusammenhang erfolgt durch Veränderungen in der Geometrie des Magnetkreises. Durch Variation der Zahngeometrie und Teilungsperiode wird gezielt Einfluss auf die Maximalkraft, die Kraft-Weg-Charakteristik sowie auf die Verfahrensgeschwindigkeit bei gegebener Ansteuerfrequenz genommen. In Abbildung 7 sind die Auswirkungen von Veränderungen der Zahnstruktur auf die Kraft-Weg-Kennlinien an ausgewählten Beispielen dargestellt.

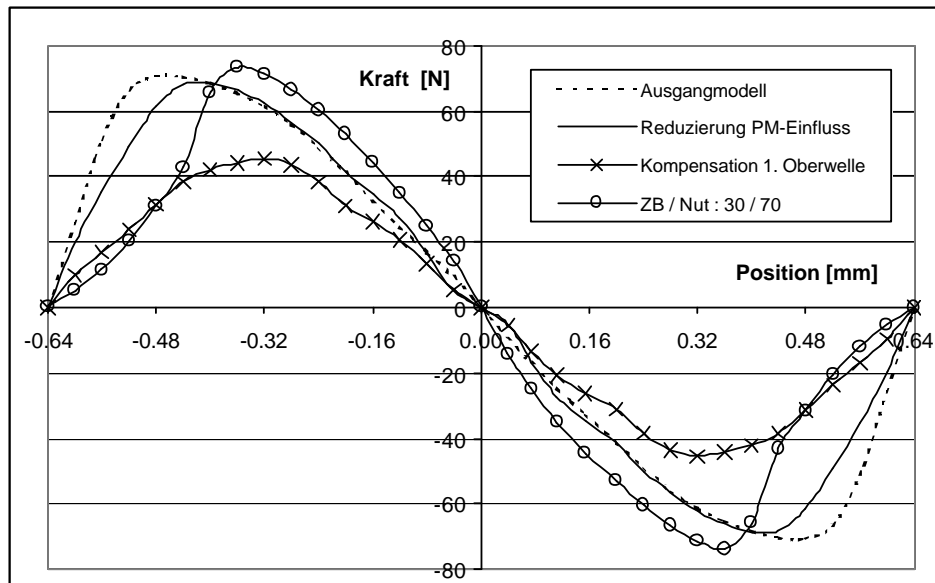


Abbildung 7: Kraft-Weg-Kennlinien bei unterschiedlichen Modifikationen der Zahnstruktur

Die Abbildung 7 zeigt, dass durch konstruktive Maßnahmen die Annäherung an einen sinusförmigen Verlauf der Kraft-Weg-Kennlinien nur unter Reduzierung der Maximalkraft erfolgen kann (z.B. Kompensation 1. Oberwelle). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Reduzierung der Maximalkraft im Widerspruch zu den allgemeinen Anforderungen an Antriebe steht. Es gilt, je nach Anwendungsfall, einen Kompromiss zwischen Kurvenform und Maximalkraft zu finden.

Da durch die Konstruktion und Auslegung der magnetischen Kreise die Kraft-Weg-Kennlinien der Sinus- bzw. Kosinusform nur angenähert werden können, ist eine weitere Verbesserung im Sinne nahezu idealer harmonischer Verläufe der Kennlinien nur noch durch die Korrektur der Motorströme möglich. Das heißt, es muss eine spezielle Steuerung und/oder Regelung der Motorströme erfolgen. In diesem Falle ist es aber erforderlich, für die zu entwerfende Stromkorrektur von vorn herein durch die Magnetkreiskonstruktion geeignete Kennlinienverläufe zu erzeugen, wie etwa der Verlauf bei Reduzierung des Permanentmagneteinflusses in Abbildung 7.

Abbildung 8 zeigt das Prinzip der Stromkorrektur, das die 2. Zielstellung in Abschnitt 3.2 realisiert.

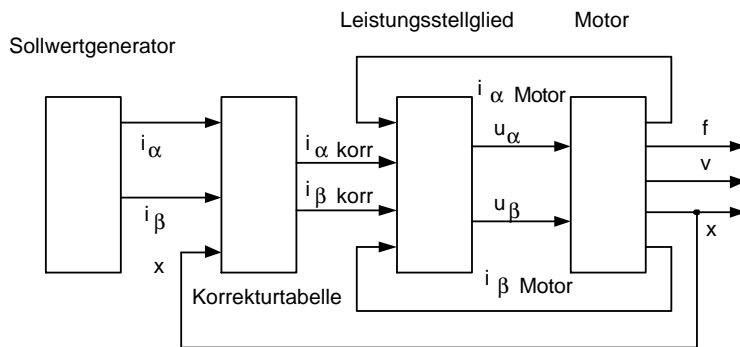


Abbildung 8: Prinzip der untersuchten Stromkorrektur

Die Korrekturströme

$$\begin{aligned} i_{a\text{ korr}} &= f(i_a, x) \\ i_{b\text{ korr}} &= f(i_b, x) \end{aligned} \quad (6)$$

die in der Korrekturtabelle abgespeichert sind, werden nach der Zielfunktion in Gl. (4) ermittelt. Dies kann sowohl rechnerisch auf der Basis von FEM-Analysen als auch messtechnisch an einem vorhandenen Motor erfolgen. Näheres dazu findet sich in [3]. Anders als z. B. in [2] wird dabei nicht nur eine Kompensation der Welligkeit der Antriebskraft vorgenommen, sondern auch der Kraft-Strom-Zusammenhang linearisiert.

Abbildung 9 zeigt den Verlauf der von dem untersuchten Motor erzeugten Kraft als Funktion der Position für eine quasistatische Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit und Stromkorrektur gemäß Abbildung 8 (Simulationsergebnis).

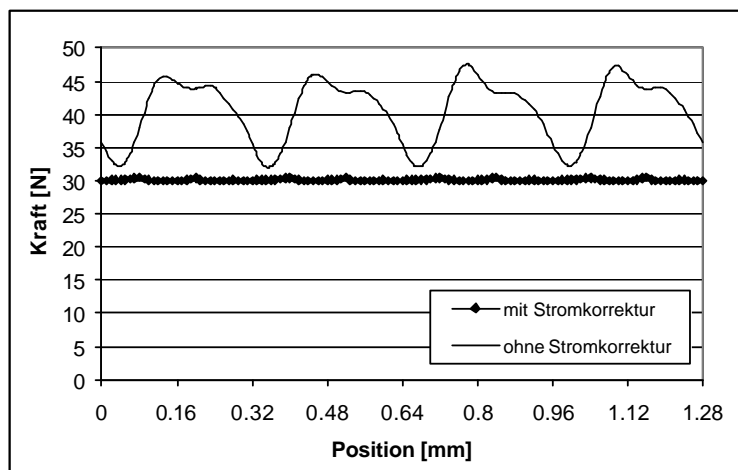


Abbildung 9: Simulierte Kraft-Weg-Verläufe des Antriebes für eine langsame Bewegung mit und ohne Stromkorrektur

Der Winkel der Kommutierung (Lastwinkel, Argument des Sinus in Gl.(5)) ist auf 90° eingestellt. Die Phasenströme betragen 3 A.

Man erkennt, dass die Korrektur der Ströme eine enorme Verbesserung des Gleichlaufes des Motors

gestattet. Das Fahrverhalten zeigt eine wesentlich größere Laufruhe. Die kleinere Kraft von 30 N mit Stromkorrektur in Abbildung 9 ist durch die Festlegung der Kippkraft-Strom-Konstanten  $K_y$  von 10 N/A bedingt.

Es sei am Schluss noch darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse auf der Basis eines untersuchten Linearschrittmotors mit den Methoden und Werkzeugen der Modellbildung und Simulation erarbeitet wurden (siehe [1]). Dies betrifft sowohl die Feldsimulation, Simulation mit Netzwerkmodellen als auch die Dynamiksimulation mit konzentrierten Parametern und Daten aus der statischen Feldsimulation. Nähere Ausführungen dazu finden sich bereits in [4].

Das diesem Artikel zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Thüringer Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kultur (TMWFK) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

#### **Literatur- bzw. Quellenhinweise:**

- [1] Räumschüssel, E.; Lipfert, R.: Nichtlineares Modell eines Linearschrittmotors auf der Basis von Daten aus der Magnetfeldberechnung. 45. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der Technischen Universität Ilmenau, 4. - 6. Oktober 2000, Tagungsband ISSN 0943-7207, S. 529 – 534
- [2] A. Balkovoi, E. Kallenbach, „Linear Stepping Motor Model for Thrust Analysis and Control“, „ 45. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der Technischen Universität Ilmenau, 4. - 6. Oktober 2000, Tagungsband ISSN 0943-7207, S. 571 – 576
- [3] Lipfert, R. Räumschüssel, E.: "Optimization of a Mechatronic Direct Stepping Motor Drive System within the Scope of the Design Process", Mechatronics & Robotics 2004, 13-15 September 2004, Aachen - Germany, ISBN 3-938153-30-X, S. 338-343
- [4] Räumschüssel, E.; Lipfert, R.: Modellbildung und Simulation von Linearschrittmotor-Direktantrieben; 2. Paderborner Workshop, Intelligente mechatronische Systeme, Paderborn 25.03.-26.03. 2004

#### **Autorenangaben:**

Privatdozent Dr.-Ing. habil. Erich Räumschüssel  
Dipl.-Ing. Robby Lipfert  
TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, PF 100565  
98684 Ilmenau (Thüringen)  
Tel.: 03677 69 2484/ 03677 69 2480  
Fax: 03677 69 1801  
E-mail: erich.raeumschuessel@maschinenbau.tu-ilmenau.de  
robbly.lipfert@maschinenbau.tu-ilmenau.de